

“2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón”

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA**  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“DESARROLLO DE UNA RED DE VALOR CON BASE  
A LA GESTIÓN DE BIOENERGÍA, PARA DETERMINAR  
ESTRATEGIAS DE NEGOCIOS.”

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**  
**DOCTOR EN CIENCIAS**  
**DE LA INGENIERÍA**

**PRESENTA:**

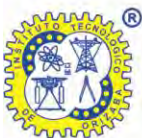
*M. C. José Octavio Rico Contreras*

**DIRECTOR DE TESIS:**

*Dr. Alberto Alfonso Aguilar Lasserre*

**CODIRECTOR DE TESIS:**

*Dr. Juan Manuel Méndez Contreras*



"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

FECHA: 16/06/2015  
DEPENDENCIA: POSGRADO  
ASUNTO: Autorización de Impresión  
OPCIÓN: I

**C. JOSE OCTAVIO RICO CONTRERAS**  
CANDIDATO A GRADO DE DOCTOR EN:  
**CIENCIAS DE LA INGENIERIA**

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**"DESARROLLO DE UNA RED DE VALOR CON BASE A LA GESTIÓN DE  
BIOENERGIA, PARA DETERMINAR ESTRATEGIAS DE NEGOCIOS."**

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.



A T E N T A M E N T E

M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA  
INSTITUTO  
TECNOLÓGICO  
DE ORIZABA

JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ggc





"2015, Año del Generalísimo José María Morelos y Pavón"

FECHA : 05/06/2015

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. M.C. MA. ELENA GARCÍA REYES  
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACION.  
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

JOSE OCTAVIO RICO CONTRERAS

la cual lleva el título de:

"DESARROLLO DE UNA RED DE VALOR CON BASE A LA GESTION DE BIOENERGIA,  
PARA DETERMINAR ESTRATEGIAS DE NEGOCIOS."

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DR. ALBERTO ALFONSO AGUILAR LASSERRE

SECRETARIO : DR. JUAN MANUEL MENDEZ CONTRERAS

PRIMER VOCAL : M.C. CUAUHTEMOC SANCHEZ RAMIREZ

SEGUNDO VOCAL : DR. GINER ALOR HERNANDEZ

TERCER VOCAL : DR. MARIO LEONCIO ARRIOJA RODRIGUEZ

VOCAL SUP. : DR. GUILLERMO CORTES ROBLES

EGRESADO(A) DEL DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA

OPCION: I Tesis

FIRMA  
  
FIRMA  
  
FIRMA  
  
FIRMA  
  
FIRMA  
  
FIRMA



## AGRADECIMIENTOS.

### AGRADEZCO:

*A Dios por guiarme en todo momento para no perder el camino correcto, por darme la oportunidad de tener a mi lado personas muy valiosas y por otorgarme la fortaleza, humildad y la sabiduría necesaria para lograr con éxito un grado más en mi formación profesional.*

*A mi director de tesis el Dr. Alberto A. Aguilar Lasserre por la formación académica y científica enseñada, por la paciencia y perseverancia para ayudarme alcanzar los méritos científicos de este trabajo de investigación y por compartir su experiencia en todo momento.*

*A mi co-director de tesis el Dr. Juan Manuel Méndez Contreras por sus acertados consejos para nunca perder la visión científica de la investigación y por sus enseñanzas para mejorar espiritual, moral e intelectualmente.*

*Al Claustro Doctoral por sus valiosos consejos y recomendaciones para enfrentar los retos que implica un trabajo de investigación de esta naturaleza y por ayudarme a desarrollar competencias científicas con altos estándares.*

*A Grupo Porres a través del Ing. Jesús Theurel Potey por darme la oportunidad de desarrollar esta investigación en las empresas de ambas divisiones de negocios.*

*Al L.A.E. Víctor Capetillo Córdoba por sus excelentes consejos y constante motivación para no perder el objetivo de lo que es importante en los negocios.*

*Al C.P. Benjamín Heredia Pérez por su constante motivación para alcanzar nuevos retos y a nunca perder la capacidad de asombro para desarrollar e innovar procesos de transformación.*

*Al Ing. Fernando Gámez Rodríguez por su apoyo incondicional para alcanzar con éxito las actividades relacionadas con esta investigación, por la formación técnica en procesos agroindustriales y bioenergéticos que he adquirido con sus enseñanzas y como dice el Filósofo de Güemez de su natal Tamaulipas "lo que está bien, no puede estar mal".*

*Al Ing. Eduardo Hernández Stiefel por sus enseñanzas sobre procesos energéticos a partir de biomasa y al Ing. Guido Duarte Gari por sus enseñanzas sobre procesos de elaboración de azúcar.*

*Al Ing. Eder Cancino Elvira por su valiosa amistad y apoyo incondicional para terminar con éxito esta tesis de investigación.*

*A mis amigos y compañeros por los buenos momentos que compartimos juntos, por la paciencia que me mostraron y por sus acertados consejos para continuar mejorando.*

DEDICATORIA.

*Este trabajo de investigación doctoral está dedicado a mi familia con todo mi amor.*

*A mi maravilloso hijo José Octavio*

*Que me da la fortaleza de seguir adelante todos los días.*

*A mi amada esposa Ana Luz*

*Quien ha estado a mi lado apoyándome en todo momento y me alienta a ser mejor persona.*

*A mi excepcional madre María de los Ángeles y a mí querido padre Ángel*

*Por su amor incondicional y sacrificio de todos estos años para ayudarme a salir adelante.*

*A mis queridos hermanos Jorge Ángel, Carlos Luis, Héctor Javier y Sergio Arturo,*

*y con cariño a sus Esposas e Hijos*

*Por sus consejos de vida y superación constante que me han servido de guía*

*A mi nueva familia Lucrecia, Irene, Cesar, Cesar Fernando, Neli, Denisse y Mauricio*

*Por brindarme siempre su apoyo de manera incondicional.*

# INDICE

RESUMEN.....	24
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	25
INTRODUCCIÓN .....	25
Estructura de la Tesis .....	27
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	30
JUSTIFICACIÓN .....	32
OBJETIVOS .....	34
HIPOTESIS.....	34
Conclusiones.....	34
CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO .....	35
2.1. Estrategia de negocios.....	35
2.2. Bioenergía y Biomasa .....	39
2.3. Inteligencia Artificial .....	40
2.4. Análisis de riesgo e incertidumbre .....	43
Conclusiones .....	46
CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE.....	47
3.1. Estrategia de negocios.....	47
3.2. Bioenergía y Biomasa .....	50
3.3. Inteligencia Artificial .....	53
Conclusiones .....	55
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....	56
4.1. Metodología de evaluación de la cadena de valor a través de 7 etapas.....	56
4.2. Metodología para el Desarrollo de Red de Valor basada en bioenergía a través de 7 etapas. ..	62
.....	62
Conclusiones .....	65

---

CAPÍTULO 5. CADENAS DE VALOR AGROINDUSTRIAL.....	66
5.1. Estructura de análisis de la cadena de valor avícola utilizando pollinaza.....	67
5.2. Estructura de análisis de la cadena de valor avícola utilizando lodo residual.....	75
5.3. Estructura de análisis de la cadena de valor cañero – azucarera utilizando residuos agrícolas de cosecha (RAC) y bagazo .....	82
Conclusiones.....	90
CAPÍTULO 6. RED DE VALOR AGROINDUSTRIAL.....	91
6.1. Introducción.....	91
6.2. Definición del objetivo de la red.....	91
6.3. Identificación y definición de los participantes de la red.....	92
6.4. Identificación de las dimensiones de valor de los participantes de la red.....	92
6.5. Definición de los vínculos de valor.....	94
6.6. Análisis y modelo de Red de Valor de bioenergía.....	95
6.7. Optimización de la Red de Valor.....	107
6.7.1. Sensibilidad de la cadena de valor usando pollinaza.....	107
6.7.2. Optimización de la cadena de valor usando lodos residuales.....	114
6.7.3. Optimización de la cadena de valor usando residuos agrícolas de cosecha (RAC) de Caña.....	117
6.8. Escenarios de la red de valor.....	124
6.8.1. Escenario 1. Inversión inicial en la red.....	126
6.8.2. Escenario 2. Precio de KWh (\$/KWh) en la red.....	127
6.8.3. Escenario 3. Precio de la ceniza de pollinaza en la red.....	128
6.8.4. Escenario 4. Poder calorífico en la red.....	129
6.8.5. Escenario 5. Autoconsumo de kWh en la red.....	130
6.8.6. Escenario 6. Valores optimistas en la red.....	131
6.8.7. Escenario 7. Valores pesimistas en la red.....	132
6.9. Estrategias de Negocios.....	134
Conclusiones.....	136

---

---

CAPITULO 7. CONCLUSIONES.....	137
PRODUCTIVIDAD .....	141
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	144
ANEXOS.....	156
ANEXO 1. GRUPO CORPORATIVO EMPRESARIAL.....	157
1.1. Cadena de Valor Avícola.....	157
1.1.1. Ciclo de producción de pollo de engorde.....	158
1.1.2. Granjas de producción de pollo de engorde .....	159
1.1.3. Procesamiento de pollo de engorde.....	163
1.2. Cadena de Valor Cañero – Azucarera (Ingenios Azucareros).....	172
1.2.1. Campo .....	172
1.2.2. Fábrica.....	186
1.2.3. Empresas Agrícolas.....	193
ANEXO 2. MODELACIÓN MATEMATICA DE LOS PROCESOS DE TRANSFORMACION DE BIOENERGÍA .....	195
2.1. Modelación de las distribuciones de probabilidad de las variables de entrada.....	195
2.1.1. Pollinaza para Combustión.....	195
2.1.1.1. Alternativas energéticas para el uso de la pollinaza.....	200
2.1.2. Lodos residuales para Digestión anaeróbica.....	202
2.1.3. Residuos agrícolas de cosecha y bagazo para combustión.....	206
2.2. Modelos matemáticos de las cadenas de valor.....	211
2.2.1. Calculo del poder calorífico de la biomasa .....	211
2.2.2. Pollinaza para combustión.....	215
2.2.2.1. Selección de tecnología energética para utilizar la pollinaza.....	219
2.2.3. Lodos Residuales para digestión anaeróbica.....	223
2.2.4. Bagazo de Caña y RAC para Combustión .....	230
2.2.5. Sustentabilidad ambiental con reducción de emisiones de CO2 .....	237

---



---

2.2.6.	Logística de recolección de Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) de caña de azúcar.	238
ANEXO 3. CADENAS DE VALOR AGROINDUSTRIAL.....		243
3.1.	Cadena de valor avícola utilizando pollinaza.....	243
3.1.1.	Análisis del sistema de producción de pollinaza.....	244
3.1.2.	Control de variables para mejorar la calidad de la pollinaza.....	248
3.1.2.1.	Aplicación de una red neuronal artificial para el control de la humedad en la pollinaza. . .....	248
3.1.2.2.	Aplicación de un modelo de lógica difusa para el control de la humedad de la pollinaza. .....	260
3.1.2.3.	Comparación del desempeño de la red neuronal artificial y el modelo de lógica difusa. . .....	266
3.1.3.	Producción de pollinaza considerando inhibidor de rendimiento energético (Contenido de humedad).....	270
3.1.4.	Balance de materia y energía utilizando combustión.....	272
3.1.5.	Producción de energía térmica (vapor) y eléctrica.....	281
3.1.6.	Análisis de riesgo para estimar la rentabilidad económica del uso de pollinaza.....	287
3.1.6.1.	Alternativas tecnológicas para la pollinaza.....	298
3.1.7.	Sustentabilidad ambiental con reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> .....	300
3.2.	Cadena de valor avícola utilizando lodos residuales.....	301
3.2.1.	Análisis del sistema de producción de lodos residuales.....	302
3.2.2.	Control de variables para mejorar la calidad de lodos residuales.....	312
3.2.3.	Producción de lodos residuales considerando el inhibidor de rendimiento energético (contenido de humedad, cloro y colorantes).....	322
3.2.4.	Balance de materia y energía utilizando digestión anaeróbica.....	325
3.2.5.	Producción de energía térmica (biogás) y eléctrica.....	335
3.2.6.	Análisis de riesgo para estimar la rentabilidad económica del uso de lodos residuales..	337
3.2.7.	Sustentabilidad ambiental con reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> .....	341

---

3.3.	Cadena de valor cañero-azucarera utilizando residuos agrícolas de cosecha (RAC) y bagazo.	342
3.3.1.	Análisis del sistema de producción de residuos agrícolas de cosecha (RAC) y bagazo .	344
3.3.2.	Control de variables para mejorar la calidad de residuos agrícolas de cosecha y bagazo	356
3.3.3.	Producción de residuos agrícolas de cosecha y bagazo considerando el inhibidor de rendimiento energético (contenido de humedad) .....	365
3.3.4.	Balance de materia y energía utilizando combustión. ....	375
3.3.5.	Producción de energía térmica (vapor) y eléctrica. ....	391
3.3.6.	Análisis de riesgo para estimar la rentabilidad económica del uso de los residuos agrícolas de cosecha y bagazo .....	406
3.3.7.	Sustentabilidad ambiental con reducción de emisiones de CO2 .....	425

## ÍNDICE DE IMÁGENES.

Imagen 1. Crianza de pollitos por zonas y de manera abierta .....	161
Imagen 2. Engorde de pollos .....	162
Imagen 3. Limpieza y desinfección de caseta de producción de pollo .....	163
Imagen 4. Planta procesadora de aves .....	163
Imagen 5. Transporte de pollo de engorde hacia la planta procesadora.....	165
Imagen 6. Andenes de descarga de pollo de engorde.....	165
Imagen 7. Ganchos para colgar pollo de engorde .....	166
Imagen 8. Escaldado de pollo de engorde.....	167
Imagen 9. Desplumado de pollo de engorde .....	167
Imagen 10. Eviscerado de pollo de engorde.....	168
Imagen 11. Selección de vísceras y cortes de piezas de pollo de engorde .....	169
Imagen 12. Enfriamiento y desinfección de pollo procesado en chiller's.....	169
Imagen 13. Corte de piezas de pollo de engorde.....	170
Imagen 14. Nivelación GPS con pendiente variable.....	173
Imagen 15. Subsuelo y rastra mecánica para la preparación del terreno.....	173
Imagen 16. Cosechadora de semilla de caña y sembradora mecánica de semilla de caña.....	174
Imagen 17. Siembra manual de caña (sistema tradicional) .....	174
Imagen 18. Fases de crecimiento de caña de azúcar .....	175
Imagen 19. Cultivo de caña de azúcar.....	175
Imagen 20. Cosechadora de caña de azúcar.....	177
Imagen 21. Sincronización de operaciones agrícolas de cosecha mecanizada de caña .....	177
Imagen 22. Cosecha mecanizada de caña en verde.....	179
Imagen 23. Cosecha mecanizada de caña quemada .....	179
Imagen 24. Cosecha manual de caña quemada .....	180
Imagen 25. Cosecha manual de caña en verde .....	180
Imagen 26. Alce de cosecha de caña quemada a camiones rabones (tortons) y jaulas cañeras .....	182
Imagen 27. Alce de la cosecha de caña quemada a jaulas de alta capacidad .....	182
Imagen 28. Transporte de cosecha mecanizada de caña (Acarreo).....	183
Imagen 29. Descarga de cosecha mecanizada de caña en el ingenio azucarero.....	183
Imagen 30. Residuos de agrícolas de cosecha de caña (RAC) en el campo .....	184
Imagen 31. Operaciones de hilerado y/o alineado .....	184
Imagen 32. Operaciones de enfardado del RAC .....	185

Imagen 33. Jaulas para el acarreo de RAC hacia el ingenio .....	185
Imagen 34. Alce y Acarreo del RAC en Jaulas y/o plataformas .....	186
Imagen 35. Recepción de caña (Batey).....	187
Imagen 36. Extracción de jugo de caña y obtención de bagazo .....	188
Imagen 37. Evaporación de azúcar (Vasos evaporadores).....	189
Imagen 38. Cristalización de Azúcar (Tachos) .....	190
Imagen 39. Centrifugas de Azúcar .....	191
Imagen 40. Calderas de vapor de alta presión.....	192
Imagen 41. Planta eléctrica (Turbogeneradores de vapor para producir energía eléctrica) .....	193
Imagen 42. Preparación de las muestras de pollinaza .....	273
Imagen 43. Calorímetro automático, colocación de la muestra, y display del resultado .....	273
Imagen 44. Planta de Generación con biomasa de Pollinaza .....	280
Imagen 45. Turbogenerador condensante sin extracción para la cadena de valor usando pollinaza .....	281
Imagen 46. Cenizas pulverizadas y sólidas provenientes de la combustión de pollinaza .....	281
Imagen 47. Muestras de la composición de la carga orgánica de los residuos .....	318
Imagen 48. Reactor de digestión ovoide piloto.....	329
Imagen 49. Digestores anaeróbicos ovoides .....	334
Imagen 50. Planta de digestión anaeróbica con reactores ovoides.....	334
Imagen 51. Almacenamiento de biogás para su combustión con moto generador.....	335
Imagen 52. Motogenerador a gas con generador eléctrico.....	335
Imagen 53. Preparación de las muestras de RAC .....	375
Imagen 54. Plantas de Cogeneración con biomasa de caña .....	387
Imagen 55. Turbogenerador condensante con extracción usando bagazo o RAC .....	387

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Esquema de la estructura de la tesis y conexión lógica entre capítulos.....	29
Figura 2. Red de valor Farmacéutica con intercambios tangibles e intangibles. (Alle, 2002). .....	38
Figura 3. Estructura de un sistema experto, basado en inteligencia artificial .....	41
Figura 4. Desarrollo para la resolución de problemas con Redes Neuronales (Gestal, 2009) .....	41
Figura 5. El Método Mamdani .....	42
Figura 6. Metodología de evaluación de 7 etapas para estimar la bioenergía .....	57
Figura 7. Estructura de la cadena de valor avícola, usando pollinaza (parte 1) .....	67
Figura 8. Estructura de la cadena de valor avícola, usando pollinaza (parte 2) .....	68
Figura 9. Estructura de la cadena de valor avícola, usando lodo residual (parte 1) .....	75
Figura 10. Estructura de la cadena de valor avícola, usando lodo residual (parte 2) .....	76
Figura 11. Estructura de la cadena de valor cañero – azucarera, usando RAC y Bagazo (parte 1) ..	82
Figura 12. Estructura de la cadena de valor cañero – azucarera, usando RAC y Bagazo (parte 2) ..	83
Figura 13. Representación de la CV Pollinaza.....	96
Figura 14. Representación de la CV Lodos Residuales .....	97
Figura 15. Representación de la cadenas de valor (CV) avícolas. ....	99
Figura 16. Representación de la CV usando RAC y bagazo en el Ingenio 1 .....	100
Figura 17. Representación de la CV usando RAC y bagazo en el Ingenio 2 .....	102
Figura 18. Representación de la CV usando RAC y bagazo en el Ingenio 3 .....	103
Figura 19. Representación de las cadenas de valor (CV) agrícolas. ....	105
Figura 20. Representación de la Red de Valor.....	106
Figura 21. Gráfico de tornado para la TIR optimizada en la cadena de valor con pollinaza (prueba 1, económico).....	109
Figura 22. Gráfico de tornado para la TIR optimizada en la cadena de valor con pollinaza (prueba 2, económico).....	110
Figura 23. Gráfico de tornado para la energía generada en 2021 en la cadena de valor con pollinaza (energía). ....	112
Figura 24. Gráfico de tornado para la energía generada en la cadena de valor con pollinaza (energía). ....	113
Figura 25. Comportamiento de la TIR optimizada en la cadena de valor usando lodos residuales	116
Figura 26. Comportamiento de los percentiles de la TIR optimizada en la cadena de valor usando lodos residuales .....	117
Figura 27. Comportamiento del sistema en UEN Ingenio 1. ....	123

---

Figura 28. Comportamiento del sistema en UEN Ingenio 2. ....	123
Figura 29. Comportamiento del sistema en UEN Ingenio 3. ....	124
Figura 30. Indicadores financieros de la Red de Valor total. ....	133
Figura 31. Ciclo de producción de pollo de engorde .....	158
Figura 32. Proceso de producción de pollo de engorde .....	159
Figura 33. Etapas del procesamiento de pollo de engorde .....	164
Figura 34. Diagrama de los residuos en la planta procesadora de aves (PPA) .....	171
Figura 35. Proceso de elaboración de azúcar de caña .....	186
Figura 36. Tipo de cambio de dólar americano a pesos mexicanos .....	198
Figura 37. Precios y costos de energía eléctrica a industrias .....	199
Figura 38. Evolución del precio y costo de la energía eléctrica .....	199
Figura 39. Cadena de valor avícola .....	243
Figura 40. Sistema en el eslabón de producción de la cadena de valor avícola .....	244
Figura 41. Análisis del sistema avícola .....	245
Figura 42. Arquitectura de la neurona artificial .....	250
Figura 43. Arquitectura de la red neuronal artificial .....	250
Figura 44. Entrenamiento de la red neuronal artificial con 108 muestras. ....	252
Figura 45. Correlación de la validación de la red neuronal artificial con 86 casos. ....	253
Figura 46. Correlación de la prueba de la red neuronal artificial con 20 casos. ....	253
Figura 47. Variables de impacto relativos al contenido de humedad. ....	257
Figura 48. Validación de la predicción de la red neuronal con 86 casos .....	257
Figura 49. Validación de la prueba de la predicción de la red neuronal con 20 casos. ....	258
Figura 50. Estructura del modelo de lógica difusa .....	261
Figura 51. Representación gráfica de las funciones de pertenencia del modelo de lógica difusa... ..	263
Figura 52. Contenido de humedad de 108 muestras, en el modelo de lógica difusa .....	264
Figura 53. Correlación de la validación del modelo de lógica difusa con 25 casos. ....	265
Figura 54. Correlación de la prueba del modelo de lógica difusa con 20 casos .....	265
Figura 55. Correlación de la prueba de la red neuronal artificial con 20 casos nuevos .....	267
Figura 56. La evaluación del desempeño de los sistemas de predicción RNA y LD. ....	268
Figura 57. Comparación del coeficiente de correlación de la RNA y LD para predecir el contenido de humedad. ....	269
Figura 58. Tasa interna de retorno de 4 escenarios de humedad a 10 años (con mejoras) .....	295
Figura 59. Tasa interna de retorno a 10 años (con mejoras) .....	296
Figura 60. Tasa interna de retorno de 4 escenarios de humedad a 10 años (sin mejoras) .....	296

---

---

Figura 61. Tasa interna de retorno a 10 años (sin mejoras) .....	297
Figura 62. Rentabilidad de los 7 escenarios utilizando pollinaza. ....	299
Figura 63. Sistema en el eslabón de procesamiento de la cadena de valor avícola.....	302
Figura 64. Criterio de estabilidad % remoción STV en el proceso semicontinuo .....	330
Figura 65. Cadena de valor cañera-azucarera .....	342
Figura 66. Residuos agrícolas de cosecha de caña.....	343
Figura 67. Residuos agroindustriales del procesamiento de caña.....	343
Figura 68. Crecimiento de toneladas de azúcar.....	344
Figura 69. Días de lluvia en Huixtla .....	345
Figura 70. Días de lluvia en San Pedro .....	345
Figura 71. Días de lluvia en Santa Clara.....	346
Figura 72. Tiempos perdidos en operación de recolección .....	356
Figura 73. Rendimiento de la Hileradora.....	357
Figura 74. Diámetro del fardo con mayor capacidad de acarreo.....	358
Figura 75. Rendimiento de la enfardadora .....	359
Figura 76. Rendimiento de alzadora .....	362
Figura 77. Capacidad de Recolección de RAC en 1 y 2 turnos .....	364
Figura 78. Capacidad de Recolección de RAC en 2 Turnos .....	364
Figura 79. Consumo de vapor del turbogenerador condensante con diferentes niveles de extracción. .....	390

---

**ÍNDICE DE TABLAS.**

Tabla 1. Definición de los vínculos de valor.....	94
Tabla 2. Resumen de biomasa, bioenergía e ingresos de la pollinaza.....	96
Tabla 3. Resumen de biomasa, bioenergía e ingresos de los lodos residuales .....	98
Tabla 4. Resumen de biomasa, bioenergía e ingresos de los RAC y Bagazo en Santa Clara .....	101
Tabla 5. Resumen de biomasa, bioenergía e ingresos de los RAC y Bagazo en San Pedro .....	102
Tabla 6. Resumen de biomasa, bioenergía e ingresos de los RAC y Bagazo en Huixtla.....	104
Tabla 7. Resumen de biomasa, bioenergía e ingresos de la Red de valor.....	107
Tabla 8. Coeficientes negativos de correlación en la cadena de valor con pollinaza (económico).	111
Tabla 9. Coeficientes positivos de correlación en la cadena de valor con pollinaza (económico)..	111
Tabla 10. Coeficientes de correlación en la cadena de valor con pollinaza (energía).....	113
Tabla 11. Nomenclatura para el modelo matemático cadena de valor usando lodos residuales .....	114
Tabla 12. Resultados de la optimización de la Cadena de valor usando lodos residuales .....	116
Tabla 13. Estadísticos de la optimización en la Cadena de valor usando lodos residuales.....	117
Tabla 14. Costos del paquete tecnológico y capacidades de operación de la cadena de valor con RAC .....	118
Tabla 15. Resultados de la optimización para la cadena de valor con RAC .....	121
Tabla 16. Costos resultantes por la adquisición de 1 paquete tecnológico en la cadena de valor con RAC .....	122
Tabla 17. Adquisición de paquetes tecnológicos y capacidades utilizadas.....	122
Tabla 18. Resultados de la optimización en la cadena de valor de RAC .....	124
Tabla 19. Definición de escenarios para la Red de Valor .....	125
Tabla 20. Resultados del escenario base de la Red de Valor .....	125
Tabla 21. Resultados del escenario 1 en la red.....	126
Tabla 22. Resultados del escenario 2 en la red.....	127
Tabla 23. Resultados del escenario 3 en la red.....	128
Tabla 24. Resultados del escenario 4 en la red.....	130
Tabla 25. Resultados del escenario 5 en la red.....	131
Tabla 26. Resultados del escenario 6 en la red.....	132
Tabla 27. Resultados del escenario 7 en la red.....	133
Tabla 28. Comparación entre cosecha de caña Manual vs. Mecanizada. (Galvis, 2010).....	180
Tabla 29. Producción de pollinaza y pollo de engorde .....	195
Tabla 30. Poder calorífico y contenido de humedad de la pollinaza.....	196



---

Tabla 31. Producción de vapor en calderas y consumo de vapor del turbogenerador .....	196
Tabla 32. Eficiencia en los equipos de generación .....	197
Tabla 33. Precios y costos derivados de la combustión de pollinaza.....	197
Tabla 34. Producción de pollinaza por tipo.....	200
Tabla 35. Precio de la pollinaza por tipo.....	200
Tabla 36. Gastos de operación de pollinaza.....	201
Tabla 37. Rendimiento energético de Biogás.....	201
Tabla 38. Incertidumbre de la cantidad y tipo de proceso de pollo de engorde .....	202
Tabla 39. Mermas de pollo de engorde .....	202
Tabla 40. Velocidad de ganchos vacíos .....	203
Tabla 41. Rendimiento de energético de lodos residuales .....	204
Tabla 42. Poder calorífico del biogás.....	204
Tabla 43. Precios de recursos utilizados y producidos en la planta procesadora .....	205
Tabla 44. Peso del fardo del RAC y disponibilidad.....	206
Tabla 45. Porciento de residuos agrícolas de cosecha en campo .....	206
Tabla 46. Porciento de eficiencia de los equipos de generación y humedad en la biomasa.....	207
Tabla 47. Producción de toneladas de caña más probable .....	207
Tabla 48. Días de operación de cogeneración en zafra y no zafra .....	208
Tabla 49. Utilización de biomasa en zafra .....	208
Tabla 50. Consumo de biomasa en calderas para producción de vapor.....	209
Tabla 51. Índices de rendimiento de producción y consumo de vapor .....	209
Tabla 52. Autoconsumo y excedentes eléctricos en zafra y no zafra.....	210
Tabla 53. Precios y costos de los recursos relacionados con la cogeneración. ....	210
Tabla 54. Declaración de variables de las ecuaciones de poder calorífico de biomasa .....	214
Tabla 55. Declaración de variables de las ecuaciones de pollinaza .....	217
Tabla 56. Declaración de variables de las ecuaciones de pollinaza .....	222
Tabla 57. Nomenclatura para Modelos matemáticos de Lodos residuales .....	228
Tabla 58. Nomenclatura para Modelos matemáticos de combustión de RAC y Bagazo.....	236
Tabla 59. Nomenclatura para Modelos matemáticos de sistema logístico de recolección de RAC	241
Tabla 60. Registros del análisis del sistema.....	247
Tabla 61. Variables de entrada seleccionadas para la red neural artificial.....	248
Tabla 62. Pesos sinápticos de la capa oculta 1 .....	254
Tabla 63. Pesos sinápticos de la capa oculta 2 .....	254
Tabla 64. Bias de la capa oculta 1 .....	255

---

---

Tabla 65. BIAS de la capa oculta 2.....	255
Tabla 66. Predicciones de la prueba de la red neuronal artificial con 20 casos nuevos.....	258
Tabla 67. Parámetros de control para el contenido de humedad.....	259
Tabla 68. Predicciones de la prueba de Lógica Difusa con 20 casos nuevos.....	266
Tabla 69. Producción de pollos de engorde .....	270
Tabla 70. Crecimiento en la producción de pollinaza .....	271
Tabla 71. Tiempos de operación de la planta de generación eléctrica con pollinaza.....	272
Tabla 72. Pollinaza disponible. ....	272
Tabla 73. Resultados de análisis elemental y próximo del primer bloque de 4 muestras. ....	274
Tabla 74. Muestras de poder calorífico en la pollinaza seca.....	274
Tabla 75. Resultados de análisis de composición elemental del segundo bloque de 8 muestras. ...	275
Tabla 76. Composición elemental de la pollinaza base seca.....	276
Tabla 77. Comportamiento del poder calorífico de la pollinaza .....	277
Tabla 78. Diseño de la caldera de alta presión para combustión de pollinaza .....	277
Tabla 79. Balance de materia y energía usando pollinaza como combustible .....	278
Tabla 80. Demanda de biomasa para determinar el flujo de vapor.....	278
Tabla 81. Demanda de vapor para determinar la energía eléctrica a producir .....	279
Tabla 82. Índices de generación de energía en año 7 a plena capacidad.....	280
Tabla 83. Generación de energía eléctrica al día con pollinaza del 40% de humedad.....	282
Tabla 84. Producción anual de energía eléctrica con pollinaza.....	282
Tabla 85. Producción de Cenizas provenientes de la combustión de la pollinaza .....	283
Tabla 86. Índices de generación de energía en año 7 a plena capacidad.....	284
Tabla 87. Índices de rendimiento energético de la pollinaza del 40% de humedad.....	284
Tabla 88. Producción de pollo de engorda por año.....	285
Tabla 89. Producción de productos derivados de la combustión. ....	285
Tabla 90. Flujo de producción de bioenergía .....	286
Tabla 91. Precios y costos relacionados con la combustión de la pollinaza .....	287
Tabla 92. Comportamiento del precio de venta de la pollinaza .....	287
Tabla 93. Ingresos por bioenergía y biofertilizante.....	288
Tabla 94. Costos de generación eléctrica .....	288
Tabla 95. Beneficios económicos por la generación eléctrica con la pollinaza .....	289
Tabla 96. Ingresos, costos y utilidad por tonelada de pollinaza utilizada .....	289
Tabla 97. Inversión inicial para para combustionar la pollinaza (sin mejoras).....	290
Tabla 98. Aportación de capital por los socios para generación eléctrica con pollinaza .....	290

---

---

Tabla 99. Flujo de efectivo de combustión de pollinaza al 40% (Sin Mejoras).....	291
Tabla 100. Indicadores Financieros de pollinaza del 40% (Sin Mejoras).....	291
Tabla 101. Ingresos y egresos de generación con pollinaza en el año 7 a plena capacidad.....	292
Tabla 102. Índices financieros (con mejoras en las granjas) en el año 7 a plena capacidad.....	293
Tabla 103. Índices financieros (Solo generación, Sin Mejoras en Granjas) .....	294
Tabla 104. Resultados financieros de los 7 escenarios .....	298
Tabla 105. Reducción de gases efecto invernadero GEI.....	300
Tabla 106. Asignación de probabilidad al rango de producción.....	303
Tabla 107. Asignación del número de procesos a realizar por réplica de simulación.....	303
Tabla 108. Asignación porcentual y tipo de pollo a procesar .....	304
Tabla 109. Cantidad de pollos a procesar y numero de procesos a efectuar .....	305
Tabla 110. Procesamiento de aves por tipo de pollo por día.....	305
Tabla 111. Mermas por tipo de pollo .....	306
Tabla 112. Pollos procesados .....	307
Tabla 113. Tiempos de operación para el procesamiento de pollo .....	308
Tabla 114. Tiempos de operación del área de 1 “recepción y matanza” (horas) .....	308
Tabla 115. Tiempos de operación del área 2 "eviscerado" (horas) .....	309
Tabla 116. Tiempos de operación del área 3 "empaque" – A (horas).....	310
Tabla 117. Tiempos de operación del área 3 "empaque" – B (horas) .....	310
Tabla 118. Proporción del pollo en 6 elementos .....	311
Tabla 119. Consumo de agua por pollo procesado .....	313
Tabla 120. Litros de agua utilizados para el procesamiento de aves.....	313
Tabla 121. Litros de agua por tipo de pollo procesado .....	314
Tabla 122. Consumo de agua por proceso y por hora.....	315
Tabla 123. Consumo de agua por área de procesamiento.....	316
Tabla 124. Residuos líquidos y sólidos resultantes del procesado de pollo.....	318
Tabla 125. Residuos sólidos retenidos del proceso.....	320
Tabla 126. Residuos líquidos del procesado de pollo enviados a la PTAR .....	320
Tabla 127. Residuo inhibidor de rendimiento energético.....	323
Tabla 128. Generación de residuos y efluentes por pollo procesado .....	324
Tabla 129. Caracterización del lodo residual fisicoquímico.....	327
Tabla 130. Cromatografía de gases del biogás obtenido de la digestión de lodo fisicoquímico.....	328
Tabla 131. Balance de materia y energía en el proceso de digestión anaeróbica.....	331
Tabla 132. Poder calorífico de 1 m <sup>3</sup> de biogás.....	332

---

---

Tabla 133. Producción de biogás y biosólidos por día.....	336
Tabla 134. Producción de bioenergía al año proveniente del tratamiento de lodos residuales .....	336
Tabla 135. Producción anual de biogás y biofertilizante proveniente de lodos residuales .....	337
Tabla 136. Producción anual de energía eléctrica utilizando biogás de la digestión de lodos residuales. ....	338
Tabla 137. Producción anual de biosólidos resultantes de la digestión de lodos residuales. ....	338
Tabla 138. Beneficios económicos derivados de la utilización energética utilizando lodos residuales. .....	339
Tabla 139. Desglose de la inversión de la planta de digestión anaeróbica.....	339
Tabla 140. Flujo de efectivo de la inversión la digestión anaeróbica de lodos residuales. ....	340
Tabla 141. Indicadores financieros del rendimiento energético de los lodos residuales.....	341
Tabla 142. Rendimiento por tipo de cosecha de caña del Ingenio de Huixtla .....	347
Tabla 143. Hectáreas disponibles en la cadena de valor en el ingenio de Huixtla por tipo de cosecha .....	348
Tabla 144. Producción de caña por tipo de cosecha en Huixtla.....	348
Tabla 145. Producción de RAC incluyendo lluvia en Huixtla .....	349
Tabla 146. Rendimiento por tipo de cosecha de caña del Ingenio San Pedro.....	350
Tabla 147. Hectáreas disponibles en la cadena de valor en el ingenio San Pedro por tipo de cosecha .....	351
Tabla 148. Producción de caña por tipo de cosecha en San Pedro.....	351
Tabla 149. Producción de RAC incluyendo lluvia en San Pedro.....	352
Tabla 150. Rendimiento por tipo de cosecha de caña del Ingenio Santa Clara.....	353
Tabla 151. Hectáreas disponibles en la cadena de valor en el ingenio Santa Clara por tipo de cosecha.....	354
Tabla 152. Producción de caña por tipo de cosecha en Santa Clara .....	354
Tabla 153. Producción de RAC incluyendo lluvia en Santa Clara.....	355
Tabla 154. Tiempos de operación del hilerado y enfardado .....	356
Tabla 155. Capacidad instalada de operación del hilerador .....	357
Tabla 156. Rendimiento por tamaño de fardo de RAC .....	357
Tabla 157. Capacidad instalada de operación del enfardador .....	358
Tabla 158. Sincronización de operaciones con dos tractores para hilerar y enfardar .....	360
Tabla 159. Rendimiento de operaciones de enfardado por día de RAC .....	360
Tabla 160. Velocidades de la Alzadora.....	361
Tabla 161. Capacidad instalada del transporte y acarreo .....	362

---

---

Tabla 162. Capacidad instalada de recolección de RAC a dos turnos .....	363
Tabla 163. Capacidad instalada de operación en Zafra en Huixtla .....	366
Tabla 164. Disponibilidad de RAC para Huixtla en el año 4 (el más probable) .....	366
Tabla 165. Programa de caña de azúcar en la cadena de valor de ingenio de Huixtla .....	367
Tabla 166. Biomasa disponible en la cadena de valor de Ingenio de Huixtla .....	368
Tabla 167. Capacidad instalada de operación en Zafra en San Pedro .....	369
Tabla 168. Disponibilidad de RAC para San Pedro en el año 4 (el más probable) .....	369
Tabla 169. Programa de caña de azúcar en la cadena de valor de ingenio San Pedro .....	370
Tabla 170. Biomasa disponible en la cadena de valor de Ingenio San Pedro .....	371
Tabla 171. Capacidad instalada de operación en Zafra en Santa Clara .....	372
Tabla 172. Disponibilidad de RAC para Santa Clara en el año 4 (el más probable) .....	372
Tabla 173. Programa de caña de azúcar en la cadena de valor de ingenio Santa Clara .....	373
Tabla 174. Biomasa disponible en la cadena de valor de Ingenio Santa Clara .....	374
Tabla 175. Resultados de análisis elemental y próximo del residuo agrícola de cosecha (RAC) .....	375
Tabla 176. Muestras de poder calorífico en la RAC base seca .....	376
Tabla 177. Composición elemental del RAC base seca .....	377
Tabla 178. Composición elemental del Bagazo base seca .....	377
Tabla 179. Comportamiento del poder calorífico de la RAC y Bagazo .....	378
Tabla 180. Diseño de la caldera de alta presión para combustión del Bagazo .....	378
Tabla 181. Balance de materia y energía usando Bagazo y RAC como combustible .....	379
Tabla 182. Demanda de biomasa para determinar el flujo de vapor y diseño de caldera por cadena de valor. ....	380
Tabla 183. Consumo de vapor para el diseño del turbogenerador por cadena de valor. ....	381
Tabla 184. Balance de materia y energía en la cadena de valor Huixtla. ....	382
Tabla 185. Balance de materia y energía en la cadena de valor San Pedro .....	383
Tabla 186. Balance de materia y energía en la cadena de valor Santa Clara. ....	384
Tabla 187. Producción de vapor con RAC y Bagazo en Huixtla .....	392
Tabla 188. Producción de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en Huixtla .....	393
Tabla 189. Autoconsumo de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en Huixtla .....	394
Tabla 190. Excedentes de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en Huixtla .....	395
Tabla 191. Generación eléctrica para Huixtla en el año 4 (el más probable) .....	396
Tabla 192. Producción de cenizas en Huixtla .....	396
Tabla 193. Producción de vapor con RAC y Bagazo en San Pedro .....	397
Tabla 194. Producción de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en San Pedro .....	398

---

---

Tabla 195. Autoconsumo de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en San Pedro .....	399
Tabla 196. Excedentes de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en San Pedro .....	399
Tabla 197. Generación eléctrica para San Pedro en el año 3 (el más probable) .....	400
Tabla 198. Producción de cenizas en San Pedro .....	401
Tabla 199. Producción de vapor con RAC y Bagazo en Santa Clara.....	401
Tabla 200. Producción de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en Santa Clara .....	402
Tabla 201. Autoconsumo de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en Santa Clara.....	403
Tabla 202. Excedentes de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en Santa Clara .....	403
Tabla 203. Generación eléctrica para Santa Clara en el año 4 (el más probable) .....	404
Tabla 204. Producción de cenizas en Santa Clara.....	405
Tabla 205. Precios unitarios de energía, Cenizas y biomasa de RAC y Bagazo para las tres cadenas de valor .....	406
Tabla 206. Venta de energía Excedente en Huixtla .....	407
Tabla 207. Venta de Cenizas en Huixtla .....	408
Tabla 208. Costos de Energía Excedente en Huixtla .....	408
Tabla 209. Costos de Biomasa en Huixtla .....	409
Tabla 210. Costo de inversión del sistema de cogeneración en Huixtla .....	410
Tabla 211. Inversión solo del sistema de cogeneración en Huixtla .....	410
Tabla 212. Indicadores financieros del sistema de cogeneración en Huixtla.....	411
Tabla 213. Inversión del sistema de cogeneración y del sistema logístico de recolección en Huixtla .....	412
Tabla 214. Indicadores financieros del sistema de cogeneración y del sistema logístico de recolección en Huixtla .....	413
Tabla 215. Venta de energía Excedente en San Pedro .....	413
Tabla 216. Venta de Cenizas en San Pedro.....	414
Tabla 217. Costos de Energía Excedente en San Pedro .....	415
Tabla 218. Costos de Biomasa en San Pedro .....	415
Tabla 219. Costo de inversión del sistema de cogeneración en San Pedro .....	416
Tabla 220. Inversión solo del sistema de cogeneración en San Pedro .....	417
Tabla 221. Indicadores financieros del sistema de cogeneración en San Pedro .....	417
Tabla 222. Inversión del sistema de cogeneración y del sistema logístico de recolección en San Pedro.....	418
Tabla 223. Indicadores financieros del sistema de cogeneración y del sistema logístico de recolección en San Pedro.....	419

---

---

Tabla 224. Venta de energía Excedente en Santa Clara.....	419
Tabla 225. Venta de Cenizas en Santa Clara.....	420
Tabla 226. Costos de Energía Excedente en Santa Clara.....	420
Tabla 227. Costos de Biomasa en Santa Clara.....	421
Tabla 228. Costo de inversión del sistema de cogeneración en Santa Clara.....	422
Tabla 229. Inversión solo del sistema de cogeneración en Santa Clara.....	422
Tabla 230. Indicadores financieros del sistema de cogeneración en Santa Clara .....	423
Tabla 231. Inversión del sistema de cogeneración y del sistema logístico de recolección en Santa Clara.....	423
Tabla 232. Indicadores financieros del sistema de cogeneración y del sistema logístico de recolección en Santa Clara.....	424
Tabla 233. Reducción de gases efecto invernadero GEI.....	425

---

**ÍNDICE DE ECUACIONES.**

Ecuación 1. Valor presente neto para evaluar flujo de efectivo de proyectos de inversión .....	45
Ecuación 2. Tasa interna de retorno para la rentabilidad de los proyectos de inversión.....	45
Ecuación 3. Tasa interna de retorno .....	108
Ecuación 4. Producción de energía eléctrica (MWh).....	108
Ecuación 5. Capacidad de Generación Eléctrica.....	108
Ecuación 6. Demanda de Pollinaza .....	109
Ecuación 7. Demanda de Pollinaza para generación.....	109
Ecuación 8. Rendimiento de vapor por pollinaza.....	109
Ecuación 9. Rendimiento de vapor por kilowatt-hora.....	109
Ecuación 10. Tasa interna de retorno de lodos residuales.....	115
Ecuación 11. Tasa interna de retorno de RAC .....	119
Ecuación 12. Calor latente de vaporización de Regnault.....	212
Ecuación 13. Calor latente de vaporización de Regnault a 10 °C.....	212
Ecuación 14. Coeficiente de calor latente de vaporización a 10 °C.....	212
Ecuación 15. Peso del hidrogeno durante la reacción de combustión.....	212
Ecuación 16. Poder calorífico inferior de la biomasa (kcal/kg) .....	213
Ecuación 17. Poder Calorífico inferior (kcal/kg) de la biomasa con diferente porcentaje (%) de humedad .....	213
Ecuación 18. Salto de entalpía entre el vapor y el agua de alimentación considerando presión y temperatura .....	214
Ecuación 19. Producción de toneladas de pollinaza al año .....	215
Ecuación 20. Capacidad de combustión de toneladas de pollinaza al año.....	215
Ecuación 21. Horas efectivas de operación al año .....	215
Ecuación 22. Combustión de pollinaza por hora.....	215
Ecuación 23. Energía por hora, contenida en la pollinaza (kcal) .....	216
Ecuación 24. Generación de toneladas de vapor por hora, en la caldera .....	216
Ecuación 25. Rendimiento de producción de toneladas de vapor por tonelada de pollinaza.....	216
Ecuación 26. Consumo de toneladas de vapor en el turbogenerador por cada MW producido en una hora.....	216
Ecuación 27. Generación de energía eléctrica en el turbogenerador, expresados en MW por hora	217
Ecuación 28. Venta de Excedentes de energía eléctrica en el turbogenerador, expresados en MW por hora.....	217



---

Ecuación 29. Capacidad instalada de la caldera para pollinaza .....	217
Ecuación 30. Capacidad instalada del turbogenerador del sistema de pollinaza.....	217
Ecuación 31. Escenario 1, situación actual (venta de pollinaza).....	219
Ecuación 32. Escenario 2, combustión pollinaza seca y venta.....	219
Ecuación 33. Escenario 3, mejora de pollinaza seca para combustión y venta.....	220
Ecuación 34. Escenario 4, co-digestión de pollinaza húmeda con lodos residuales y venta.....	220
Ecuación 35. Escenario 5, solo digestión de pollinaza húmeda y venta .....	220
Ecuación 36. Escenario 6, mejora de pollinaza seca para combustión, co-digestión y venta .....	221
Ecuación 37. Escenario 7, mejora de pollinaza seca para combustión, solo digestión y venta.....	221
Ecuación 38. Producción de pollo procesado en planta procesadora de aves (Lodos residuales)...	223
Ecuación 39. Capacidad de producción diaria en planta procesadora de aves (Lodos residuales) .	223
Ecuación 40. Producción anual de aves en planta procesadora de aves (Lodos residuales) .....	223
Ecuación 41. Consumo de agua por ave en planta procesadora de aves (Lodos residuales) .....	223
Ecuación 42. Consumo de Agua por etapa en planta procesadora de aves (Lodos residuales) .....	224
Ecuación 43. Merms por área 1 y etapa 1 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	224
Ecuación 44. Merms por área 1 y etapa 2 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	224
Ecuación 45. Merms por área 1 y etapa 3 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	224
Ecuación 46. Merms por área 1 y etapa 4 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	224
Ecuación 47. Merms por área 2 y etapa 1 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	224
Ecuación 48. Merms por área 2 y etapa 2 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	224
Ecuación 49. Merms por área 2 y etapa 3 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	224
Ecuación 50. Merms por área 2 y etapa 4 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	225
Ecuación 51. Merms por área 2 y etapa 5 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	225
Ecuación 52. Merms por área 2 y etapa 6 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	225

---

---

Ecuación 53. Merms por área 2 y etapa 7 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	225
Ecuación 54. Merms por área 2 y etapa 8 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	225
Ecuación 55. Merms por área 2 y etapa 9 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	225
Ecuación 56. Merms por área 3 y etapa 1 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	225
Ecuación 57. Merms por área 3 y etapa 2 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	225
Ecuación 58. Merms por área 3 y etapa 3 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	225
Ecuación 59. Merms por área 3 y etapa 4 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	225
Ecuación 60. Merms por área 3 y etapa 5 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales).....	226
Ecuación 61. Suma de Merms totales en planta procesadora de aves (lodos residuales).....	226
Ecuación 62. Producción de Efluentes en planta procesadora de aves (lodos residuales) .....	226
Ecuación 63. Lodos residuales totales en planta procesadora de aves .....	226
Ecuación 64. Lodos residuales para bioenergía en planta procesadora de aves.....	226
Ecuación 65. Volumen de solidos totales en lodos residuales en Kg.....	226
Ecuación 66. Volumen de solidos totales volátiles en kg .....	227
Ecuación 67. Volumen de solidos volátiles removidos en kg.....	227
Ecuación 68. Rendimiento de biogás al día en planta procesadora de aves (lodos residuales).....	227
Ecuación 69. Rendimiento de biogás de lodos residuales para bioenergía al día en planta procesadora de aves .....	227
Ecuación 70. Energía producida en Biogás al día en planta procesadora de aves (lodos residuales) .....	227
Ecuación 71. Rendimiento económico de bioenergía en planta procesadora de aves (lodos residuales).....	227
Ecuación 72. Rendimiento económico de bioenergía por año en planta procesadora de aves (lodos residuales).....	228
Ecuación 73. Rendimiento económico de biofertilizante por año en planta procesadora de aves (lodos residuales).....	228

---

---

Ecuación 74. Ingreso de Bioenergéticos a "n" periodos en planta procesadora de aves (lodos residuales).....	228
Ecuación 75. Producción de toneladas de RAC por zafra para cada cadena de valor.....	230
Ecuación 76. Producción de toneladas de Bagazo por zafra .....	230
Ecuación 77. Capacidad de combustión de toneladas de Biomasa por zafra (RAC y Bagazo) .....	230
Ecuación 78. Horas efectivas de operación por zafra para cada cadena de valor .....	230
Ecuación 79. Combustión de Bagazo por hora, por cadena de valor .....	230
Ecuación 80. Combustión de RAC por hora, por cadena de valor.....	231
Ecuación 81. Energía por hora, contenida en el RAC (kcal) con % de humedad .....	231
Ecuación 82. Energía por hora, contenida en el Bagazo (kcal) con % de humedad .....	231
Ecuación 83. Generación de toneladas de vapor por hora utilizando Bagazo en la caldera .....	231
Ecuación 84. Generación de toneladas de vapor por hora utilizando RAC en la caldera .....	231
Ecuación 85. Rendimiento de producción de toneladas de vapor por tonelada de Bagazo .....	231
Ecuación 86. Rendimiento de producción de toneladas de vapor por tonelada de RAC .....	232
Ecuación 87. Consumo de toneladas de vapor por cada MWh con bagazo en zafra .....	232
Ecuación 88. Consumo de toneladas de vapor por cada MWh con RAC en no zafra .....	232
Ecuación 89. Generación de energía eléctrica en MW por hora con bagazo .....	233
Ecuación 90. Generación de energía eléctrica en MW por hora con RAC .....	233
Ecuación 91. Venta de Excedentes de energía eléctrica en MW por hora con Bagazo .....	233
Ecuación 92. Venta de Excedentes de energía eléctrica en MW por hora con RAC .....	233
Ecuación 93. Capacidad instalada de la caldera para bagazo.....	234
Ecuación 94. Capacidad instalada del turbogenerador del sistema utilizando bagazo.....	234
Ecuación 95. Índice de conversión de bagazo al 50% de humedad a vapor .....	234
Ecuación 96. Índice de Conversión de residuo agrícola de cosecha a bagazo .....	234
Ecuación 97. Índice de conversión de vapor con bagazo a energía eléctrica.....	235
Ecuación 98. Índice de conversión de vapor con RAC a energía eléctrica.....	235
Ecuación 99. Índice de Conversión de kWh a residuo agrícola de cosecha.....	235
Ecuación 100. Producción de bioenergía a partir de residuo agrícola de cosecha .....	235
Ecuación 101. Rendimiento económico de bioenergía del residuo agrícola de cosecha .....	235
Ecuación 102. Ingreso de bioenergía a "n" periodos con residuos agrícolas de cosecha.....	235
Ecuación 103. Factor de emisión de gases efecto invernadero (GEI) de electricidad de todas las plantas en México.....	237
Ecuación 104. Toneladas de dióxido de carbono equivalente mitigado (GEI). .....	237
Ecuación 105. Tiempo de hilerado en residuo agrícola de cosecha .....	238

---

---

Ecuación 106. Capacidad de trabajo en hileradora en residuo agrícola de cosecha.....	238
Ecuación 107. Tiempo efectivo de trabajo de hileradora.....	238
Ecuación 108. Capacidad de trabajo por hectárea por turno efectivo de hileradora en residuo agrícola de cosecha.....	238
Ecuación 109. Tiempo de enfardado en residuo agrícola de cosecha.....	239
Ecuación 110. Capacidad de trabajo de enfardado en residuo agrícola de cosecha.....	239
Ecuación 111. Tiempo efectivo de trabajo en enfardado en residuo agrícola de cosecha.....	239
Ecuación 112. Capacidad de trabajo por hectárea por turno efectivo en enfardadora en residuo agrícola de cosecha.....	239
Ecuación 113. Tiempo de alzado en residuo agrícola de cosecha.....	240
Ecuación 114. Capacidad de Alzado en residuo agrícola de cosecha.....	240
Ecuación 115. Tiempo efectivo de trabajo de alzado en residuo agrícola de cosecha.....	240
Ecuación 116. Capacidad de trabajo en hectáreas por turno efectivo de alzado en residuo agrícola de cosecha.....	240
Ecuación 117. Programación de operación logística en residuo agrícola de cosecha.....	240
Ecuación 118. Días perdidos por lluvia en residuo agrícola de cosecha.....	241
Ecuación 119. Días efectivos del ciclo de zafra en residuo agrícola de cosecha.....	241
Ecuación 120. Producción de RAC por zafra en residuo agrícola de cosecha.....	241
Ecuación 121. Función matemática de la neurona artificial.....	251
Ecuación 122. Función Sigmoides.....	251
Ecuación 123. Algoritmo de Garson.....	256

## RESUMEN

Los cambios tecnológicos en las empresas de grandes corporaciones, inducen nuevas formas de hacer negocio adoptando nuevos mecanismos de colaboración para intercambiar valores tangibles e intangibles para elevar su competitividad a través de la incorporación de tecnologías o innovaciones que les permitan reducir sus costos de producción para permanecer en el mercado.

Grupos corporativos formados por empresas avícolas e ingenios azucareros crean productos específicos que van adquiriendo valor agregado en sus procesos industriales de transformación o eslabones de una cadena de valor, generando biomasa en forma de residuos biodegradables no aprovechables que constituyen un problema o un costo de oportunidad.

En la industria avícola se producen dos tipos de residuos: 1) la pollinaza se produce en las granjas al final del ciclo de producción del pollo de engorde, y 2) los lodos residuales son obtenidos del tratamiento físico-químico de los efluentes provenientes del procesamiento de pollos de engorde. En la industria azucarera también generan dos tipos de residuos de biomasa: 1) el bagazo que es obtenido durante la extracción del jugo de caña en tándem de molinos en el ingenio y 2) los residuos agrícolas de cosecha (RAC) de la caña de azúcar que se generan de las operaciones de cosecha mecanizada en campo para suministrar caña de azúcar al ingenio azucarero.

La biomasa en forma de residuos agroindustriales puede sustituir parcialmente los combustibles no renovables a través de procesos termoquímicos mediante reacciones exotérmicas que transforman parte de la energía química contenida en la biomasa en energía térmica o eléctrica (bioenergía) para ser utilizada en procesos industriales y en etapas a lo largo de la cadena de valor.

La propuesta de este trabajo de investigación es desarrollar y medir el desempeño de una red de valor basada en los intercambios de Bioenergía en las cadenas de valor avícola y cañero – azucarera, que puede ser transformada y medida en términos monetarios, para determinar estrategias de negocios en las empresas de un grupo corporativo.

Se propone una metodología de evaluación de cadenas de valor que consiste en siete etapas para estimar la producción de bioenergía y una metodología de evaluación de red de valor de siete etapas para estimar el intercambio de económico y energético entre las cadenas de valor para desarrollar estrategias de negocios, ambas metodologías se validan a través de un caso de estudio para estimar la aportación de bioenergía e intercambio económico al integrar las cadenas de valor a través de una red de valor. Esta investigación aporta un modelo de negocios basado en una red de intercambio de bioenergía a través del aprovechamiento de residuos agroindustriales.

## CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

### INTRODUCCIÓN

La demanda de energía en el mundo ha ocasionado que los combustibles no renovables estén disminuyendo, provocando que se aumenten los esfuerzos para ofrecer distintas alternativas para contra restar el problema de escasez energética (SENER, 2013).

El sector industrial a nivel global ha iniciado una búsqueda tecnológica que permita encontrar energías alternativas o esquemas energéticos que utilicen fuentes renovables que brinden oportunidades de convertirse medioambientalmente sustentables y económicamente viables para sustituir a los derivados del petróleo y sus usos energéticos.

El crecimiento significativo en la producción de energías a partir de fuentes renovables genera un enorme potencial para explotar energéticamente muchos residuos de cultivos e industriales que no se aprovechan, así como sembrar cultivos con alto contenido de biomasa concretamente para utilizarlos como combustibles para la producción de energía. El potencial de la bioenergía aumenta a medida que surjan tecnologías que permitan una conversión más eficiente de biomasa para la generación de biocombustibles y bioelectricidad.

Esta investigación presenta oportunidades para aprovechar energéticamente la biomasa residual que se genera en los procesos de producción que integran empresas agroindustriales del sector Avícola y del sector Azucarero para formar una red de colaboración e intercambio de bioenergía.

Aprovechar el enlace tecnológico que se puede formar entre las empresas crea innovadoras estrategias de negocios que permiten aprovechar los subproductos generados por cadenas de valor o sus eslabones individuales en cada industria.

La pollinaza que se genera en las granjas avícolas son utilizados en sistemas de combustión directa para generar vapor y bioelectricidad, y los lodos residuales que se generan durante el tratamiento físico-químico de los efluentes del proceso de la planta procesadora de aves, son utilizados en sistemas de digestión anaeróbica para producir biogás capaz de generar bioelectricidad y obtener biosólidos (biofertilizantes).

El bagazo generado en el área de fábrica del ingenio y el residuo agrícola de cosecha (RAC) de caña de azúcar producido en el campo durante las operaciones de cosecha mecanizada en zafra, es

almacenado para ser combustionado en el periodo de no zafra en el interior de la caldera para cogenerar vapor y bioelectricidad, como se hace con el bagazo en zafra.

La aplicación energética los residuos puede elevar la rentabilidad económica, mejorando la competitividad y crea sustentabilidad en distintas unidades de negocio asociadas a una red de valor.

La red de valor propuesta crea diversas estrategias de negocios, que permiten reducir el costo de oportunidad y elevar la rentabilidad de las unidades industriales al utilizar los residuos avícolas y cañero-azucareros para generar energía renovable y sostenible.

Para medir el costo de oportunidad existente al no aprovechar los residuos energéticamente, es necesario investigar sobre los beneficios técnicos y económicos que aporta cada unidad de negocio de forma individual para medir el desempeño y potencial al momento integrarse en la red.

El desarrollo de la red de valor de bioenergía a partir de la gestión tecnológica de biomasa (residuos) sirve para que un grupo de empresas genere estrategias energéticas para desarrollar esquemas innovadores sobre bionegocios, a través de su colaboración en conjunto.

Para poder conocer la aportación de bioenergía de cada cadena de valor se propone una metodología de siete etapas de análisis para cada cadena de valor que integra la red. Se realiza un análisis del sistema de producción de los residuos para controlar su calidad y estimar la cantidad de biomasa, se realiza un balance de materia y energía para determinar la producción de bioenergía, se realiza un análisis de riesgo con diferentes escenarios para estimar la rentabilidad económica del intercambio de bioenergía entre las cadenas de valor, y se evalúa la sustentabilidad ambiental que se logra al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Las aportaciones de cada cadena de valor se integran en una red de valor que es diseñada a partir de la propuesta de Peppard & Rylander (2006) en la que intervienen un análisis de red de valor (ARV) que incluye el mecanismo para formalizar los intercambios energéticos derivados de la utilización de los residuos que aporta cada cadena de valor.

El modelo propuesto de la red de valor es validado por el caso de estudio de un grupo corporativo de empresas agroindustriales (del sector avícola y cañero – azucarero) para mostrar la viabilidad de la red de valor, a través del incremento de la competitividad y rentabilidad de las empresas que forman parte de la red. Este trabajo de investigación presenta un enfoque innovador para el aprovechamiento de residuos con el objetivo de producir nuevos productos (bioenergía y biosólidos).

## Estructura de la Tesis

En el presente trabajo de investigación se desarrollan estudios y análisis técnico-económicos sobre procesos bioenergéticos utilizando técnicas de inteligencia artificial, análisis estadísticos y simulación Montecarlo.

La obtención de la información y el análisis de la red de valor se realizan en colaboración de expertos en el tema de bioenergéticos para poder predecir y determinar valores específicos apegados a la realidad de forma conservadora.

Esta tesis se divide en 6 secciones, integrada por 7 capítulos (ver Figura 1). En la primera sección se desarrolla la Introducción que describe el enmarcamiento general de la investigación, se aborda el planteamiento del problema sobre la falta de iniciativas y tecnologías para reutilizar los residuos industriales, una justificación para el aprovechamiento de residuos agroindustriales con fines energéticos, un objetivo de investigación y la Hipótesis.

El capítulo 1 desarrolla una breve descripción de la tesis de investigación, se plantea el problema, desarrolla la estructura de la tesis, se describe la justificación, se presentan los objetivos y se plantea la hipótesis relacionados a la generación de los residuos de las empresas que forman la red de valor.

La segunda sección de la tesis consta de los capítulos 2, 3 y 4, aborda conceptos teóricos sobre el enfoque de análisis de red de valor de bioenergía.

El capítulo 2 es referente al Marco Teórico que describe los elementos conceptuales que serán utilizados para desarrollar la red de valor con base a la gestión de bioenergía, el capítulo 3 es referente al Estado del Arte donde se presentan las aportaciones al conocimiento de las últimas investigaciones que se encuentra relacionadas con bioenergía, inteligencia artificial, cadenas y redes de valor. Por ultimo en el capítulo 4 se describe la Metodología donde se presenta la secuencia de actividades para desarrollar en esta investigación que incluye: 1) la metodología para el desarrollo de red de valor basada en bioenergía a través de 7 etapas y 2) la metodología de evaluación de la cadena de valor a través de 7 etapas.

La tercera sección de la tesis consta del capítulo 5 se presenta la estructura del análisis de evaluación de 7 etapas de las cadenas de valor, en la etapa 1 se analiza el sistema de producción de residuos, la etapa 2 se controla la calidad del residuo agroindustrial con técnicas de inteligencia artificial, la etapa 3 se estima la biomasa a producir con diferente contenido de humedad o el inhibidor de rendimiento de energía, la etapa 4 se realiza un balance de materia y energía en el



sistema para determinar la transformación de la biomasa en energía, en la etapa 5 se determina la producción de energía con simulación Montecarlo, la etapa 6 se realiza el análisis de riesgo y la proyección económica con simulación Montecarlo y en la etapa 7 se estima la reducción de emisiones de gases efecto invernadero derivado de la producción de bioenergía.

Se representan de manera gráfica las 7 etapas de evaluación de los procesos de transformación de biomasa y energía de las cadenas de valor agroindustrial que intervienen en la red de valor.

La cuarta sección de la tesis consta del capítulo 6, se desarrolla una metodología para el desarrollo de la red de valor, también definida por siete etapas que son: 1) definición del objetivo de la red, 2) identificación y definición de los participantes de la red, 3) identificación de las dimensiones de valor de los participantes de la red, 4) definición de los vínculos de valor, 5) optimización y sensibilidad, 6) análisis y modelado de la red de valor, y finalmente 7) escenarios y estrategias. Con la aplicación de la metodología de la red de valor se define y da claridad a los intercambios de bioenergía y biosólidos que aporta cada cadena de valor.

La quinta sección es el capítulo 7 en él se presentan las conclusiones y se argumentan los beneficios y aportaciones que se logran con el desarrollo de la red de valor de bioenergía a partir de la utilización de residuos agroindustriales. Y finalmente las referencias bibliográficas.

La sexta sección son los anexos que el que se describen los procesos agroindustriales que produce el residuo, se presentan, conceptos clave del modelo de negocio de bioenergía, la formulación matemática de los modelos bioenergéticos en la que se describe la forma en que los datos fueron estructurados para interactuar en los modelos de simulación de producción biomasa, de transformación de energía y de análisis de riesgo económico.

Se presenta el desarrollo de los modelos bioenergéticos y la aplicación de la metodología de siete etapas para cuantificar la producción de residuos de biomasa y producción de cada cadena de valor que interviene en la red, en este capítulo se efectúan análisis estadísticos, se aplican técnicas de inteligencia artificial, se efectúan balances de biomasa y bioenergía, se desarrollan modelos de simulación, se realizan evaluaciones económicas y financieras al utilizar los residuos agroindustrial de las cadenas de valor.

Las etapas de evaluación detallada de las 7 etapas de los modelos bioenergéticos de las cadenas de valor se presenta en la sección de anexos.

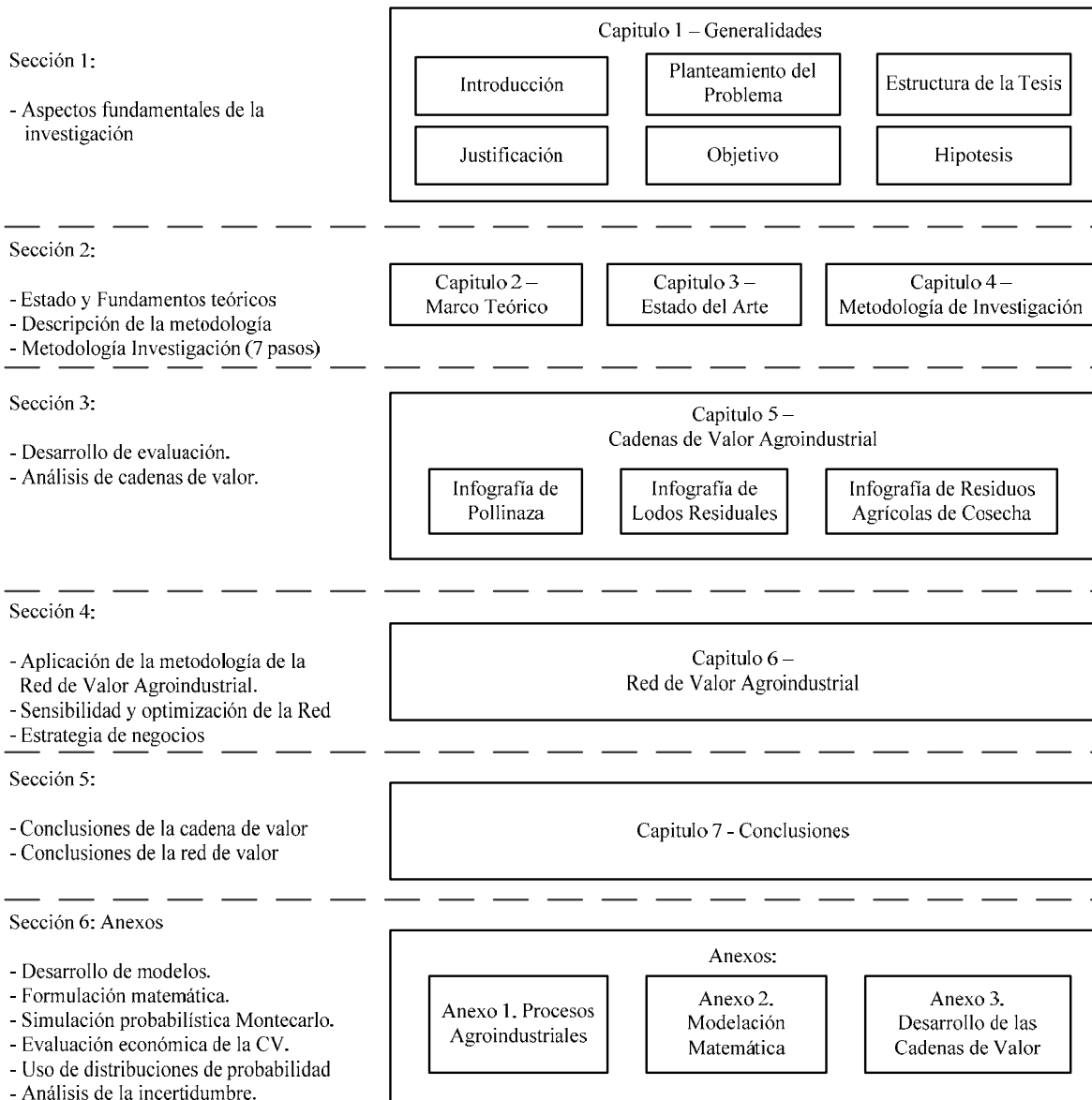


Figura 1. Esquema de la estructura de la tesis y conexión lógica entre capítulos.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La constante y creciente competencia empresarial en los últimos años y la velocidad con que las empresas realizan investigaciones, desarrollan tecnologías e innovaciones (IDT+i) para implementarlas en sus procesos de transformación de productos y servicios a nivel global, terminan arrastrando a empresas que son parte de su ecosistema, debido a la inercia de aquellas que si invierten en IDT+i.

La forma de operación actual en las industrias exige diseñar estrategias cuidadosamente diseñadas que eleven su competitividad para reducir sus costos de producción o incrementen sus ingresos al crear y capitalizar oportunidades que logren satisfacer necesidades internas y para el mercado, logrando mantenerse y no salir de él.

La presente investigación aborda dos problemáticas que atraviesan las empresas actuales que impiden ser competitivos en sus mercados: 1) la no utilización y transformación energética de los residuos agroindustriales limita las oportunidades para reducir los costos o aumentar los ingresos, así como la afectación al medio ambiente, y 2) las empresas generan estrategias de manera individual que limitan sus alcances y objetivos de rentabilidad como negocio, al no aprovechar la vinculación con otras empresas que permitan realizar intercambios tangibles e intangibles que genere nuevas formas de negocios.

### **1) Aprovechamiento de residuos agroindustriales.**

A lo largo de los procesos de transformación industrial se utilizan materias primas que sufren modificaciones físicas y químicas en las que se va agregando valor en cada etapa del proceso para poder elaborar y producir productos finales que son el objetivo del negocio, así también en cada etapa del proceso se generan mermas y residuos que afectan los costos de producción del producto final.

Las mermas, los residuos, los derivados y subproductos obtenidos de los sistemas de producción muchas veces no se les asigna un costo porque el criterio tradicional ha sido tratarlos como desechos, aquellos residuos que son aptos para ser utilizados por otras industrias se venden al mejor precio recuperando parte del costo de producción.

Existen casos en donde los residuos se deben confinar al menor costo posible al no existir interés de otras industrias para ser reutilizados, esto se debe porque los residuos no son sometidos a ningún proceso o tratamiento ya sea físico o químico para mejorar su calidad, estado o condición para aprovecharlos en otros procesos de manera interna e inclusive para venderlos en nuevos mercados.

Desde el punto de vista contable, financiero y de negocio se deben contabilizar las mermas, los residuos, los derivados y subproductos para asignarles un costo de producción, para tener claramente identificados los costos reales de los productos finales, mermas y los residuos, para mejorar y dar mayor claridad a la toma de decisiones de la alta dirección al proponer estrategias tecnológicas o propuestas de negocio innovadoras para reducir sus costos de producción y elevar su competitividad al aprovechar los residuos para otros fines.

Las grandes corporaciones al no conocer el potencial energético de sus residuos y la falta de una integración general de aprovechamiento de biomasa y bioenergía que incluya a todas sus empresas y sus procesos, impiden que puedan aprovechar y establecer un circuito perpetuo de oferta y demanda de energéticos entre las cadenas de valor y lograr su permanencia en el negocio.

La falta de un plan de estrategias competitivas alineadas con la utilización energética de los residuos y su aprovechamiento oportuno por las grandes corporaciones, hace que los costos de producción no se logren reducir, no se logre aumentar la rentabilidad de los procesos de transformación y no se desarrollen aplicaciones de tecnologías sustentables atractivas para las empresas.

## **2) La falta de estrategias de negocios corporativas impiden el intercambio de valor entre las empresas.**

La falta de colaboración entre empresas a nivel mundial, nacional e inclusive regional hace imposible aumentar la competitividad de los negocios. Solo las empresas con altos estándares tecnológicos son las que han incursionado rápidamente en el intercambio de valor.

La mínima existencia de redes de valor con intercambios tangibles se desarrollan con menor velocidad por la inversión económica requerida para que funcionen y se integren, por la naturaleza y las características del producto a intercambiar, por la logística de entrega y despacho del producto y la distancia física entre las empresas, estas situaciones limitan el crecimiento económico de las cadenas de valor.

Las empresas de grandes grupos corporativos tienen altos consumos de energía eléctrica de la red nacional de energía y de combustóleo proveniente de refinerías para usarlo como combustible para generar vapor, ambos recursos son utilizados en los equipos y procesos de transformación para elaborar un producto final.

El problema se debe al desconocimiento de la manera más rentable y apropiada energéticamente para aprovechar los residuos agroindustriales que producen sus empresas, para lograrlo se debe se

realizar una investigación que incluya diversos análisis y estudios que permitan conocer la tecnología de combustión y digestión anaeróbica para determinar la tecnología más apropiada basado en las características intrínsecas del tipo de residuo y del proceso energético, ante este desconocimiento es por ello que no existe plan de estrategias de negocio.

Otro problema asociado se debe a que no cuentan o realizan estudios y análisis del sistema de producción de residuos, no se logran identificar y controlar los factores que afectan la cantidad y calidad del residuos para ser aprovechados o reutilizados posteriormente, y en consecuencia desconocen las tecnologías energéticas que pueden ser utilizadas que están disponibles en el mercado, las variables que afectan el desempeño operativo del sistema y el rendimiento energético que es liberado por cada tipo de biomasa con la tecnología a utilizar.

Las corporaciones que integran a empresas agroindustriales desconocen los costos de oportunidad existente y los rendimientos económicos al poner en marcha modelos de negocio de tipo energético a partir del aprovechamiento y transformación de residuos agroindustriales.

Los análisis de red de valor existentes carecen de análisis de riesgo sofisticado de manera profunda y simultánea en las cadenas de valor implícitas, sin aplicación a modelos de negocios de bioenergía y carentes de impacto ambiental que causan los residuos al utilizarlos energéticamente.

## JUSTIFICACIÓN

Este trabajo de investigación se centra en aprovechar los costos de oportunidad que se generan por no emplear los residuos de manera energética y sustentable en las cadenas de valor Avícola y Cañero-Azucarera, para desarrollar estrategias y modelos de negocios entre empresas de una corporación.

Regularmente los objetivos estratégicos de las empresas son elaborados para cubrir la eficiencia técnica y económica de sus procesos y productos de manera interna. La gran mayoría de las empresas tienen objetivos que no están alineados a una estrategia que implique a otras empresas de manera conjunta, clara y bien definida.

Una red de valor identifica y potencializa el aprovechamiento de valor tangible e intangible a partir del intercambio y colaboración que se genera entre las cadenas de valor, logrando reducir sus costos o aumentar sus ingresos (Stabell & Fjeldstad, 1998).

La propuesta para desarrollar una red de valor permite crear un enlace de aprovechamiento de bioenergía a partir de la transformación de los residuos, permitiendo al accionista aumentar la rentabilidad y el valor de sus unidades de negocio, esta iniciativa genera un esquema de benchmarking tecnológico que puede ser aprovechado por otras empresas que deseen asociarse para colaborar en conjunto en una red basada en la generación de bioenergía con residuos similares.

La biomasa agroindustrial de origen animal (pollinaza), proveniente de las granjas de engorde de industria avícola, puede ser utilizada para producir vapor a partir de su combustión en calderas de alta presión y electricidad usando turbogeneradores.

La biomasa industrial derivada del tratamiento de los efluentes (lodos residuales), provenientes de la procesadora de pollos de engorde, puede ser utilizada como materia prima para producir biogás y electricidad a partir de la digestión anaeróbica en reactores ovoides y motogeneradores, dando una solución ambientalmente sustentable y económica, al devolver energía al interior del sistema industrial y reintegrar biofertilizante a cadenas de valor primarias de producción de cultivos. Su utilización reduce el impacto ambiental negativo en los cuerpos hídricos donde son vertidos estos residuos.

La biomasa agroindustrial de origen vegetal (Residuos Agrícolas de Cosecha y Bagazo), proveniente de la caña de azúcar es un residuo agrícola, que pueden ser utilizados como biocombustibles para ser combustionados en el interior de la caldera de alta presión para producir vapor y energía eléctrica utilizando turbogeneradores. El aprovechamiento de ambos tipos de biomasa de manera secuencial o en mezcla, logra aumentar la competitividad ambiental, energética y económica de las cadenas de valor cañero – azucarera que generan e intercambian bioenergía en una red.

Para finalizar, este trabajo de investigación justifica su desarrollo al proponer una Red de Valor que permita el aprovechamiento y uso responsable de todos los tipos de biomasa que se producen en todas las cadenas de valor para producir bioenergía, ofreciendo una solución ambiental y sustentable con beneficios económicos superiores en comparación a su manejo y disposición tradicional.

Por este motivo es importante conocer las condiciones y características de los residuos para ser reutilizados y desarrollar alternativas tecnológicas para su aprovechamiento energético, útil para su intercambio con otras empresas que forman parte de una red de valor.

## OBJETIVOS

### Objetivo General

Desarrollar una Red de Valor que integran dos o más cadenas de valor agroindustriales a partir de la gestión de bioenergética de sus residuos para generar estrategias de negocios que permitan maximizar su rentabilidad económica y tecnológica.

### Objetivos específicos

1. Desarrollar una Metodología de 7 etapas para analizar la utilización y transformación de los residuos de las Cadenas de Valor (Pollinaza, Lodo Residual, Residuo Agrícola de cosecha de caña y Bagazo), a través de técnicas de inteligencia artificial y análisis de decisiones con el objetivo de conocer el rendimiento energético de las cadenas de valor en estudio.
2. Desarrollar una Red de Valor basada en bioenergía a través de 7 etapas, que permita integrar los intercambios de bioenergía de manera simultánea, con el objetivo de conocer los rendimientos económicos de las cadenas de valor (avícola y cañero – azucarera).
3. Validar la Red de Valor basada en bioenergía a partir de un caso de estudio real de un grupo corporativo con el objetivo de medir el desempeño económico entre las empresas asociadas.
4. Desarrollar estrategias de negocios basadas en el intercambio de bioenergía de la red de valor propuesta que permita crear nuevos modelos de negocio.

## HIPOTESIS

H0: La rentabilidad económica de la bioenergía gestionada a través de una red de valor producto del tratamiento energético de los residuos agroindustriales propondrá estrategias que generen innovadores modelos de negocios en el sector avícola y cañero – azucarero. ° ° Se Acepta.

## Conclusiones.

Este capítulo muestra que las industrias agroindustriales carecen de un aprovechamiento de residuos en sus cadenas de valor derivado de la falta de estrategias de negocios de tipo energético y de la aplicación de tecnologías disponibles para el aprovechamiento de sus residuos, con altos rendimientos económicos y energéticos que justifique el desarrollo de una red de valor a partir de la gestión bioenergética de residuos. Esta situación está relacionada con la falta de metodologías de evaluación formalmente estructuradas que limitan a las empresas agroindustriales utilizar sus residuos con fines energéticos para elevar la rentabilidad de su negocio.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO

### 2.1.Estrategia de negocios.

La esencia de la estrategia está en elegir actividades que sean diferentes a las de los rivales, Michael Porter (1996) define a la estrategia como:

*“La estrategia es la creación de una posición única y valiosa que involucra un conjunto diferente de actividades, que le permite a la unidad de negocio lograr una ventaja económica, sustentable y competitiva”.*

#### **Estrategia corporativa (empresarial)**

La estrategia corporativa en los negocios sirve para desarrollar y diversificar procesos, productos y servicios de un conjunto de empresas, y tiene dos niveles: 1) la estrategia de la unidad de negocios (o estrategia competitiva) se ocupa de cómo generar una ventaja competitiva en cada uno de los diversos negocios en los que compite la compañía (Porter, 1985) y 2) la estrategia corporativa (empresarial o estrategia de la compañía en su conjunto) asegura que la totalidad de la corporación represente más que la suma de sus partes o unidades de negocios.

#### **Estrategia Sustentable**

Las empresas que buscan una posición estratégica sustentable deben considerar intercambios (trade-offs) al interior o fuera de su sistema, que le permitan reducir el impacto ambiental de sus procesos para prolongar su operación. Los intercambios permiten lograr, tener o mejorar un valor, producto, proceso o servicio a cambio de entregar, pagar, perder o ceder otro valor o producto en negociación. Una estrategia alineada a la sustentabilidad de sus procesos contribuye a aumentar rentabilidad de sus operaciones.

#### **Unidades estratégicas de negocio (UEN)**

Las unidades estratégicas de negocios son parte de grupos corporativos empresariales de diversos sectores de negocios, son un conjunto homogéneo de actividades o procesos que tienen autonomía operativa y están alineados a la estrategia de la empresa para aumentar las oportunidades de rentabilidad y el crecimiento en la cadena de valor. Se caracterizan por integrar “procesos industriales secuenciados y claramente definidos”.



## **Cadena de Valor**

Una cadena de valor describe el desarrollo de las actividades de una organización empresarial que genera valor al mejorar, agregar o crear un producto, proceso o servicio para logra un margen de utilidad al cliente final.

Las actividades de valor se dividen en dos grandes categorías: 1) las primarias están relacionadas con la creación física del producto y con las operaciones del proceso de transformación, y 2) las actividades de apoyo le dan soporte a las actividades primarias y a cualquier otra mediante la provisión de materiales, tecnología, recursos humanos y varias otras funciones generales de la empresa.

Las compañías diversificadas comparten sus capacidades y los recursos de sus eslabones entre otras unidades de negocio que forman la cadena de valor, y lo hacen cuando existen compradores o canales similares, cuando son del mismo giro industrial, desarrollan actividades de valor parecidas, tienen configuraciones similares de operación, o comparten la misma estrategia.

Para que las grandes organizaciones desarrollen actividades compartidas se necesita de un contexto organizacional que refuerce y estimule la colaboración entre las unidades de negocios en las cadenas de valor, que sirva como un marco para pensar estratégicamente acerca de las actividades implícitas en cualquier negocio para evaluar su costo relativo en cada eslabón en la cadena para crear valor (Porter, 1985).

## **Red de Valor**

Las cadenas de valor, por si solas, son insuficientes para analizar la complejidad del proceso de negocio y la creación del valor a distintos niveles entre empresas, una solución es la red de valor.

El alcance y la configuración de una red de valor de tipo industrial depende del valor que se gestiona entre las entidades que la forman, la disponibilidad y nivel de utilización de tecnología y el grado de eficiencia para ser implementada en los sistemas de producción existentes en cada cadena de valor.

*“Una red de valor es un conjunto complejo de entidades y relaciones que generan valor económico a través de intercambios dinámicos complejos entre dos o más entidades”.*

En otras palabras, una red de valor es una perspectiva de análisis de negocios que describe los recursos técnicos y sociales dentro y entre las empresas para generar valor tangible e intangible a través de intercambios complejos y dinámicos entre dos o más individuos, grupos u organizaciones (Allee, 2002)

La estructura de una red de valor está formada por entidades y los intercambios de valor de tipo tangible e intangible. Existen dos tipos de red: 1) la red de valor externa es aquella en donde intervienen clientes o destinatarios, intermediarios, interesados y proveedores, y 2) la red de valor interna se centra en actividades clave, de procesos y relaciones en el interior de las empresas. Regularmente el valor que es creado por las redes representa conocimiento, productos o servicios (Allee, 2000).

### **Entidades involucradas (Stakeholders)**

Los stakeholders son entidades ó organizaciones que participan en los intercambios materiales y no materiales pueden ser vistos como una red de valor, ya sea la industria privada, el gobierno o el sector público.

### **Valor tangible e intangible**

Cualquier organización que involucre intercambios tangibles e intangibles para crear mejores situaciones u oportunidades de competitividad puede ser vista como una red de valor.

Los intercambios de valor son: 1) el valor tangible representado por todos los intercambios negociables de bienes o servicios que generan físicamente un flujo de valor y 2) el valor intangible es la información y el know-how de procesos, productos y servicios, que apoyan a la red de valor tangible (Alle, 2008). La red de valor evoluciona la noción tradicional de una cadena de valor de Michael Porter, cambia la forma de crear valor a partir de la fusión de múltiples cadenas de valor.

### **Análisis de red de valor**

El análisis de red de valor (VNA, por sus siglas en inglés) es una metodología de modelación para los negocios que permite visualizar las actividades de intercambio de valor en los negocios y el conjunto de relaciones desde una perspectiva integral del sistema.

El análisis de red de valor nos permite entender, visualizar, usar, optimizar redes de negocios entre empresas y ecosistemas económicos complejos para crear valor entre los socios estratégicos que forman la red y se utiliza para analizar la dinámica de transacciones costo-beneficio para mejorar la

toma de decisiones sobre la rentabilidad financiera y rendimiento operativo de las entidades que forman la red de valor.

**Representación gráfica de una red de valor.**

La visualización gráfica de una red de valor representa el conjunto de relaciones e intercambios existente entre las entidades que participan en la red. Las empresas inversoras en capital de riesgo utilizan este enfoque para determinar el valor de las empresas en el futuro o la relación y el comportamiento que se tiene con otras empresas. (Allee, 2002). En la Figura 2 se presenta un modelo de red de valor de la industria farmacéutica que incluye el intercambio de valores tangibles e intangibles entre las entidades que forman la red.

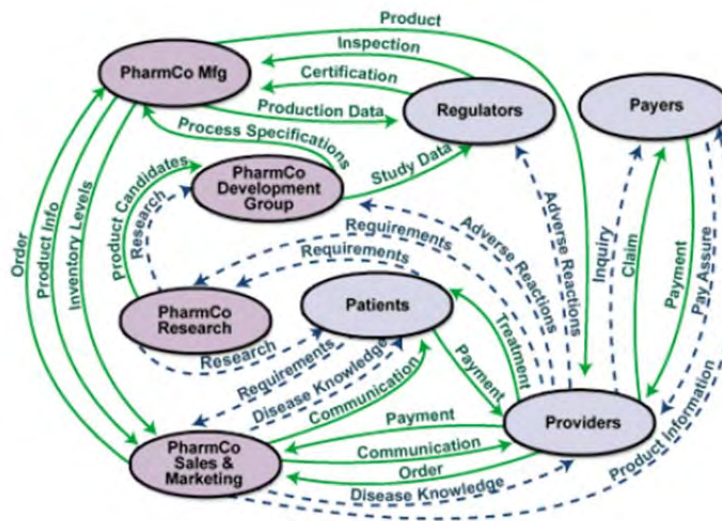


Figura 2. Red de valor Farmacéutica con intercambios tangibles e intangibles. (Allee, 2002).

Los nodos en una red de valor representan las entidades que interactúan en la formación de una red, representando los intercambios de valores tangibles e intangibles entre ellas, para crear valor.

Estos intercambios son en realidad la clave para crear la innovación y las nuevas ideas en las empresas, las prácticas tradicionales de negocios no incluyen estos intercambios intangibles, pero se hacen visibles con un análisis de la red de valor.

Las visualizaciones de diagramas y enlace de la red se evalúan con una infinidad de herramientas y técnicas para medir las salidas de valor para identificar los activos intangibles (conocimiento) y el rendimiento financiero (tangibles) que ayudan a mejorar el nivel organizativo, que sirva para encontrar nuevas oportunidades de valor o de innovación.

## 2.2. Bioenergía y Biomasa

La bioenergía se deriva de toda una gama de materias primas, a través de múltiples procedimientos diferentes, el término bioenergía se refiere a todos los tipos de energía derivados de los biocombustibles que se provenientes de materias de origen biológico, o biomasa (FAO, 2008).

Los biocombustibles se clasifican según la procedencia de la biomasa usada para su producción – bosques, agricultura o biomasa urbana– y la situación del producto. Por consiguiente, los biocombustibles comprenden los combustibles leñosos, los agrocombustibles y los subproductos urbanos, y cada uno de estos grupos se divide en formas de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que pueden usarse para la generación de calor o electricidad.

El término biocombustibles se refiere a los materiales de biomasa que derivan directamente de origen biológico y de los subproductos de la industria agrícola y animal.

### **Desechos agroindustriales**

- 1) Pollinaza. Es la cama residual en el interior de la granja de pollo de engorde, consistente en una mezcla heterogénea formada por excretas de pollo de engorde, cascarilla de arroz, aserrín o paja, alimento no digerido, plumas, y agua que se retira al final del ciclo de producción del pollo (Ross, 2009).
- 2) Lodos Residuales. Son residuos semisólidos con alto contenido orgánico que se producen, decantan, o sedimentan durante la remoción de contaminantes en los procesos de tratamiento físico – químico de los efluentes y aguas residuales que se producen en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) provenientes de la planta procesadora de pollo de engorde.
- 3) Bagazo y residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC). Son residuos de la caña de azúcar para sustituir energía fósil que se consume en los ingenios azucareros para producir vapor y energía eléctrica.

### **Tecnologías energéticas**

Una Biorefinería es una instalación que integra procesos de transformación de biomasa para producir una variedad de productos de valor agregado incluyendo biocombustibles, energía térmica y eléctrica, químicos y otros productos finales.

- 1) La Digestión Anaeróbica. Es un proceso biológico complejo de degradación en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato son convertidos en biogás (mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos), por un consorcio de bacterias que son

sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno. La digestión anaerobia (DA) tiene 4 etapas: la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis.

Los Digestores anaeróbicos ovoides termofílicos con dualidad de operación, están diseñados en forma de huevo tienen mezcladores modernos que reducen el consumo de energía innecesario por mezclado, casi no generan espuma y evitan zonas muertas que presentan otros digestores.

- 2) La Combustión. Es una reacción química de oxidación de los componentes de la biomasa a una alta temperatura en presencia de oxígeno suficiente para producir la oxidación total de la biomasa, de la que se obtiene energía en forma de calor, dióxido de carbono, agua y cenizas como productos de la reacción.
- 3) La Cogeneración. Es la generación simultánea de energía eléctrica o mecánica (en las turbinas) y energía térmica (utilizada en el proceso) a partir de una fuente renovable de biomasa. En la industria azucarera ha sido utilizada de manera poco eficiente.

Este sistema consiste en una caldera en la que se quema el combustible para generar calor que se transfiere a unos tubos acuotubulares por donde circula agua para ser evaporada. El vapor obtenido, a alta presión y temperatura, se expande en una turbina de vapor, cuyo movimiento impulsa un alternador que genera la electricidad.

La diferencia efectiva entre generación eléctrica y cogeneración eléctrica, utilizando biomasa en ambos casos, radica sustancialmente en la existencia del aprovechamiento de calor, la cogeneración permite alcanzar el triple de rendimientos energéticos en comparación con los rendimientos de la generación.

### 2.3. Inteligencia Artificial

Los sistemas expertos son considerados una rama de la inteligencia artificial y se refiere a la creación de un software que emula el razonamiento humano a través de deducción lógica o patrones de comportamiento utilizando modelos matemáticos en un entorno de incertidumbre y riesgo.

En la Figura 3 se presenta la estructura de un sistema experto, el cual está conformado por tres componentes: 1) la base del conocimiento, es la información disponible sobre el campo en el que se desarrolla la aplicación, 2) la base de los hechos son datos para elaborar razonamientos sobre situaciones concretas y 3) el motor de inferencia que gestiona la información existente entre la base de conocimientos y los datos de la base de los hechos, para elaborar razonamientos que conduzcan a los resultados.

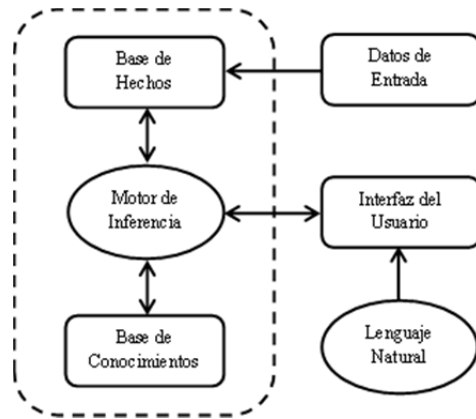


Figura 3. Estructura de un sistema experto, basado en inteligencia artificial

### Redes Neuronales Artificiales

Las Redes Neuronales son modelos artificiales y simplificados con la capacidad de adquirir conocimiento a través de la experiencia, imitando el comportamiento del cerebro humano (Gestal, 2009), funcionan a través de un modelo matemático que se obtiene a partir de una base de datos estadístico para predecir el patrón de comportamiento de sistemas lineales y no lineales.

El comportamiento de una red está determinado por su topología o arquitectura, pesos de las conexiones y la función característica de las neuronas. En la Figura 4 se presenta el desarrollo y esquema básico que se emplea para la resolución de problemas empleando Redes Neuronales.

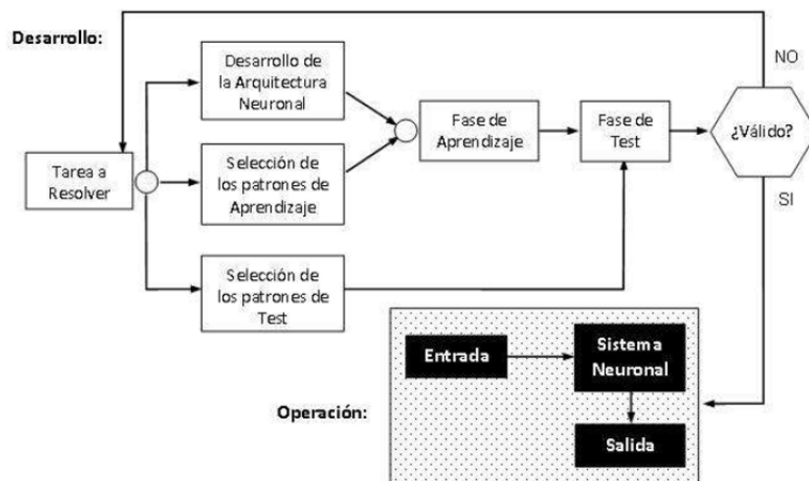


Figura 4. Desarrollo para la resolución de problemas con Redes Neuronales (Gestal, 2009)

Las redes neuronales son capaces de aprender complejas relaciones de datos, pueden diferenciar patrones de datos para clasificar y realizar predicciones cuando se introducen nuevos datos.

Neural Network Toolbox de Matlab es un programa de modelación y análisis de datos y variables que funciona con un número ilimitado de conjunto de datos, permite analizar y administrar bloques de datos con los más modernos algoritmos de redes neuronales, con predicciones sólidas y precisas.

### Lógica Difusa

La Lógica Difusa o borrosa permite representar y procesar el razonamiento incierto a partir de la experiencia de un especialista en el control del sistema. Se utilizan variables lingüísticas que definen el valor de las variables de entrada y su relación existente entre los conjuntos difusos para cuantificar sus grados de pertenencia.

Las funciones de pertenencia dan a cada elemento un grado de membrecía al conjunto, las más utilizadas son: las trapezoidales, trapecio extendido, triangular (T), singleton, sigmoial y gaussiana. El método de inferencia más utilizado para la fuzzificación, es el método Mamdani, se observa en la Figura 5, porque utiliza reglas tipo si – entonces (if – then en inglés), debido a que la regla contiene el antecedente y la conclusión, dados por expresiones lingüísticas.

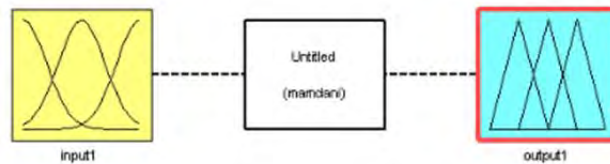


Figura 5. El Método Mamdani

### Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos sirven para encontrar la mejor solución para modelos de toma de decisiones y planeación, crean un entorno en el que cientos de posibles soluciones a un problema compiten unas con otras, y solo la “mejor adaptada” sobrevive.

Los algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda basados en los mecanismos de selección natural y genética, natural. Combinan la supervivencia de los más compatibles entre las estructuras de cadenas, con una estructura de información ya aleatorizada, intercambiada para construir un algoritmo de búsqueda con algunas de las capacidades de innovación de la búsqueda humana (Goldberg, 1988)

## 2.4. Análisis de riesgo e incertidumbre

Un problema que comúnmente se presenta en la evaluación de una propuesta de inversión es que no se analiza la incertidumbre; es decir que no considera el riesgo inherente de la propuesta, esto se debe a que los análisis se centran más en la conversión de los flujos de efectivo futuros (Valor presente, TIR, etc.), sin evaluar el riesgo asociado al rendimiento esperado.

La consideración del riesgo en la evaluación de una propuesta de inversión es el proceso de desarrollar distribuciones de probabilidad de los criterios económicos o de rendimiento conocidos.

Generalmente los flujos de efectivo dependen de variables pueden ser independientes o estar correlacionadas, es por ello que muchas veces no es fácil representar este tipo de situaciones, por lo que para estos casos se recomienda emplear la simulación.

### **Simulación Montecarlo**

El método Montecarlo está basado en la generación de números pseudoaleatorios para determinar el valor esperado de una o múltiples variables aleatorias permitiendo modelar la incertidumbre de sistemas económicos complejos con variables inciertas o “estocásticas”.

El método Montecarlo permite modelar la incertidumbre del proceso de generación de bioenergía y estimar el valor esperado de las variables que afectan el rendimiento energético y económico de la biomasa en cada etapa del proceso, a través de simulaciones capaces de predecir razonablemente el comportamiento de un proceso, logrando identificar y medir el riesgo existente en los escenarios y cómo influye en el sistema para mejorar la toma de decisiones con el mínimo riesgo (*Serment-Moreno et al. 2012*).

Se utiliza @RISK para determinar la incertidumbre a través de distribuciones de probabilidad, estableciendo el rango de valores que la variable pueden alcanzar (del máximo al mínimo).

Según Chase (2001) la simulación se ha convertido en una herramienta estándar para los negocios de las personas que toman decisiones estratégicas. Estas estrategias de análisis pueden emprenderse antes de que el sistema real entre en operación, para ayudar en su diseño, para ver la forma de cómo el sistema podría reaccionar a los cambios en su estructura. La simulación es particularmente apropiada en situaciones en las cuales el tamaño o la complejidad del problema dificultan o hace imposible determinar o asignar valores al sistema con el uso de técnicas de optimización conocidas. La simulación también puede utilizarse en conjunto con las técnicas tradicionales de estadística, ciencias administrativas y estratégicas.



La metodología para la creación y desarrollo de un modelo de simulación, de acuerdo a Law (1991) se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Formular el problema. Sirve para definir el objetivo y criterio de evaluación del sistema y sus costos asociados.
2. Recolectar los datos. Se utilizan para definir los parámetros de entrada al sistema, distribuciones de probabilidad y detalles del modelo, formular y diseñar el problema real que se estudia y se procesan los datos estadísticos.
3. Verificar el modelo. Sirve para analizar el modelo con expertos y especialistas de la operación del sistema que se va a simular, de tal manera que el modelo de simulación sea lo más cercano posible al sistema real.
4. Construir el programa y verificar. Consiste en la formulación del modelo de computadora mediante la determinación las variables y la lógica que debe incluirse en el programa.
5. Realizar corridas piloto. Se realiza la validación del modelo en el siguiente paso y se mide el desempeño de los resultados del modelo con los expertos.
6. Validar el modelo. Se prueban los modelos de simulación antes de efectuar corridas reales de la computadora, se realizan pruebas sobre las entradas y suposiciones que se programarán y se comparan los resultados del modelo construido con los resultados del sistema real. Se deben aplicar pruebas que determinan las distribuciones de probabilidad teórica que se ajustan al sistema que se estudia. Entre esas pruebas pueden incluirse las relativas a variaciones, tales como la ji-cuadrada, las concernientes a medias y pruebas no paramétricas.
7. Diseño de experimentos. Se efectúan experimentos reales de simulación para llegar a una solución final, se aplican técnicas estadísticas que permiten identificar y cuantificar las causas de un efecto de un estudio experimental para determinar las simulaciones independientes.
8. Correr el programa. Al validar todos los datos y condiciones del sistema, se procede a correr el programa para obtener resultados finales.
9. Analizar resultados. Se deben estimar medidas de desempeño y determinar el mejor sistema con respecto a alguna medida de desempeño que sea de interés para el objetivo del estudio.
10. Documentar e implementar resultados. Se documentan las suposiciones del modelo, los registros del programa correcto e implementar resultados.

### **Valor presente neto**

Para realizar los escenarios económicos se emplean hojas de cálculo en Excel con el complemento @Risk de Palisade para modelar la incertidumbre que afecta a los escenarios del modelo. Para la obtención del valor presente neto de cada escenario se utiliza la Ecuación 1.

---

**Ecuación 1. Valor presente neto para evaluar flujo de efectivo de proyectos de inversión**

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+i)^t} - (I_0 + IM_0)$$

Los variables declaradas en la Ecuación 1 son  $V_t$  = Flujos de caja del periodo en el periodo  $t$ , estos representa los ingresos anuales,  $I_0$  = Inversión inicial requerida para la implementación de la tecnología bioenergética,  $IM_0$  = Inversiones relacionadas con los equipos que mejoran la calidad de la pollinaza,  $n$  = número de periodos de evaluación del proyecto y la  $i$  = tasa de interés o tasa de descuento.

**Tasa Interna de Retorno**

La Tasa Interna de Retorno (TIR) ha sido uno de los criterios de decisión más utilizados para la toma de decisiones financieras, no solamente para aceptar o rechazar inversiones, sino también para ordenar alternativas mutuamente excluyentes con el fin de seleccionar la “mejor”. Si la TIR es Mayor que la tasa de rendimiento mínima esperada (TREMA) también llamada tasa de descuento se acepta realizar la inversión.

**Ecuación 2. Tasa interna de retorno para la rentabilidad de los proyectos de inversión**

$$\sum_{t=0}^n \frac{I_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{E_j}{(1+i)^t} = 0$$

La TIR es la solución matemática de la ecuación (0), donde  $I_t$  representa los flujos de ingresos,  $E_t$  son los flujos negativos e  $i$  es la variable a despejar. El primer supuesto nace de la lógica de interés compuesto, al elevar los flujos a la  $t$  implícitamente se está suponiendo que todos los flujos intermedios, sean entregados o no, son reinvertidos a  $i$ , que para (0) es la TIR.

**Periodo de Recuperación**

Se define como el número esperado de tiempo que se requiere para recuperar una inversión original (el costo del activo), es decir, es la cantidad de periodos que han de transcurrir para que la acumulación de los flujos de efectivo iguale a la inversión inicial.

El cálculo del periodo de recuperación de un proyecto, se debe añadir los flujos de efectivo esperados de cada año hasta que se recupere el monto inicialmente invertido en el proyecto.

## Conclusiones

El presente trabajo de investigación aborda cuatro aspectos teóricos que se utilizan para desarrollar la evaluación de las cadenas y red de valor.

El primero es el desarrollo de estrategias de negocio que nos permite alinear las inversiones tecnológicas en bioenergía a la creación de nuevos modelos de negocio utilizando la biomasa disponible de las cadenas de valor. El segundo aspecto es útil para identificar como aprovechar la biomasa para producir energía, para entender cómo se produce y de donde proviene, y para clasificar la biomasa por el tipo de características que tiene cada residuo (pallinaza, lodos residuales, RAC y bagazo).

Conocer el comportamiento energético de la biomasa sirve para identificar las tecnologías disponibles que ofrecen el mayor rendimiento energético de los residuos (digestión anaeróbica, combustión, cogeneración y su distinción con la generación).

El tercer aspecto es la aplicación de técnicas de inteligencia artificial, las redes neuronales artificiales son utilizadas para determinar el patrón de comportamiento de la calidad de biomasa que se produce, y el uso de algoritmos genéticos nos permite optimizar los resultados de cada etapa de evaluación de las cadenas y red de valor. Por último la aplicación de un análisis de riesgo e incertidumbre sofisticado a través de simulación Montecarlo ayuda a determinar la relación económica y financiera que tiene la red de valor con la producción de biomasa, bioenergía y biosólidos que se intercambian entre las cadena de valor.

## CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE

### 3.1. Estrategia de negocios

Crear una estrategia nos da una posición única y valiosa, que implica un conjunto diferente de actividades a lo largo de la cadena de valor (*Porter, 1996*), la integración de múltiples cadenas de valor dan origen a la formación de una red de valor (*Porter, 1985*) para responder a las necesidades de los clientes, resolver problemas, ofrecer productos, y aumentar las ganancias (*Christensen, 2003*).

Existen dos niveles de estrategia: 1) la estrategia en la unidad de negocio (también llamada competitiva) y 2) la estrategia empresarial (también llamada corporativa). Una estrategia competitiva sirve para desarrollar una estrategia corporativa, esta alineación permite a un conjunto de empresas pueda representar más valor de manera integrada que la suma individual de sus unidades de negocio (*Porter, 1987*), esto hace que un modelo de negocio sea resultado directo de la estrategia alineado a lógica de operación y creación de valor (*Casadesus-Masanell & Ricart, 2010*).

En este sentido la estrategia se refiere a la elección del modelo de negocio a través del cual la empresa va a competir en el mercado, y la táctica se refiere a las últimas opciones abiertas que una empresa utiliza en relación al modelo de negocio que emplea.

En resumen un modelo de negocio se puede definir como una representación lógica de la esencia intrínseca de la empresa y de sus opciones estratégicas para crear y capturar valor dentro de una red de valor (*Shafer et al., 2005*), es decir que el modelo de negocio sirve como una herramienta para analizar las decisiones estratégicas de la empresa, en este sentido una red estratégica ofrece una comprensión más refinada de la estructura y de las relaciones entre las industrias, y como se ve afectada la rentabilidad de cada cadena de valor. (*Zaheer et al., 2000*), por lo tanto una red de valor sustituye a la cadena de valor como el modo dominante de creación de valor, mediante la configuración de una red, sus relaciones y los intercambios de valor entre los participantes, ofreciendo un marco de análisis y evaluación del modelo de negocio para innovar (*Wu et. al, 2009*).

#### **Enmarcamiento y estructura de la red de valor**

Las redes de valor están formadas por relaciones que generan valor de tipo tangible e intangible a través de intercambios dinámicos complejos entre dos o más cadenas de valor, para aumentar su competitividad económica (*Allee, 2000*).

Las razones por las que se crea una red de valor son porque: 1) las empresas no pueden crecer por sí solas de manera autosuficiente en el complejo mundo de los negocios, 2) una red de valor proporciona a las empresas mayor eficacia, variedad y dinamismo, 3) una red proporciona gran flexibilidad y corrige o sustituye de manera rápida las relaciones entre empresas, 4) adapta el conocimiento a la realidad de la red, y 5) las redes están mejor preparadas para cambios no previstos debido al consenso y co-participación de las entidades que la integran, logrando una mayor capacidad de auto-organización. (*Dumitraşcu et al. 2014*).

El enfoque de red facilita la colaboración entre las empresas para el logro de objetivos de negocio en común (*Fjeldstad, Ø., & Becerra, 1999*), desarrollar la confianza facilita transacciones de negocio sostenibles (*Carneiro et al. 2013*), permitiendo co-crear valor en constelaciones complejas para innovar de manera sistemática (*Normann & Ramírez, 1993*), aun estando distribuidas geográficamente en distintas zonas (*Camarinha-Matos & Afsarmanesh, 2005*),

### **Clasificación y Metodología de redes de valor.**

Un estudio presentado en Ginebra en 2002 logró identificar cuatro tipos de red: 1) la de aprendizaje por hobby, 2) la de aprendizaje profesional, 3) la de oportunidades de negocio y 4) la de mejores prácticas, y propusieron una metodología de cuatro etapas para su desarrollo: 1) definir la red, 2) crear el contexto de red, 3) se definen las funciones en la red, y se 4) aprovechan los resultados de la red (*Büchel & Raub, 2002*). Para asegurar la viabilidad de las redes, maximizar las ganancias en el mercado, aumentar el nivel de eficiencia e innovación en las empresas, se deben adoptar estrategias específicas y claramente definidas para cada tipo de mercado (*Neamtu & Neamtu, 2014*).

Otros estudios relacionados con los negocios han utilizado un Análisis de Red de Valor (NVA), para generar una descripción completa de donde se crea y encuentra el valor en la red, con el que se logró desarrollar una metodología que incluye 5 etapas: 1) Definir la red, 2) definir e identificar las entidades en la red, 3) definir el valor que percibe cada entidad al ingresar a la red, 4) identificar y diseñar un mapa de las influencias o vínculos en la red, 5) analizar y dar forma a la red (*Peppard & Rylander, 2006*).

Otros enmarcamientos clasifican a las redes por la forma en como crean oportunidades, ya sea de tipo vertical, horizontal o diagonal (*Pil & Holweg, 2006*), otros estudios clasifican las redes según: 1) el negocio actual, 2) por renovación de negocios y 3) por el surgimiento de nuevos negocios (*Möller & Rajala, 2007*), también se ha desarrollado reglas normativas para decidir cómo repartir los beneficios de la red para reducir costos de transacciones y/o producción (*Jarimo, 2008*).

En este punto es importante hacer la distinción entre cadena de valor, clúster, red, red de valor y ecosistema de negocio (*Peltoniemi, 2004*): 1) Clúster o agrupamiento está vinculado a concentraciones geográficas de empresas que dan origen a relaciones verticales y horizontales entre las empresas, localizadas en una región específica alrededor de una entidad líder, estas son sus dos principales características, 2) la cadena de valor se refiere al flujo secuencial de un proceso de transformación en una industria, mientras que la red de valor implica conectividad de multidimensional, 3) la red de valor está concentrada en la creación de valor en cada nodo o entidad que participa en la red, y no se considera ligada a una cierta región, incluso puede ser global y las industrias que se encuentran dentro de una red de valor puede ser parte de diferentes industrias o utilizar segmentos de sus procesos y 4) un ecosistema de negocios es el trabajo co-operativo que basado en competencia y cooperación que puede sostenerse a sí mismo sin intervención externa. (*Peltoniemi, 2004*).

### **Red de valor para crear innovación.**

La identificación y el control de los factores de la red, la coherencia operacional, el tamaño correcto de la red y la diversidad para generar innovaciones puede lograr materializar una propuesta de valor (*Dumitraşcu et al. 2014*), los modelos para para crear valor promueve que las cadenas de valor evolucionen a estructuras más robustas para la formación de redes de valor (*Kothandaraman & Wilson, 2001*), es decir la red de valor aumenta la eficiencia del valor que ha sido creado en la cadena de valor (*Oksanen et al., 2010*).

Se han realizado propuestas bajo un enfoque basado en simulación de eventos discretos de una red de valor con diferentes escenarios de inversión, concluyendo que la optimización y la simulación de sistemas de producción estocásticos dinámicos con variables continuas y discretas son una alternativa práctica para hacer frente a las incertidumbres y los riesgos asociados en el diseño conceptual o reestructuración de redes de valor (*Schlegel, 2006*).

Una red de valor incluye toda la gama de procesos en una cadena de valor, incluidas todas las etapas de una cadena de suministro y aquellas relacionadas con el desarrollo de productos, incluyendo I + D, innovación, diseño de producto, ingeniería, transición, y las actividades relacionadas con los clientes de marketing, ventas y servicio (*Osuna & Tuokko, 2006*).

Se han desarrollado modelos genéricos de simulación para sistemas de manufactura y producción para entidades que participan en una red de valor, concluyen que faltan modelos de simulación que permitan analizar y resolver problemáticas a diferentes escalas organizacionales (*Osuna & Tuokko,*

2006), se hace énfasis en que las empresas tienen necesidad de herramientas que ayuden a mejorar la toma de decisiones en la gestión de redes de valor complejas de tipo adaptativo.

Se han utilizado análisis de red de valor basado en Inversiones sostenibles y responsables (SRI), para representar los valores de intercambio directo e indirecto de los inversionistas involucrados en la red (Turki, 2012), permitiendo aumentar la eficiencia de la estrategia de negocio (Håkansson & Snehota, 2006).

Las redes entre empresas pueden desarrollar procesos de valor agregado, a través de nuevos roles y funciones para las entidades que participan en la red en el ánimo de propiciar el desarrollo de una organización innovadora. (Wiendahl & Lutz, 2002).

### 3.2. Bioenergía y Biomasa

Diversos estudios han analizado y comprobado la eficacia de la utilización de los residuos orgánicos (biomasa) en plantas de generación de energía para aumentar su rentabilidad de las empresas.

#### **Uso energético de la paja**

La dificultad para generar bioenergía a partir de paja radica en la falta de conocimiento para estimar con qué calidad y características de biomasa son idóneas para producir bioenergía. En países como Estados Unidos, Brasil, Inglaterra, India, Reino Unido, entre otros, se realizan aplicaciones industriales de combustión de biomasa en calderas de alta presión logrando beneficios económicos, sociales y ambientales (Saidur *et al.* 2011), existen plantas de generación eléctrica que van de los 3MW hasta los 38.5 MW utilizando paja como combustible (E.P.R., 2012) (UNFCCC, 2012) y otras que aplican digestión anaeróbica para producir biofertilizante, biogás y energía eléctrica. (UNFCCC, 2012)

Algunos estudios comparan la producción de energía utilizando combustión y digestión anaeróbica para determinar el potencial energético de la biomasa (Karaj *et al.* 2010) a través de diversos tipos y experimentos para sustituir fuentes de energía no renovables en plantas industriales (McKendry *et al.* 2002-1) identificando las ventajas de su conversión energética (McKendry *et al.* 2002-2).

El control automático en el sistema de enfriamiento evaporativo al interior de la granja, asegura una efectiva remoción del agua excedente en la cama del ave, evitando que exceda los 250 gramos de agua por cada kilo de paja (Collet *et al.* 2012, Ferreira *et al.* 2012), permitiendo un balance hídrico y alimenticio que mejora la salud y el confort del ave.

Si se utiliza pollinaza para combustión se recomienda que el residuo este seco (*Serio et al. 2003*), o sea inferior al 25% de contenido de humedad para quemarse en una caldera (*Abelha et al. 2003*) (*Martin et al. 2002*), con el 10% de humedad se logra 2,942.5 kcal/kg (*Whitely et al. 2006*) y con la función  $\text{kcal/kg} = 3,495.9 - 32.6 * (\% \text{ de humedad})$  se determina el poder calorífico a distintos niveles de humedad. (*Dávalos et al. 2002*).

La necesidad de desarrollar cadenas de valor de tipo bioenergético se logra un mayor desarrollo tecnológico de manera sustentable en las industrias (*Taylor et al. 2008*) al desarrollar alternativas para aprovechar la pollinaza, como sucede con la digestión anaeróbica para producir biogás y la combustión de la pollinaza para producir vapor y energía eléctrica (*Kelleher et al. 2002*).

Estudios realizados en México indican que es posible transformar los residuos industriales, agrícolas y ganaderos (*Sacramento-Rivero et al. 2010*) haciendo posible transformar la biomasa en diversos productos de valor agregado como bioenergéticos y bioproductos altamente competitivos.

Existen factores políticos, de regulaciones gubernamentales, medioambientales, económicos, de mercado, de inversión, y de tecnología que influyen para determinar los beneficios y riesgos asociados a la generación de energía (*Sondreal et al. 2001*), y la localización de la planta energética que debe estar cerca de las granjas para reducir el costo de transporte (*Quiroga et al. 2010*).

#### **Uso energético de lodos residuales.**

La conservación y reúso del agua potable y no potable en las industrias procesadoras de aves es un área de oportunidad para reducir costos y generar competitividad; una de las dificultades para lograrlo es la caracterización de los efluentes que deben ser tratados y separados para otros usos, identificando y cuantificando las sustancias o elementos que contienen para evitar poner en riesgo la salud pública (*Matsumura & Mierzwa, 2008*), con un índice de consumo de agua que se debe ubicar entre 8 y 15 litros por ave procesada.

Los desechos y lodos residuales provenientes de las plantas procesadoras de aves, pueden ser tratados por digestión anaeróbica térmica para producir energía y recuperar material orgánico para su producción.

Los sólidos orgánicos pueden ser aprovechables entre un 85% y 90%, en el procesamiento de aves se genera el 2% de cangre sobre el peso por pollo equivalente a 40 gr. por pollo, un 10% de pluma sobre el peso del pollo procesado equivalente a 180 gramos, un 6.9% representa el pescuezo y la cabeza equivalente a 80 gramos, un 4.4% las patas equivalente a 120 gramos y un 10% las vísceras



respecto al peso del pollo equivalente a 180 gramos, los retazos de carne y hueso representan 140 gramos, y el resto las piezas de carne de pollo seleccionado que representa 1.4 kilogramos, listo para ser vendido (*Salminen & Rintala, 2002*).

Las aguas residuales de las industrias avícolas contienen altas concentraciones de materia orgánica, sólidos suspendidos, grasas, nitrógeno y fósforo. Su composición y flujo generalmente varían dependiendo del proceso industrial, tamaño de las instalaciones, número de aves sacrificadas, eficiencia de recolección de sangre y subproductos, consumo de agua por pollo procesado y manejo del agua en el proceso industrial (*Caldera et al., 2010*).

La tecnología “Digestión anaerobia-térmica con dualidad de operación” sirve el aprovechamiento energético de lodos residuales con alto contenido orgánico (*Méndez et al. 2007*) utilizando procesos mesofílicos y termofílicos (*Méndez et al. 2009*) pre-hidrolizados. El rendimiento de biogás generado por lodos residuales se ubican entre 0.7 y 0.9 m<sup>3</sup> metano por cada kilogramo de sólido total volátil, con máximos de 1.1 m<sup>3</sup> de biogás equivalente a 0.825 m<sup>3</sup> de metano por cada kilogramo de sólido total volátil removido. (*Méndez et al. 2012*)

La digestión anaerobia es el único proceso de tratamiento que brinda como subproducto bioenergía en forma de biogás, para convertir biomasa en energía, o visto de otra manera convertir biológicamente un compuesto orgánico en biogás con altas concentraciones de metano, en menor proporción dióxido de carbono, y en pequeñas proporciones de nitrógeno, hidrógeno, ácido sulfhídrico y oxígeno (*Formentini, et al., 2011*).

### **Uso energético de los residuos agrícolas de cosecha (RAC).**

El futuro para desarrollar, usar, intercambiar, producir tecnologías y cultivos que representen una fuente de energía renovable, como son los cultivos ricos en azúcares y semillas oleaginosas, los pastos perennes, la madera, la macroalgas, y residuos agrícolas, industriales, forestales y municipales.

El problema de los agricultores al final de ciclo de cosecha o al inicio de cada nuevo ciclo de cultivo son los problemas relacionados para deshacerse de los desechos agrícolas que quedaron sobre la superficie del campo y que regularmente terminan quemándolo.

La eliminación de residuos en el campo a través de la quema es considerado como una pérdida económica y tiene efectos perjudiciales al medio ambiente, como la emisión de gases efecto

invernadero y contaminantes al aire, la reducción microbiológica del suelo (*Hussein & Sawan, 2010*).

El uso de modernas tecnologías para lograr un desarrollo sustentable que permitan que los desechos puedan ser tratados para: 1) producir composta, 2) producción para alimento animal, 3) producción de alimentos, y 4) fines energéticos como la producción de biogás u otro tipo de energía.

En países mediterráneos realizan la recolección de residuos de la poda de los árboles de aceitunas para ser utilizada como biomasa energética (*Spinelli & Picchi, 2010*), ayuda a reducir costos de operación y producción.

La esperanza que existe en los biocombustibles como recursos de energía renovable depende de la selección y producción de tecnologías, se presenta un enfoque sobre el costo social y medioambiental para las empresas puede ser mejorado con el desarrollo y uso de la próxima generación de combustibles de materias primas (desechos agroindustriales de biomasa) y la producción de tecnologías para aprovecharlas. (*Koh & Ghazoul, 2008*).

Las aplicaciones de biomasa para la producción de energía en los últimos años se ha intensificado su uso alrededor del mundo, la quema de la pre-cosecha de la caña de azúcar y la quema de los residuos de caña antes de la siembra está empezando a prohibirse (*Moreira & Goldemberg, 1999*).

La quema de la caña de para realizar cosecha mecanizada de caña de azúcar en verde ha ido disminuyendo, permitiendo recolectar los residuos más eficientemente para ser usados por tecnologías de combustión más eficientes para cogenerar calor y electricidad para autoconsumo, sustituyendo la quema de combustibles fósiles (*Lébre La Rovere, et al., 2011*).

Las razones para que un país implemente tecnologías o estrategias a fines es que exista la apertura de subsidios o incentivos al impuesto para implementar proyectos industriales para el aprovechamiento de residuos con fines energéticos (*Wright, 2006*).

### 3.3. Inteligencia Artificial

La inteligencia artificial (I.A.) se utiliza para clasificar, controlar y predecir el comportamiento del sistema no lineal (*Chen et al., 2008*), la lógica difusa (LD) utiliza datos obtenidos de las entrevistas con los expertos son imprecisos (*Zadeh, 2008*), y una red neuronal artificial (RNA) utiliza el registro de datos estadísticos de las variables de control. (*Lakhankar et al. 2006*).

### **Redes neuronales artificiales**

Para conocer el patrón de comportamiento de una variable se hace uso de herramientas sofisticadas de predicción como las redes neuronales artificiales (RNA) que son modelos matemáticos que permiten determinar el patrón de comportamiento de un sistema real complejo, para predecir variables de respuesta con un alto desempeño.

Las redes neuronales artificiales (RNA) han ayudado a determinar la eficiencia de combustión de pollinaza en una caldera en operación (*Zhu et al. 2007*), pero no se ha investigado sobre el contenido de humedad de la pollinaza desde que se genera en la granja, es decir, antes de ser utilizada en la caldera.

Se ha aplicado RNA para controlar las condiciones de medioambiente y las variables de entrada al sistema ayuda a estabilizar el proceso de producción permitiendo regular las características de calidad de la variable de salida (*Lee et al. 2000*) (*Chegini et al. 2008*), permitiendo optimizar y predecir el comportamiento del ambiente dentro de un sistema (*Chen et al. 2008*), y mejora el desempeño de un proceso considerando factores de contenido de humedad y temperatura. (*Sablani et al. 2003*).

### **Lógica Difusa**

En el caso de Lógica Difusa (LD) existen aplicaciones para predecir la eficiencia de combustión en una caldera en operación regulando la cantidad de dosificación, el porcentaje mezclado y la humedad de la pollinaza, el exceso de aire y el aire secundario durante su combustión (*Zhu et al. 2007*), las técnicas de inteligencia artificial permiten controlar las variables para mejorar las condiciones de operación del ambiente de un sistema y su entorno (*Lee et al. 2000*, *Batayneh et al. 2010*, *Das et al. 2013*).

La lógica difusa ha sido utilizada para la toma de decisiones que maximizan el retorno de la inversión (*Zhang, 2012*) y como método de evaluación para determinar costos de capital cuando existe incertidumbre y riesgo en las inversiones (*Karanovic et al., 2012*), para el desarrollo de empresas de ciencia y tecnología agrícola (*Wang et al., 2012*).

Ha servido para la selección de la estrategia de transferencia de tecnología utilizando un modelo de decisión difuso multicriterio (*Chang & Cheng, 2003*), asignando valores subjetivos con información de los expertos para asignar ponderaciones a diferentes alternativas estratégicas para transferencia de biotecnología en las empresas.

Algunos estudios aplican LD cuando la complejidad del proceso y/o sistema es muy alta, y no existen modelos matemáticos precisos, para procesos altamente no lineales o cuando no tienen solución, generando una decisión difusa multidimensional (*Jiang & Chen, 2005*), esto sirve para desarrollar estrategias multiobjetivo y decisiones multietapas para la toma de decisiones estratégicas de grandes sistemas.

### **Algoritmos Genéticos**

Los algoritmos genéticos (AG) nos permiten resolver problemas complejos de búsqueda y optimización, inspirados en la naturaleza y específicamente en el proceso evolutivo de los seres vivos. Estudios de optimización de procesos de producción aplican algoritmos genéticos porque están basados en un algoritmo matemático evolutivo altamente efectivo (*Koza, 1992*) que buscan maximizar el valor de un sistema.

Los AG combinan la ley del más fuerte entre estructuras de cadenas con intercambio de información estructurada y aleatoria para formar un algoritmo de búsqueda, en cada generación, es creado un nuevo conjunto de elementos artificiales usando bits y utiliza los mejores resultados de las réplicas anteriores; eficientemente explotan la información histórica de cada réplica para generar nuevos puntos de búsqueda con mejores resultados en cada ejecución (*Goldberg, 1988*).

### **Conclusiones**

En el presente capítulo se realiza una búsqueda del estado del arte relacionado a temas de bioenergía, estrategias de negocios, cadenas y redes de valor para determinar la aportación al conocimiento de la presente investigación.

Son prácticamente inexistentes las redes de valor que utilizan herramientas sofisticadas de evaluación debido a la complejidad y tiempo que se requiere para modelar redes de valor no lineales, la mayoría de los estudios encontrados se limitan a modelar comportamientos de tipo lineal.

Las redes de valor documentadas son pocas, limitadas y muy teóricas sin llegar a la aplicación industrial, en este sentido no se encontró evidencia documentada sobre el desarrollo de una red de valor con base a la gestión de bioenergía proveniente de residuos agroindustriales. Existe escasa información documentada de aplicaciones de redes de valor. No se encontró evidencia documentada de la aplicación de técnicas de inteligencia artificial relacionadas con el diseño, desarrollo y evaluación de cadenas y redes de valor.

## CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación utiliza un marco metodológico para evaluar la rentabilidad de producción de bioenergía proveniente de residuos agroindustriales de las cadenas de valor avícola y cañero – azucarera a través de un intercambio en una red de valor.

El proceso metodológico está dividido en dos secciones: 1) la metodología de análisis y evaluación de las cadenas de valor que producen la bioenergía e integran la red, y 2) la metodología para el desarrollo y análisis de una red de valor basada en intercambios de bioenergía. Ambas metodologías propuestas constan de 7 etapas para su desarrollo. Ambas metodologías ayudan a mejorar la toma de decisiones sobre las alternativas tecnológicas de transformación de biomasa para producir bioenergía y determinar su viabilidad de intercambio en la red de valor.

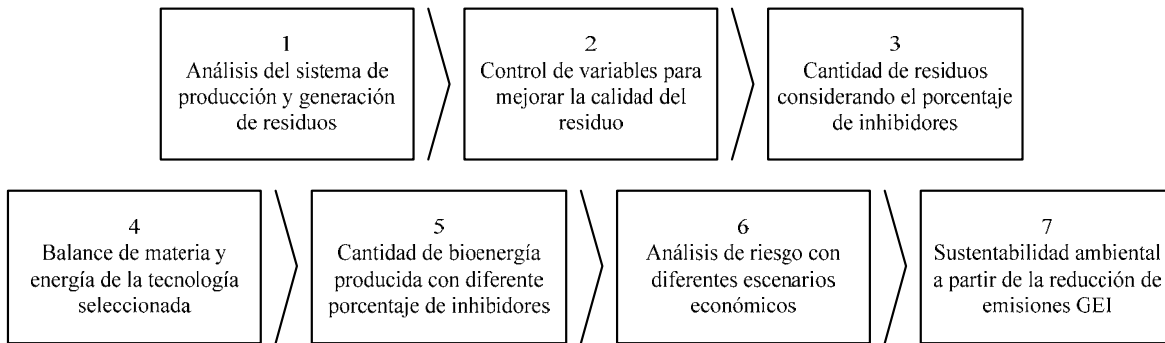
La metodología de desarrollo de la red de valor se utiliza para analizar la rentabilidad económica en conjunto y simultáneo de un determinado grupo de cadenas de valor que intercambian bioenergía, se utiliza para determinar estrategias de crecimiento económico en las empresas que forman la red y para innovar modelos de negocios a partir del uso sustentable de biomasa agroindustrial.

Las metodologías utilizan técnicas de inteligencia artificial, estadística, simulación Montecarlo en cada cadena de valor, análisis de riesgo económico y energético, para maximizar los beneficios del modelo de negocio.

### 4.1. Metodología de evaluación de la cadena de valor a través de 7 etapas

En los últimos años se ha despertado el interés de utilizar la biomasa proveniente de residuos agroindustriales (pollinaza, lodos residuales, bagazo y RAC) tienen un alto rendimiento energético que aún no se aprovecha por las industrias de los países en vías de desarrollo, el principal motivo es el desconocimiento en el uso de los residuos como biocombustible y de tecnologías de transformación apropiadas para generación de bioenergía.

La metodología propuesta en Figura 6 ayuda a determinar el máximo aprovechamiento energético de los residuos considerando los factores que perjudican o mejoran la calidad del residuo y de las variables que puedan inhibir su rendimiento energético.



**Figura 6. Metodología de evaluación de 7 etapas para estimar la bioenergía**

En la Figura 6 se presentan las 7 etapas de la metodología, en ellas: 1) se realiza un análisis del sistema de producción de la cadena de valor, 2) se controla la calidad del residuo que se genera en cada cadena de valor, 3) se estima la cantidad de los residuos agroindustriales considerando factores que inhiben su rendimiento energético, 4) se realiza un balance de materia y energía con tecnología de combustión o digestión, según sea el caso para cada cadena de valor, 5) se determina la producción de bioenergía del sistema (térmica y eléctrica) en cada cadena de valor, 6) se realiza un análisis de riesgo con diferentes escenarios para estimar la rentabilidad económica al producir bioenergía en la cadena de valor, y al final 7) se evalúa la sustentabilidad ambiental con reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente de cada cadena de valor.

### 1) Análisis del sistema que produce los residuos

Esta primera etapa comprende el análisis del sistema de los tipos de residuos y como se generan en cada una de las cadenas de valor en estudio.

En el análisis del sistema avícola para la obtención de la “pollinaza” se estudia: la producción de pollos de engorde en las granjas (hembras, machos, mixtos, densidad por metro cuadrado), el ciclo de producción de pollos de engorde (periodo según el tipo de estirpe del ave), el control del ambiente en el interior de la granja que afecta la calidad de la pollinaza, la tecnología que maximiza la generación de bioenergía con la pollinaza a diferentes contenidos de humedad y el costo de la biomasa que se utiliza como biocombustible.

En el análisis del sistema avícola para la obtención de “lodos residuales” se estudia: el sistema de procesamiento de pollos de engorde en el interior de la planta procesadora de aves (equipamiento), el proceso de producción para estimar el volumen de producción por tipo de pollo procesado (lotes

de producción por tipo de pollo), los tiempos del procesamiento por área y por tipo (operación), las mermas del procesamiento y se estima la cantidad y calidad de los efluentes producidos.

En el análisis del sistema cañero – azucarero para la obtención de “residuos agrícolas de cosecha de caña (RAC)” y bagazo, se estudia: la cantidad de lluvia que afecta a la recolección del RAC en el campo, el rendimiento de producción de caña por hectárea, la superficie del cultivo por tipo de cosecha a realizar, y el costo de la biomasa.

## **2) Control para mejorar la calidad del residuo**

En esta segunda etapa se presenta la forma de controlar la calidad de los tipos de residuos para cada una de las cadenas de valor en estudio, con el objetivo de que el residuo tenga las mejores condiciones para su transformación energética.

En la etapa de control para mejorar la calidad de “pollinaza” en la cadena de valor avícola se aplican técnicas de inteligencia artificial como la lógica difusa (LD) y las redes neuronales artificiales (RNA) con el objetivo de analizar el patrón de comportamiento de las variables que influyen en el contenido de humedad de la pollinaza, para así, determinar el mejor conjunto de prácticas avícolas que permiten reducir la humedad en la pollinaza para que sea viable su combustión. Se realiza un análisis comparativo entre los resultados obtenidos por ambas técnicas para evaluar el desempeño de las mismas, al determinar el conjunto de prácticas avícolas que optimicen el nivel de la humedad de la pollinaza.

Para mejorar la calidad de los “lodos residuales” en la cadena de valor avícola se utiliza la técnica de simulación Montecarlo, con su aplicación se logra un análisis del consumo del agua en el interior del proceso por tipo de pollo procesado y de las áreas de servicio en la planta procesadora, se determina la producción de residuos sólidos y líquidos que se generan y se estima el volumen de mermas retenidas que se utilizan para recuperar harinas y aceites, esto permite estimar el flujo por tipo de elemento que forman los efluentes y el flujo de lodos residuales a lo largo del proceso.

Para mejorar la calidad de recolección de los “residuos agrícolas de cosecha de caña (RAC) y bagazo” en la cadena de valor cañero – azucarera, se utiliza la técnica de simulación Montecarlo, con su aplicación se logran evaluar los tiempos perdidos de operación de recolección, se determina el índice de rendimiento de toneladas de RAC recolectadas por hectárea, se establece el diseño del fardo del RAC para optimizar el espacio de carga durante su transporte, se establece la logística de la programación y sincronización de los equipos de recolección. Con el análisis anterior se

determina el flujo de recolección y almacenamiento del RAC hacia el ingenio considerando diferentes contenidos de humedad en el RAC y el bagazo.

### **3) Producción de residuos considerando inhibidores de rendimiento energético.**

En la etapa tres se estima la cantidad de biomasa disponible para ser utilizada como materia prima para generar bioenergía en cada una de las cadenas de valor en estudio.

En la cadena de valor avícola utilizando “pollinaza”, se estima el volumen de biomasa a utilizar con las mejores características físicas a partir del mejor conjunto de prácticas avícolas (determinadas por las técnicas de inteligencia artificial). Se desarrollan diferentes escenarios de acuerdo al contenido de humedad presente en la pollinaza, permitiendo aumentar o reducir la energía a producir durante su utilización a través de la simulación Montecarlo.

En la cadena de valor avícola utilizando “lodos residuales” se evalúa: la decantación de los residuos en cada etapa del proceso, la cantidad de cloro y colorante que es vertido al proceso y que afecta al rendimiento de biogás obtenido de la digestión anaeróbica de los lodos residuales, la cantidad de agua industrial utilizada en el procesamiento y en consecuencia el flujo del lodo residual por medio de simulación Montecarlo.

En la cadena de valor cañero – azucarera utilizando “residuos agrícolas de cosecha de caña (RAC) y bagazo” se estima la producción de caña y superficie por tipo de cosecha utilizando el rendimiento logístico de recolección del RAC, para estimar el volumen de biomasa que se utiliza para combustión para producir vapor y energía eléctrica por tipo de residuo, a partir de simulación Montecarlo.

### **4) Balance de materia y energía del residuo por tipo de tecnología.**

En esta etapa se realiza un balance de la materia y energía producto de la transformación energética de la biomasa considerando las características de operación de los equipos de generación de energía en cada una de las cadenas de valor en estudio.

Se realiza el balance de materia y energía de “pollinaza” en la cadena de valor avícola utilizando la tecnología de combustión, se efectúan pruebas de laboratorio con muestras obtenidas en el interior de las casetas de pollo de engorde. Con los resultados de laboratorio se determina el contenido de humedad, el análisis del poder calorífico, la materia orgánica volátil, el carbón fijo, el carbono, el hidrogeno, el oxígeno, y se realizan los análisis de composición elemental, proximal y de cenizas de la pollinaza, para estimar el contenido energético a diferente contenido de humedad a través de



ecuaciones térmicas para determinar la transformación de biomasa a vapor y electricidad considerando parámetros de presión, temperatura y flujo de vapor en la caldera de alta presión de lecho fluidizado y en el turbogenerador de condensación.

Se realiza el balance de materia y energía de “lodo residual” en la cadena de valor avícola, en las que se efectúan caracterizaciones de la calidad del lodo residual con un reactor prototipo de laboratorio a partir de muestras del lodo residual de la planta procesadora de aves, se realizan análisis de factores fisicoquímicos, bioquímicos y microbiológicos, se obtiene el rendimiento de biogás al 75% de concentración de metano del lodo residual, y se logra estimar el poder energético en kilocalorías por metro cubico producido. Para validar el sistema se realiza un escalamiento industrial de la tecnología, con parámetros y diseños a escala real.

Se realiza el balance de materia y energía de “residuos agrícolas de cosecha de caña (RAC) y bagazo” en la cadena de valor cañero – azucarero, en él se efectúa un análisis de laboratorio que incluye un análisis de composición elemental, proximal y de composición de cenizas resultantes, para determinar el contenido de material volátil, de carbón fijo, de carbono, de hidrogeno y de oxígeno presente en el RAC (es importante señalar que el RAC y el Bagazo tienen la misma composición física y química), y se estima el poder calorífico del Bagazo y del RAC a diferente contenido de humedad con simulación Montecarlo.

Con la tecnología de combustión se diseña la capacidad del flujo de generación de vapor en las calderas, considerando presión y temperatura con un margen de seguridad del 35% y una eficiencia de generación al 83%, posteriormente se estima la eficiencia de los turbogeneradores eléctricos a comprar basados en el índice de consumo de vapor e índice de producción de energía eléctrica.

Con la estimación del flujo de vapor en calderas y turbogeneradores se estima la inversión del sistema de cogeneración para la evaluación económica, basado en el flujo de vapor de los equipos y los días de operación.

##### **5) Producción de bioenergía por tipo de residuo.**

La etapa cinco comprende la estimación en la producción de bioenergía (vapor, electricidad, biogás y cenizas) de cada una de las cadenas de valor en estudio.

Para la producción de bioenergía con “pollinaza” en la cadena de valor avícola se aplican análisis de factibilidad del balance de energía a través de la simulación Montecarlo utilizando las variables de

operación del sistema de combustión para estimar el rendimiento de producción y consumo de energía en los equipos industriales que transforman la pollinaza en vapor para producir electricidad.

Para la producción de bioenergía con “lodo residual” en la cadena de valor avícola se estima la producción de biogás en concentraciones del 75% de metano y biofertilizante para cultivos agrícolas. Se utiliza simulación Montecarlo para determinar el flujo de biogás que se genera para producir energía eléctrica.

Para la producción de bioenergía con “residuos agrícolas de cosecha de caña (RAC) y bagazo” en la cadena de valor cañero – azucarera se realizan estimaciones de flujo de vapor para producir de manera anual alineados a una estrategia de crecimiento de caña de azúcar de las cadenas de valor de la cual se obtienen los residuos de RAC y Bagazo. Se proponen diferentes segmentos sobre la utilización y aprovechamiento del vapor y producción de energía eléctrica para autoconsumo y excedentes en zafra y no zafra.

#### **6) Análisis de riesgo para estimar la rentabilidad económica del residuo agroindustrial**

La etapa seis comprende la estimación económica derivada de la producción de bioenergía en cada una de las cadenas de valor en estudio, para determinar su viabilidad de negocio.

En el análisis de riesgo económico en la cadena de valor avícola utilizando “pollinaza” para producir vapor, energía eléctrica y biosólidos, utiliza un análisis de sensibilidad que maximiza la bioenergía de la pollinaza con diferente porcentaje de humedad, se estiman las inversiones que se requieran para transformar la pollinaza en energía eléctrica a partir del mejor conjunto de prácticas avícolas. Se estiman los ingresos y costos del sistema de generación para realizar los flujos financieros que permitan estimar la viabilidad económica del modelo de negocio a partir de la utilización del valor presente neto y de la tasa interna de retorno.

En el análisis de riesgo económico en la cadena de valor avícola utilizando “lodo residual” para producir biogás y energía eléctrica se realiza el escalamiento industrial de digestión anaeróbica termofílica con dualidad de operación de los lodos residuales. Se determina la inversión inicial y se evalúa la rentabilidad económica a través del valor presente neto y la tasa interna de retorno sobre la utilización del biogás para producir energía eléctrica y biofertilizante.

En el análisis de riesgo económico en la cadena de valor cañero – azucarera utilizando “residuos agrícolas de cosecha de caña (RAC) y bagazo” para producir vapor y energía eléctrica se utiliza el precio de venta del megawatt-hora o su equivalente de kilowatt-hora, los costos eléctricos, y el

precio de venta de las cenizas para determinar los flujos económicos en el periodo de zafra y no zafra. Lo anterior se aplica para determinar el valor presente neto y la tasa interna de retorno que determina la rentabilidad del sistema de cogeneración eficiente.

En todas las cadenas de valor se evalúa su rentabilidad con los indicadores de periodo de recuperación, tasa interna de retorno, valor presente neto con un horizonte de planeación de 10 y 25 años con una tasa de descuento del 10%.

#### **7) Sustentabilidad ambiental con reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente**

En la etapa siete “sustentabilidad ambiental de gases efecto invernadero (GEI)” se estima el volumen de toneladas de dióxido de carbono equivalente que se mitigan al medio ambiente por generación de energía eléctrica a partir de la transformación de los residuos agroindustriales en todas las cadenas de valor. Para la estimación se aplica el factor de emisión de gases efecto invernadero para México.

### **4.2. Metodología para el Desarrollo de Red de Valor basada en bioenergía a través de 7 etapas.**

La red de valor (RV) propuesta sirve para elevar la rentabilidad de las cadenas de valor (CV) que forman la red, a través del intercambio de bioenergía, en las secciones o conjunto de eslabones de la cadena de valor llamadas unidades estratégicas de negocio (UEN).

El desarrollo de la Red de Valor (RV) de esta investigación utiliza como referencia la metodología propuesta en el Análisis de Red de Valor (ARV) por Peppard & Rylander (2006) compuesta de 5 etapas.

La presente propuesta utiliza las 5 etapas de Peppard & Rylander e incluye adicionalmente dos etapas que permiten completar el proceso metodológico para crear una red de valor basada en bioenergía: 1) Definición de los objetivos de la red, 2) Identificación de los participantes de la red, 3) Identificación de las dimensiones de valor de los participantes de la red, 4) Definición de los vínculos de valor, 5) Análisis y modelado de la red, 6) Optimización y sensibilidad y 7) Escenarios y estrategias.

A continuación se describe la metodología para el diseño y desarrollo de la Red de Valor.

### **1) Definición del objetivo de la red**

Se define el propósito u objetivo por el cual se llevará a cabo el desarrollo de la red de valor y se definen las variables de intercambio, como son la producción y comercialización de energía eléctrica para uso industrial y biosólidos para cultivos agrícolas. El objetivo de la red propone establecer un nuevo modelo de negocio de bioenergía para aumentar la rentabilidad de las UEN.

### **2) Identificación y definición de los participantes de la red.**

Se definen las entidades, las empresas y las unidades estratégicas de negocio (UEN) que son parte de las cadenas de valor (CV) y producen biomasa proveniente de residuos agroindustriales. La CV avícola tiene dos UEN's que son la planta procesadora de aves y las granjas de producción de pollo de engorde, y la CV cañero – azucarera tiene seis UEN's que son los tres ingenios azucareros y las tres empresas agrícolas proveedoras de caña.

En la red de valor se agrupan y se alinean las unidades estratégicas de negocio conforme al tipo de residuos y bioenergía producida. En esta etapa se determinan las entidades que producen (oferta) o consumen (demanda) el valor de intercambio como son los diferentes tipos de biomasa y bioenergía, estableciendo los mecanismos de cómo operan las empresas en red.

### **3) Identificación de las dimensiones de valor de los participantes de la red.**

En esta etapa se debe tener una idea clara de la cantidad y flujo de residuos, bioenergía y biosólidos que se intercambiarán en la red de valor, así como de la magnitud de las inversiones requeridas para garantizar la oferta y suministro hacia otras empresas. Las características físicas y químicas que tienen los residuos agroindustriales son determinantes para definir la calidad y la cantidad de valor (bioenergía y biosólidos) que aportan los integrantes de cada cadena de valor.

Por ello, es importante conocer los procesos industriales de transformación en las unidades estratégicas de negocios de las cadenas de valor, para mejorar las características de los residuos y se alcancen altos parámetros de calidad relacionados con el contenido de humedad y de materia orgánica con el fin de obtener altos rendimientos de energía liberada para su intercambio con otras empresas.

La experiencia, el conocimiento o la comunicación son características que intervienen en el intercambio de valor intangible y ayudan al objetivo de los valores tangibles.

#### **4) Definición de los vínculos de valor.**

La representación de las cadenas de valor está dada por los vínculos existentes entre las unidades estratégicas de negocio (UEN) y representan el intercambio de valor al interior de la red. Los nodos de transformación de biomasa hacen posible la entrega de bioenergía y biosólidos entre las unidades estratégicas de negocio (UEN) que forman la red, a su vez los nodos que reciben y hacen uso de la bioenergía entregan valor monetario como intercambio por la compra. En este sentido se representan las relaciones comerciales o flujos existentes de intercambio de valor tangible (bioenergía y biosólidos) asociado a un valor monetario.

#### **5) Análisis y Modelado de la Red de Valor.**

La estructura final de una red de valor fusiona e integra los flujos de valor de bioenergía y monetarios entre los eslabones o unidades estratégicas de negocio de cada una de las cadenas de valor, en esta etapa se ponen en funcionamiento los modelos que representan la operación de los procesos energéticos y los enlaces de bioenergía entre los nodos de producción y consumo de manera simultánea de cada cadena de valor.

Esta etapa permite visualizar el flujo de los intercambios de valor que se producen entre cada unidad estratégica de negocio y/o nodo a través de un diagrama de red formalmente constituido a partir de un modelo de simulación Montecarlo que permite transformar valor tangible (bioenergía) en valor económico proporcionando un fuerte impulso de innovación.

#### **6) Optimización y Sensibilidad.**

La optimización simultánea del sistema de producción de bioenergía en la red de valor permite elevar los ingresos económicos a partir de un aumento en el aprovechamiento y rendimiento de bioenergía derivado de la transformación de la biomasa en las cadenas de valor que intervienen.

La optimización se realiza con todos los nodos conectados de manera simultánea incluida la secuenciación de los procesos de transformación y producción en el interior de las cadenas de valor, se maximizan los ingresos económicos de la bioenergía utilizando valor presente neto y la tasa interna de retorno, a través de algoritmos genéticos optimizando modelos matemáticos.

Se realizan análisis de sensibilidad para valorar las inversiones ante una posible variación en los elementos y las variables inciertas que determinan el comportamiento del sistema y la rentabilidad de la producción de bioenergía en cada cadena de valor que se intercambia en la red de valor.

## 7) Escenarios y Estrategias.

Una red de valor constituida debe generar estrategias para aumentar el valor de los negocios que se crean a partir de su integración, para lograrlo se requiere de la presentación de diferentes escenarios para observar el comportamiento de la red de valor ante cambios en sus variables con el fin de mostrar escenarios optimistas y pesimistas, considerando fluctuaciones como son: los precios de la biomasa (residuos), los precios de la energía eléctrica y los biosólidos que se comercializan, así como los montos de inversión relacionados con la tecnología utilizada y las variables que afectan el comportamiento de la eficiencia y rendimiento de generación de bioenergía en los equipos del sistema tecnológico.

El análisis completo de la red de valor permite visualizar y entender mejor lo que está sucediendo en el sistema de intercambio de bioenergía, permitiendo mejorar la toma de decisiones y definir un plan de estrategias innovadoras al identificar donde se genera más valor (bioenergía) con altos beneficios económicos, esto sirve para establecer las medidas requeridas para utilizar mejor el dinero de los inversionistas.

## Conclusiones

En este capítulo se presenta el diseño de dos metodologías que contribuyen al desarrollo y evaluación de las cadenas y redes de valor. La primera metodología está enfocada a las cadenas de valor para estimar la energía que es posible generar con la transformación energética de los residuos (pollinaza, lodo residual, bagazo y RAC) y la segunda metodología está enfocada a red de valor que gestiona intercambios de valor económico y energético entre las cadenas de valor.

La metodología de cadena de valor permite valorar la relación existente entre la biomasa producida en las cadenas de valor y la energía generada con tecnologías energéticas propuestas (digestión anaeróbica, combustión, generación y cogeneración).

La metodología de red de valor propone aumentar el nivel de innovación y la rentabilidad económica de las cadenas de valor a partir de modelos de negocios enfocados a la comercialización bioenergía y biosólidos provenientes de residuos agroindustriales.

Ambas metodologías propuestas pueden ser utilizadas por diversas industrias en distintos sectores de negocios debido a que las etapas de evaluación tienen la versatilidad para ser adaptadas a problemáticas distintas a la biomasa y bioenergía.

## CAPÍTULO 5. CADENAS DE VALOR AGROINDUSTRIAL

La biomasa residual que generan las empresas en las cadenas de valor es manejada como desperdicio agrícola e industrial y no es usado como combustible renovable, su utilización y aprovechamiento de manera energética permite a grandes grupos corporativos reducir los costos de producción y aumentar sus ingresos económicos.

En este capítulo se presenta la estructura de análisis de las cadenas de valor a través de una infografía, en ella se ofrece una visión gráfica de la metodología de evaluación de 7 etapas para la generación de valor. Se describe de manera breve la ejecución de cada etapa de manera general para cada una de las cadenas de valor que forman la red y se muestran los valores más representativos de cada etapa.

Las etapas de la metodología de evaluación de las cadenas de valor están representadas por círculos numerados del 1 al 7.

El detalle de los cálculos y la modelación matemática para realizar la evaluación de las siete etapas de cada cadena de valor se encuentra en la sección de anexos.

En el anexo 1 presenta la descripción detallada de los procesos de producción de las granjas de pollo de engorde donde se produce la pollinaza, el proceso de producción de la planta procesadora de aves donde se produce el lodo residual en el sistema de la cadena de valor avícola, y se presenta el proceso de producción de caña de azúcar y su transformación en azúcar estándar de la cadena de valor cañero – azucarera, obteniendo bagazo y residuos agrícolas cañeros (RAC). El objetivo de este anexo es que se conozca el proceso de producción industrial de las cadenas de valor, del caso de estudio.

Este caso de estudio es de un grupo corporativo de la región córdoba – Orizaba el cual pretende aprovechar los residuos del sector avícola y cañero – azucarero.

### 5.1. Estructura de análisis de la cadena de valor avícola utilizando pollinaza

Las siete etapas se representan en dos secciones, ver Figura 7 (etapa 1 y 2 de la metodología) y Figura 8 (Etapa 3, 4, 5, 6 y 7 de la metodología).

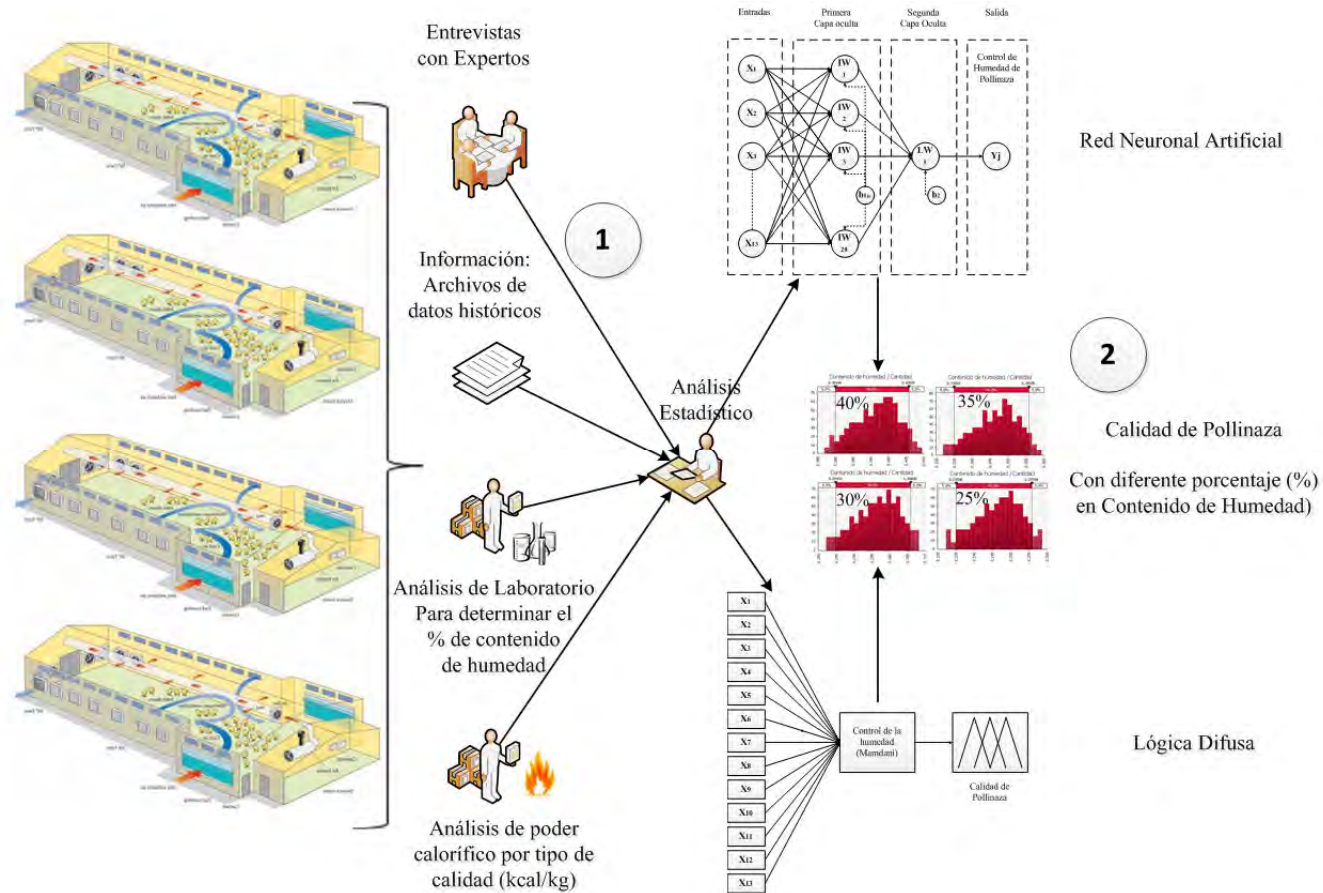


Figura 7. Estructura de la cadena de valor avícola, usando pollinaza (parte 1)



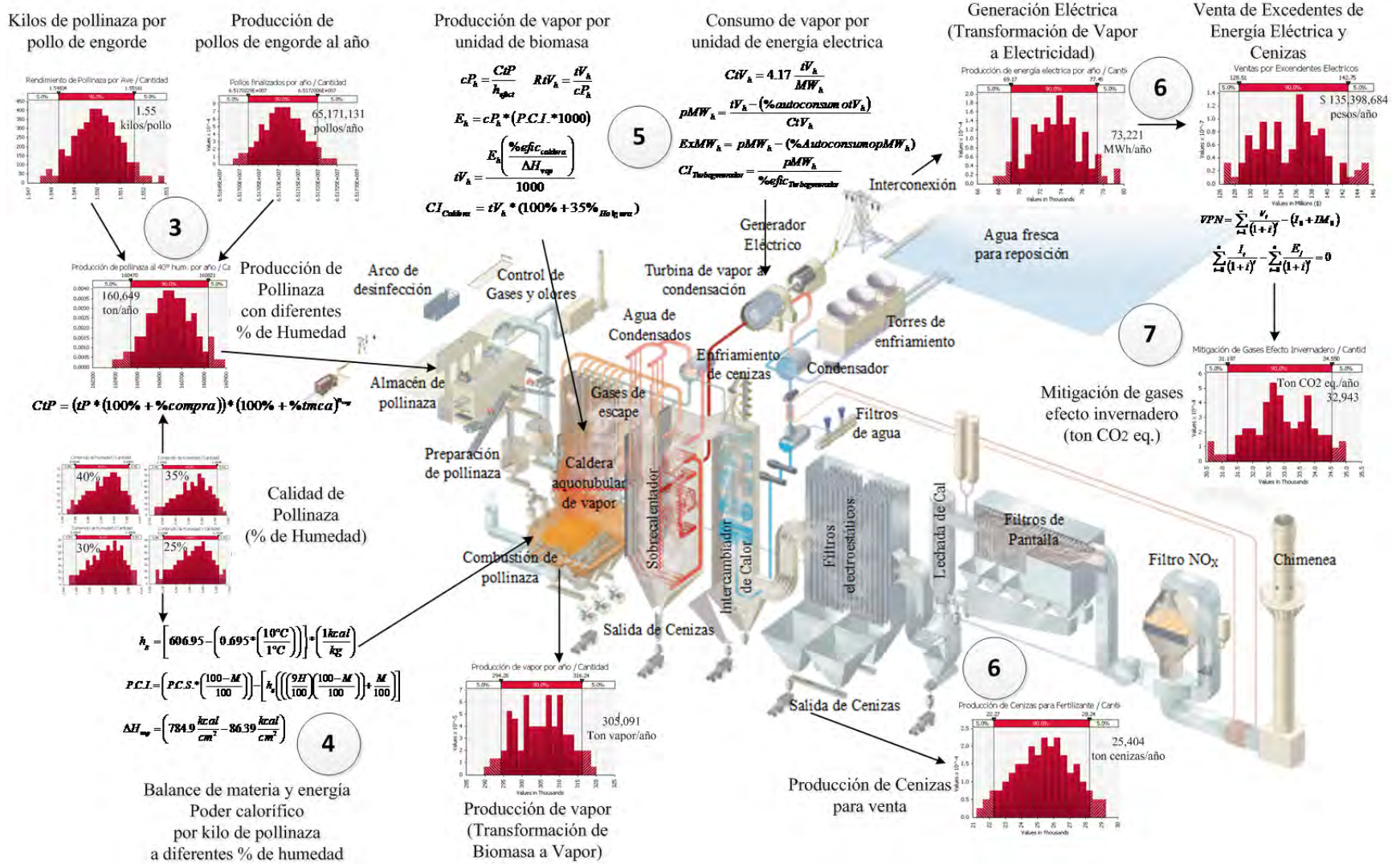


Figura 8. Estructura de la cadena de valor avícola, usando pollinaza (parte 2)

A continuación se presenta la descripción de las figuras anteriores especificando a detalle los pasos de la metodología aplicada a la cadena de valor de pollinaza:

### **1) Análisis del sistema de producción de pollinaza.**

En esta etapa es esencial conocer el proceso de producción de pollo de engorde, para definir las principales variables que afectan el comportamiento de la calidad y cantidad de la pollinaza al final del ciclo productivo y los factores que intervienen durante el crecimiento del ave en el interior de las granjas. En la sección 1.1.1 y en la 1.1.2 del Anexo 1 se encuentra la descripción del proceso de producción de pollo de engorde.

La calidad se clasifica en pollinaza seca cuando su humedad es baja, en pollinaza de primera cuando la humedad es media o aceptable, y pollinaza de segunda cuando la humedad que contiene es muy alta, esto se debe porque la calidad está directamente relacionada con la cantidad de humedad que contiene, es decir, una alta calidad se traduce en baja humedad y una muy mala calidad es una pollinaza con alto contenido de humedad.

El parámetro de calidad (humedad) afecta directamente al precio de venta, al rendimiento de kilos de pollinaza por pollo de engorde y a la energía calórica que puede ser liberada potencialmente con la combustión de la pollinaza; si se mejora la calidad de la pollinaza aumenta su precio y libera más kilocalorías por unidad de masa combustionada, esto es mayor generación de vapor y electricidad.

En la sección 2.1.1 del Anexo 2 se encuentran las distribuciones de probabilidad utilizadas para modelar el comportamiento de la producción, precio, gastos de operación de pollinaza por tipo y rendimiento energético del biogás.

Estos datos fueron obtenidos de muestras y registros estadísticos aplicando pruebas de bondad de ajuste para determinar su comportamiento a través de distribuciones de probabilidad, en algunos casos se utilizan distribuciones triangulares al no tener datos, recurriendo al conocimiento de los expertos para definir sus valores de comportamiento. Estos datos nos servirán para la etapa 3 para desarrollar los modelos de simulación.

En entrevistas con los expertos se determinan 13 variables que afectan el patrón de comportamiento de la pollinaza al final del ciclo de producción del pollo de engorde en las granjas, estas son: 1) la temperatura ambiente promedio, 2) los días de estancia, 3) la densidad de pollos por superficie, 4) la cantidad de extractores, 5) la cantidad de ventiladores, 6) la cubierta del techo, 7) el forro del techo, 8) el tipo de comedero, 9) el tipo de bebedero, 10) la existencia de nebulizadores/foggers, 11) la

existencia de sombreado, 12) el tipo de área en el interior de la caseta y 13) el manejo de la pollinaza por parte del operador (esta información se encuentra en la Figura 7)

Se cruzan los registros estadísticos de operación de las casetas donde se produce el pollo, con las características de los equipos en operación, se realizan 108 muestras obtenidas en el interior de las granjas para estimar la humedad presente en la pollinaza y su poder calorífico, estos valores sirven para alimentar los modelos de redes neuronales artificiales y lógica difusa de la etapa 2 permitiendo clasificar la calidad de pollinaza por su contenido de humedad.

En la sección 3.1.1 del Anexo 3 se encuentra el detalle del análisis del sistema de producción de pollo de engorde y el registro estadístico del comportamiento de las 13 variables que afectan la calidad en la pollinaza.

Es importante mencionar que antes de proponer la pollinaza para combustión se realizó un análisis preliminar para decidir que tecnología energética disponible en el mercado es más conveniente técnica y económicamente al utilizar pollinaza como materia prima, se presentan siete alternativas para su aprovechamiento en la sección 2.1.1.1 del Anexo 2 se presentan las distribuciones de probabilidad utilizadas en el modelo de simulación preliminar que justifica el uso de la combustión de pollinaza al obtener mayor rendimiento energético en comparación con la digestión de pollinaza.

## **2) Control de las variables para mejorar la calidad de pollinaza.**

En esta etapa se aplican las técnicas de redes neuronales artificiales (RNA) y lógica difusa (LD) para identificar el patrón de comportamiento del mejor conjunto de prácticas avícolas que permitan mejorar la calidad de la pollinaza, clasificándola en pollinaza seca, semi – húmeda y húmeda. Ambas técnicas utilizan el software Matlab para su programación a partir de las 13 variables de entrada. En la sección 3.1.2 del Anexo 3 se encuentra la aplicación completa de las técnicas de inteligencia artificial para controlar la humedad en la pollinaza.

La RNA es multicapa (2) de alimentación hacia adelante con entrenamiento de retropropagación, utiliza el algoritmo de entrenamiento Levenberg – Marquardt y la función de transferencia tipo Sigmoide. (Ver sección 3.1.2.1 del Anexo 3 donde se encuentra la aplicación de RNA)

El modelo de LD utiliza el método de inferencia tipo Mamdani, para realizar la defuzificación se aplica el método del Centroide, y se utilizan 67 reglas de inferencia tipo If – Then para su programación. (Ver sección 3.1.2.2 del Anexo 3 donde se encuentra la aplicación de LD)

Se utilizan 108 casos para efectuar la prueba, 86 casos para la verificación y 20 casos para la validación de ambas técnicas. La validación del modelo de RNA registra un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 92.88% y el modelo de LD registra un  $R^2$  de 92.91%.

Con los resultados de ambas técnicas se realiza una comparación para medir el desempeño de la predicción del comportamiento de las prácticas avícolas y controlar el contenido de humedad en la pollinaza que determina su calidad. (Ver sección 3.1.2.3 del Anexo 3 donde se encuentra la comparación de las técnicas de RNA y LD)

Los modelos de RNA y LD se utilizan para generar escenarios con salidas de humedad en 4 tipos de calidad: pollinaza con 25%, 30%, 35% y 40%, para utilizarse en el modelo de simulación Montecarlo. Las prácticas avícolas que hacen una mejor calidad en la pollinaza es el manejo, la densidad de pollos por metro cuadrado, la cantidad de extractores y ventiladores, ver anexo 3.1.2

### **3) Producción de pollinaza con porcentaje del inhibidor de rendimiento energético.**

En esta etapa se estima la producción de pollinaza anual al ciclo y el rendimiento de pollinaza producida por pollo de engorde a través de un modelo de simulación de riesgo Montecarlo.

En la sección 3.1.3 del Anexo 3 se encuentra el estimado de producción anual de pollinaza, las horas de operación del sistema de combustión y generación eléctrica, y las proyecciones de crecimiento de pollinaza para alcanzar el aprovechamiento total de la capacidad instalada del sistema de generación.

Se determina la demanda de biomasa en 20 toneladas por hora que es consumida y/o combustionada al interior de la caldera de alta presión, este valor sirve para estimar la capacidad instalada de los equipos de generación de vapor y energía eléctrica y determinar la inversión inicial de la unidad industrial.

El flujo de biomasa está sujeto a 8,023 horas de operación en la planta de industrial de generación eléctrica incluido un tiempo perdido del 8.4%, y una tasa media de crecimiento anual de 3.5% a 7 años para estimar la demanda de pollinaza.

### **4) Balance de materia y energía utilizando combustión.**

En esta etapa se aplican pruebas de laboratorio que incluye un análisis proximal y un análisis elemental para determinar la composición y características físicas y químicas de la pollinaza, adicionalmente los resultados permiten determinar la energía calórica contenida en la pollinaza con un contenido de humedad del 8% (base seca).

En la sección 3.1.4 del Anexo 3 se encuentran los resultados de los análisis de laboratorio para estimar el poder calorífico, la composición elemental de la pollinaza a diferente contenido de humedad y la composición elemental de las cenizas. Se presentan las características de operación de los equipos de generación de energía térmica y eléctrica para determinar su capacidad.

La calidad de la pollinaza está directamente relacionada con el contenido de humedad y el volumen de biomasa que es utilizada por hora para estimar la producción de vapor por hora en la caldera.

Para estimar la energía con diferente contenido de humedad se aplican las ecuaciones de: 1) Mollier para estimar la entalpía del flujo de vapor a diferente presión y temperatura, medido en unidades de energía sobre unidades de masa (kcal/kg), y la ecuación de 2) Regnault para determinar el calor latente de vaporización del agua, se logra estimar la energía calorífica que puede ser liberada de la combustión de la pollinaza a diferente contenido de humedad para estimar la generación del flujo de vapor por hora. En la sección 2.2.1 del Anexo 2 se presenta la formulación matemática de Mollier y de Regnault para estimar la energía contenida en la biomasa.

Se elaboran diferentes escenarios de poder calorífico (kcal/kg) de la pollinaza a distintos niveles de humedad presente durante su combustión, considerando la utilización de los parámetros y capacidad de los equipos de generación de vapor. El balance de materia y energía sirve para determinar los índices de producción de vapor por unidad de biomasa (1.89 kg vapor/kg pollinaza) y el consumo de vapor requerido para generar energía eléctrica en el turbogenerador a condensación (4.16 kg vapor/kWh).

El balance de energía indica que se consumen 20 toneladas de pollinaza por hora para generar 38 toneladas de vapor por hora en la caldera y lograr generar 9.2 MW de energía eléctrica por hora, esta parametrización se realiza con el modelo de simulación utilizando distribuciones de probabilidad, con distintos escenarios de humedad en la pollinaza.

##### **5) Producción de energía térmica (vapor) y eléctrica.**

En esta etapa se estima el volumen de energía eléctrica a producir con respecto a la biomasa utilizada. En la sección 2.2.2.1 del Anexo 2 se presentan la formulación matemática de siete alternativas energéticas de pollinaza preliminares, el planteamiento justifica el uso de la combustión de pollinaza al obtener mayor rendimiento energético en comparación con la digestión de la pollinaza.

En la sección 2.2.1 del Anexo 2 se presenta la formulación matemática del proceso de transformación de biomasa (combustión de pollinaza) a bioenergía (vapor y energía eléctrica) y son base para desarrollar los modelos de simulación.

En la sección 3.1.5 del Anexo 3 se presentan los estimados de producción total de energía a generar, identificando la que se utiliza para autoconsumo y para la venta de excedentes, y se presenta una producción estimada de cenizas proveniente de la combustión de pollinaza.

La unidad industrial aprovecha 160 mil toneladas de pollinaza al año con 40% de humedad para generar 73 mil MWh en un año normal de operación, de los cuales, tiene una demanda interna de 7.3 mil MWh al año para mover equipos eléctricos para su propia operación, equivalente al 10%, y los 65.9 mil MWh restantes de energía eléctrica que se producen son enviados a la red nacional de energía para su venta, y son equivalentes al 90%.

Para cada escenario existe un decremento de 5% de humedad que incrementa en más de 8 mil MWh la generación eléctrica, esta relación se debe a la calidad de la pollinaza, mientras más seca sea la pollinaza mayor rendimiento energético se obtiene por cada kilogramo de biomasa combustionado y permite producir 25 mil toneladas de cenizas anualmente.

En esta etapa se presentan estimaciones anuales de producción para cada tipo de elemento de biomasa o bioenergía, que sirven para realizar las proyecciones económicas y financieras.

#### **6) Análisis de riesgo para estimar la rentabilidad económica (escenarios).**

Los resultados del comportamiento y crecimiento de la producción anual de biomasa y bioenergía sirven para incorporarlos al modelo de simulación de riesgo, utilizando distintas distribuciones de probabilidad para el precio del kilowatt-hora, para los costos de porteo y servicios conexos, para el precio de las cenizas, para el tipo de cambio de dólar a pesos, y para la asignación del costo de la materia prima (biomasa) por tonelada incluido el costo del transporte.

En la sección 3.1.6 del Anexo 3 se presentan los ingresos generados por la venta de energía eléctrica excedente y ceniza de pollinaza a diferente contenido de humedad, y se muestran los costos asociados a la producción de vapor, generación de energía eléctrica y a la compra de materia prima para la combustión (pollinaza).

En la sección 3.1.6.1 del Anexo 3 se presentan los resultados de las siete alternativas energéticas de pollinaza que justifica el uso de la combustión de pollinaza al tener mayor rendimiento energético y económico que la digestión de pollinaza.

A partir de la producción y la incorporación de precios por tipo de elemento, se logra determinar los costos de producción anuales relacionados con la compra de biomasa para generar vapor por 75 millones de pesos y lograr establecer las ventas estimadas anuales de energía eléctrica por 135 millones de pesos.

Los egresos y los ingresos del proceso se utilizan para generar los flujos de efectivo anuales para determinar la rentabilidad de la inversión de todo el sistema energético y estimar un margen de contribución de 371 pesos por tonelada de pollinaza que ingresa al sistema.

Los indicadores financieros indican una tasa interna de retorno (TIR) del 12.6% para un horizonte de planeación de 10 años y del 18.42% para 25 años, en ambos casos utilizando pollinaza del 40% como escenario base. Posteriormente se evalúan 4 escenarios con distinto contenido de humedad, a diferente periodo de planeación. En el modelo se presentan las inversiones en equipamiento requeridas para realizar las mejoras en las granjas, a partir del mejor conjunto de prácticas avícolas que contribuyen a reducir la humedad.

Los beneficios económicos aumentan en medida que se reduce el contenido de humedad en la pollinaza utilizada para combustionar y en consecuencia la inversión inicial aumenta porque se requiere de mayor capacidad instalada de generación de energía. Los escenarios indican que es más rentable producir bioenergía a partir pollinaza que venderla por si sola.

#### **7) Sustentabilidad ambiental con reducción de emisiones.**

En la sección 2.2.5 del Anexo 2 se presenta la formulación matemática para estimar la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y en la sección 3.1.7 del Anexo 3 se encuentran las estimaciones de gases efecto invernadero que pueden ser mitigados al combustionar la pollinaza a diferente contenido de humedad.

Al aplicar la formulación a la cadena de valor de pollinaza se obtiene la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente desde 33 mil tCO<sub>2</sub> eq. con humedad del 40% hasta 44 mil tCO<sub>2</sub> eq. con humedad del 25% en la biomasa a partir de la energía producida que se vende a la red nacional.

Esto es posible a que las empresas socias consumen la energía renovable que es producida en la red.

En resumen, la aplicación de la metodología de la cadena de valor avícola que utiliza pollinaza sirve para alimentar al modelo de red de valor que se desarrolla en el capítulo 6. La red de valor optimiza los ingresos por bioenergía a partir de reducción de humedad en la pollinaza de la cadena de valor modificando el conjunto de prácticas avícolas.



## 5.2. Estructura de análisis de la cadena de valor avícola utilizando lodo residual.

Las siete etapas se representan en dos secciones, ver Figura 9 (etapa 1 y 2 de la metodología) y Figura 10 (etapa 3, 4, 5, 6 y 7 de la metodología).

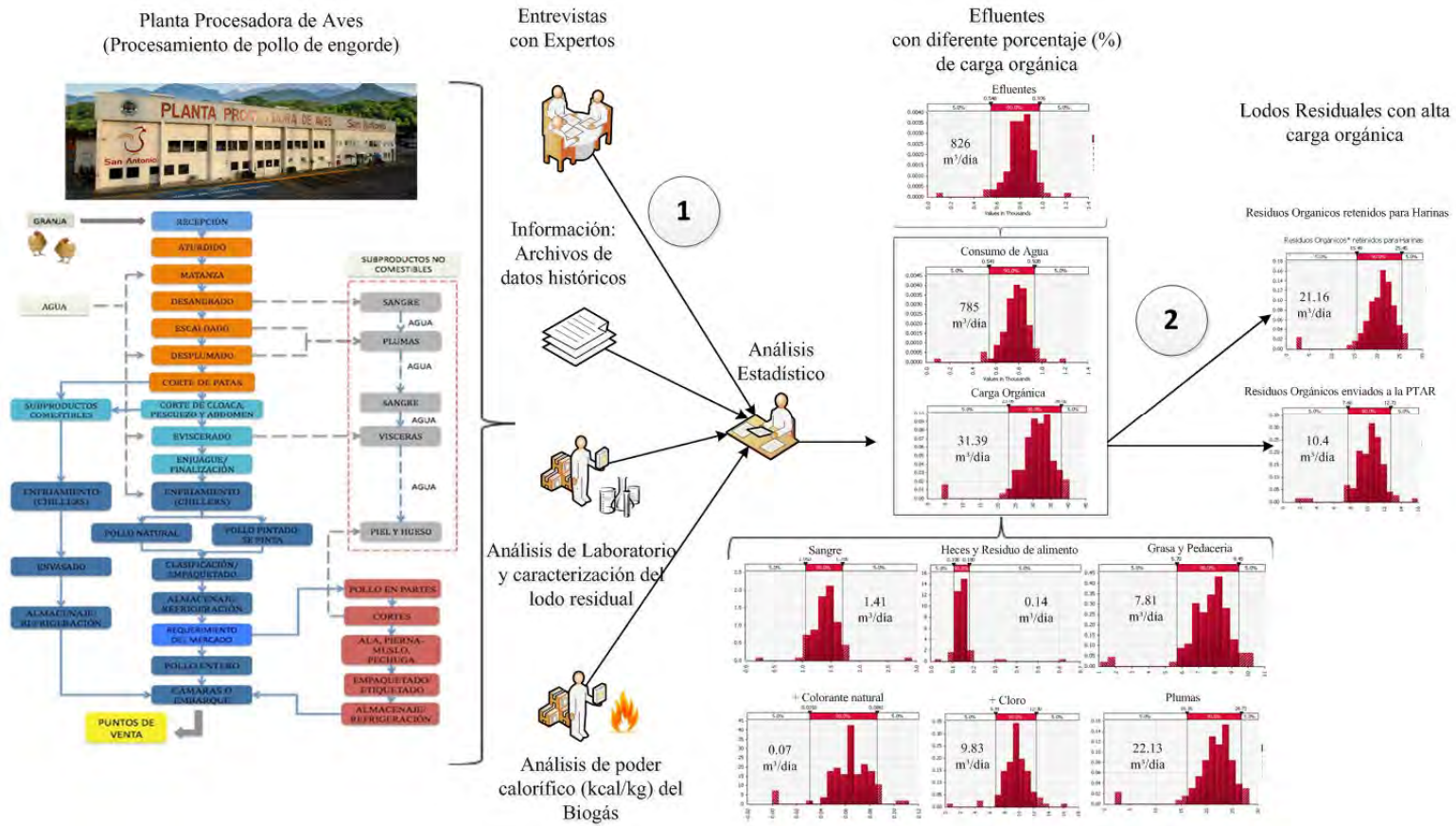


Figura 9. Estructura de la cadena de valor avícola, usando lodo residual (parte 1)



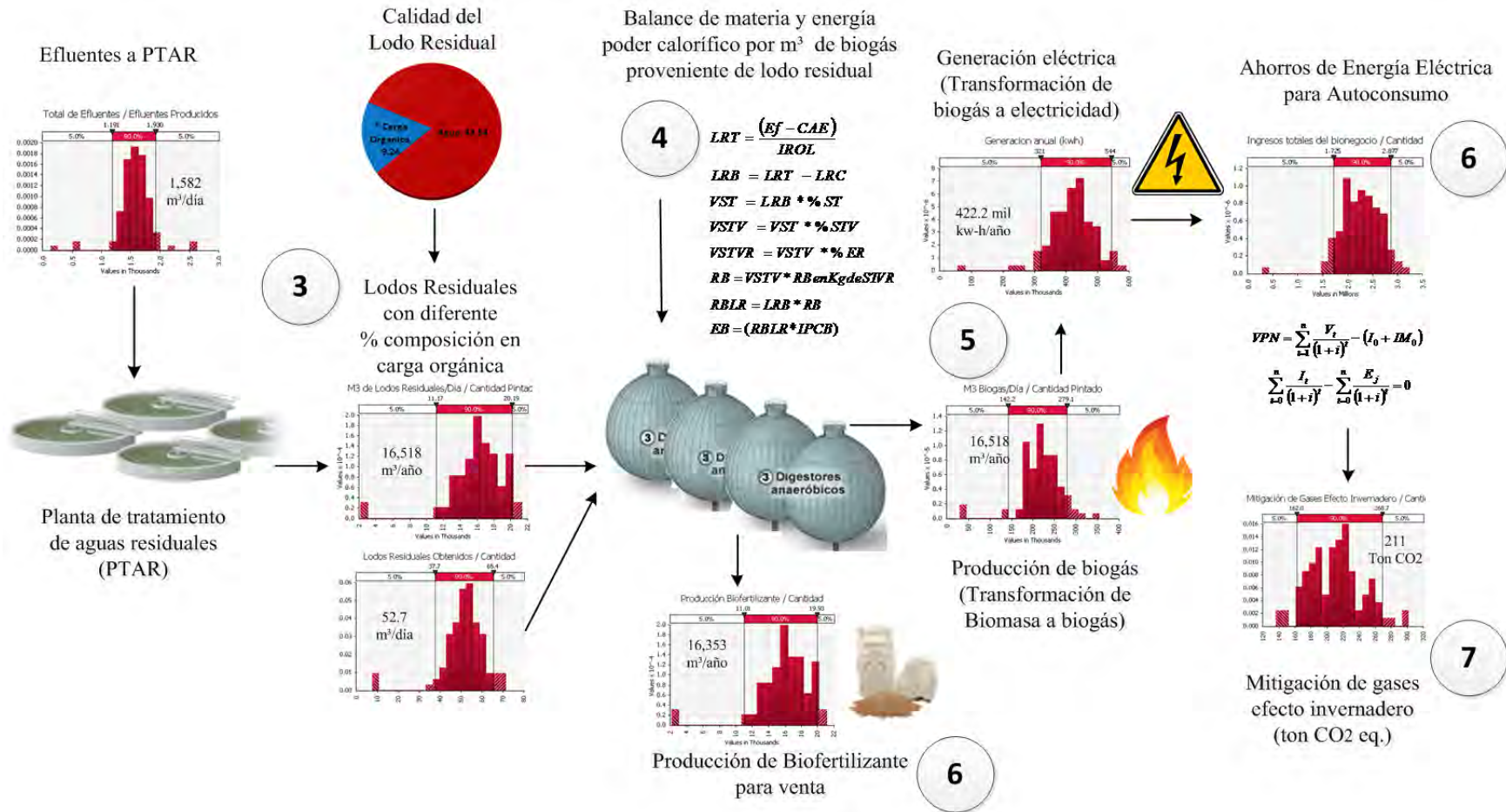


Figura 10. Estructura de la cadena de valor avícola, usando lodo residual (parte 2)

### **1) Análisis del sistema de producción de lodo residual.**

Los procesos industriales de transformación de pollo de engorde a pollo procesado requiere de un análisis del sistema de producción por etapa y por equipo para determinar el flujo de recursos utilizados, los residuos que son generados por tipo de pollo. En la sección 1.1.3 del anexo 1 se encuentra la descripción del procesamiento de pollo de engorde en la planta procesadora.

El análisis evalúa la operación secuencial de 10 actividades del proceso de recepción y matanza, 12 actividades del proceso de eviscerado y 9 actividades del proceso de empaque para los cuatro tipos de pollo procesado. Se realizan decantaciones para estimar el flujo de residuos y agua.

En la sección 2.1.1.1 del anexo 2 se encuentran las distribuciones de probabilidad utilizadas para modelar el comportamiento del procesamiento por tipo de pollo de engorde, mermas del proceso y rendimiento de biogás de lodos residuales.

Los datos utilizados son obtenidos a partir de muestras y registros estadísticos, para determinar su comportamiento se utilizaron pruebas de bondad de ajuste e identificar a que distribución de probabilidad corresponden. Se tuvo entrevistas con expertos del sistema para definir distribuciones triangulares que define los valores del comportamiento de las variables. Estos datos se utilizan en la etapa 3 para desarrollar los modelos de simulación.

Se procesan 69 mil pollos al día, de los cuales 22 mil pollos son tipo seco natural, 16 mil pollos son tipo hidratado natural y 31 mil pollos son tipo hidratado pintado, esta operación se realiza en 10 horas efectivas.

Durante el proceso de obtiene pollo procesado en distintas presentaciones y se producen diversos tipos de residuos que se mezclan con agua de uso industrial. Los principales residuos identificados son sangre, heces, alimento no digerido, grasa, pedacería, plumas, colorante y cloro, a esta mezcla heterogénea se le llama efluente con sólidos.

Los efluentes solidos son separados utilizando una criba de separación, el volumen retenido es recuperado para elaborar harinas y aceite, y el volumen que no se recupera es efluente líquido que es enviado a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para su tratamiento físico – químico y así lograr verter agua tratada de uso industrial nuevamente al río.

Los lodos residuales son obtenidos de los sedimentos decantados en la PTAR, estos tienen un alto contenido de materia orgánica, y por su composición son factibles para producir biofertilizante orgánico y biogás capaz de generar energía eléctrica a partir del proceso de digestión anaeróbica.

El análisis del sistema permite realizar un modelo de simulación de producción de pollo procesado que utiliza estadísticas, estimaciones de volumen de residuos por decantación, medición del flujo de agua de uso industrial, e incluye estudios de tiempos y movimientos del sistema.

En la sección 3.2.1 del anexo 3 se encuentra el detalle del análisis del sistema por tipo de procesamiento de pollo de engorde en la planta procesadora de aves, el volumen y las mermas de producción de aves al día, los tiempos de operación por equipos.

## **2) Control de las variables para mejorar la calidad de lodo residual.**

La calidad de materia orgánica presente en los residuos del procesamiento determina la calidad y la cantidad del lodo residual para producir biogás con altas concentraciones de metano.

En la sección 3.2.2 del anexo 3 se encuentra el estimado de consumo de agua por pollo procesado, el agua industrial que utiliza cada equipo y área de procesamiento, y se estima la generación de residuos orgánicos y no orgánicos por tipo pollo.

Se estima un consumo total de 22.5 litros de agua industrial por pollo procesado y un consumo de 11.25 litros de agua industrial por pollo, solo para las operaciones de procesamiento, este flujo de agua está presente en los efluentes que producen el lodo residual.

Se estima una generación de 826 m<sup>3</sup> de efluentes al día en el procesamiento de aves, de los cuales 785 m<sup>3</sup> son de agua industrial y 31.39 m<sup>3</sup> es carga orgánica presente en los efluentes al día, los residuos presentes son 1.41 m<sup>3</sup> de sangre, 0.14 m<sup>3</sup> de heces y residuos de alimento, 7.81 m<sup>3</sup> de grasa y pedacería, 0.07 m<sup>3</sup> de colorante natural, 9.83 m<sup>3</sup> de cloro y 22.13 m<sup>3</sup> de plumas. La proporción de estos residuos afecta la calidad del lodo residual.

En la criba de separación se retienen 21.16 m<sup>3</sup> de carga orgánica sólida y se envían a la PTAR 10.33 m<sup>3</sup> de carga orgánica líquida diluida en 777 m<sup>3</sup> de efluentes provenientes del procesamiento.

## **3) Producción de lodo residual con porcentaje del inhibidor de rendimiento energético.**

El flujo de lodos residuales producidos está relacionado con el volumen de pollos de engorde procesados y el tipo de procesamiento afectando la calidad del lodo y el rendimiento de biogás.

En la sección 3.2.3 del anexo 3 se encuentra el estimado de producción anual de lodos residuales y su composición por elementos y mermas de residuos del procesamiento de aves.

La PTAR recibe 777 m<sup>3</sup> de efluentes del procesamiento más 784 m<sup>3</sup> de efluentes de otras áreas operativas y de servicio de la unidad industrial, en total se tratan 1,582 m<sup>3</sup> de efluentes y después de ser tratadas se vierten al río 1,528 m<sup>3</sup> de agua industrial.

El lote de procesamiento de 69 mil pollos de engorde al día produce 52 m<sup>3</sup> de lodos residuales para ser digeridos anaeróbicamente en los reactores ovoides, la mezcla de lodos está compuesta por 43 m<sup>3</sup> de agua y 9 m<sup>3</sup> de contenido orgánico suspendido. Con esta estimación se determina el volumen de residuos que son utilizados para producir bioenergía en el modelo de simulación Montecarlo.

#### **4) Balance de materia y energía utilizando digestión anaeróbica.**

Se aplican pruebas de laboratorio para determinar su composición físico – química y microbiológica, estudios de caracterización y se realizan estudios a nivel laboratorio para determinar el rendimiento de biogás por unidad volumétrica de lodo tratado en un reactor ovoide prototipo de digestión anaeróbica.

En la sección 3.2.4 del anexo 3 se encuentran los resultados de los análisis de laboratorio que presenta la caracterización de los lodos residuales, el rendimiento de biogás de la prueba piloto a nivel laboratorio, el proceso de generación de lodos residuales y las características de operación de la tecnología de digestión anaeróbica en escala industrial.

La caracterización del lodo residual permite identificar los elementos fisicoquímicos, bioquímicos y microbiológicos presentes, este análisis ayuda a comprender el comportamiento en el rendimiento del biogás. Las pruebas de laboratorio indican un rendimiento de 1.5 litros de biogás por cada gramo de sólido total volátil removido (1 biogás/g STV<sub>rem</sub>), y en el modelo de simulación se registra un rendimiento medio de 1.25 l biogás/g STV<sub>rem</sub> con una concentración del 75% de metano.

Por cada 52.78 m<sup>3</sup> de lodos residuales al día se producen 720 m<sup>3</sup> de biogás/kg STV<sub>rem</sub> y 52.25 m<sup>3</sup> de biofertilizante, en este sentido la energía que puede ser liberada por el biogás es de 2,017,411 kilocalorías diariamente.

#### **5) Producción de energía térmica (biogás) y eléctrica.**

La calidad y producción de lodos residuales determinan el flujo de generación de biogás y el rendimiento energético por unidad de biomasa. En la sección 2.2.2.1 del anexo 2 se presenta la

formulación matemática del proceso de transformación de biomasa (lodo residual) a bioenergía (biogás y energía eléctrica) y son base para desarrollar los modelos de simulación.

En la sección 3.2.5 del anexo 3 se presentan los estimados de producción total de biogás a generar en concentraciones del 75% de metano, identificando el consumo de m<sup>3</sup> de biogás que se utiliza para autoconsumo y la producción de biofertilizante anualmente.

La digestión de lodos residuales permite producir 16,353 m<sup>3</sup> de biofertilizante para cultivos agrícolas, este volumen representa un 99% del volumen total digerido y se logran producir 225 mil m<sup>3</sup> de biogás al año con concentración del 75% de metano.

La tecnología de digestión anaeróbica permite obtener 631.45 millones de kcal anualmente, esto indica que es totalmente factible la utilización de residuos industriales para la producción de bioenergía, y permite generar 422.3 mil kWh al año, operando 2 motogeneradores eléctricos durante 22 horas al día. La producción de bioenergía y biosólidos se utilizan para realizar la estimación de rentabilidad económica de la tecnología de digestión anaeróbica utilizando lodos residuales.

#### **6) Análisis de riesgo para estimar la rentabilidad económica (escenarios).**

La implementación de un sistema tecnológico de digestión anaeróbica reduce los costos de producción al generar energía eléctrica útil para los procesos internos de la planta procesadora de aves.

Se realiza un análisis de riesgo para determinar cómo afecta la rentabilidad del modelo de negocio de bioenergía considerando los eventos y variables inciertas del proceso de pollos procesados del que se obtienen diversos residuos, efluentes y lodos residuales.

El comportamiento del contenido orgánico en los lodos residuales, los parámetros de control de la tecnología de digestión anaeróbica, los precios del mercado de la energía eléctrica y la aceptación de compra-venta de los biosólidos (biofertilizantes) determinan la factibilidad económica de la tecnología.

En la sección 3.2.6 del anexo 3 se presentan los ahorros generados por autoconsumo de energía eléctrica generada con el biogás producido de la digestión, incluidos los costos de operación del sistema tecnológico y se presentan los ingresos por la venta de biofertilizante.

En este sentido el modelo de simulación ayuda a determinar la incertidumbre económica sobre los parámetros de producción de lodo residual, biogás, energía eléctrica y biofertilizante.

Los ingresos derivados del uso de la energía producida generan 582 mil pesos al año y un ingreso por la venta del biofertilizante por 1.6 millones de pesos anuales, estos beneficios representan 2.2 millones de pesos de ingresos al aprovechar energéticamente los residuos provenientes del procesamiento de pollo de engorde.

Se realizan flujos de efectivo considerando los ingresos, los costos de operación, la inversión inicial y un subsidio económico federal que permita reducir el periodo de recuperación de inversiones de tipo ambiental y energético. Los indicadores financieros del modelo de negocio indican que la tasa interna de retorno (TIR) resultante es del 23%.

#### **7) Sustentabilidad ambiental con reducción de emisiones.**

La implementación de sistemas tecnológicos de transformación de residuos a bioenergía permite a las empresas contribuir con nuevas tecnologías viables de generación de energía renovable para garantizar una reducción de gases efecto invernadero significativo.

En la sección 2.2.5 del anexo 2 se presenta la formulación matemática para estimar la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y en la sección 3.2.7 del anexo 3 se encuentran las estimaciones de gases efecto invernadero que pueden ser mitigados al generar y consumir energía eléctrica a partir de la combustión del biogás proveniente de lodos residuales.

El aprovechamiento de energía eléctrica a partir del biogás producido de la digestión de los lodos residuales permite mitigar 211 toneladas de dióxido de carbono equivalente.

El sistema de digestión en la planta procesadora de aves permite generar nuevos productos (biofertilizantes y bioenergía) provenientes de residuos que eran considerados desechos industriales, este sistema contribuye favorablemente a la protección del medio ambiente, particularmente en la lucha contra el calentamiento global.

En resumen, la aplicación de la metodología de la cadena de valor avícola que utiliza lodos residuales se utiliza para modelar el intercambio de bioenergía y biosólidos en la red de valor que se desarrolla en el Capítulo 6. La red de valor optimiza los ingresos por bioenergía a partir del contenido orgánico en los lodos residuales de la cadena de valor a partir de las modificaciones al proceso de pollo procesado.

### 5.3. Estructura de análisis de la cadena de valor cañero – azucarera utilizando residuos agrícolas de cosecha (RAC) y bagazo

Las siete etapas se representan en dos secciones, ver Figura 11 (etapa 1 y 2 de la metodología) y Figura 12 (Etapa 3, 4, 5, 6 y 7 de la metodología).

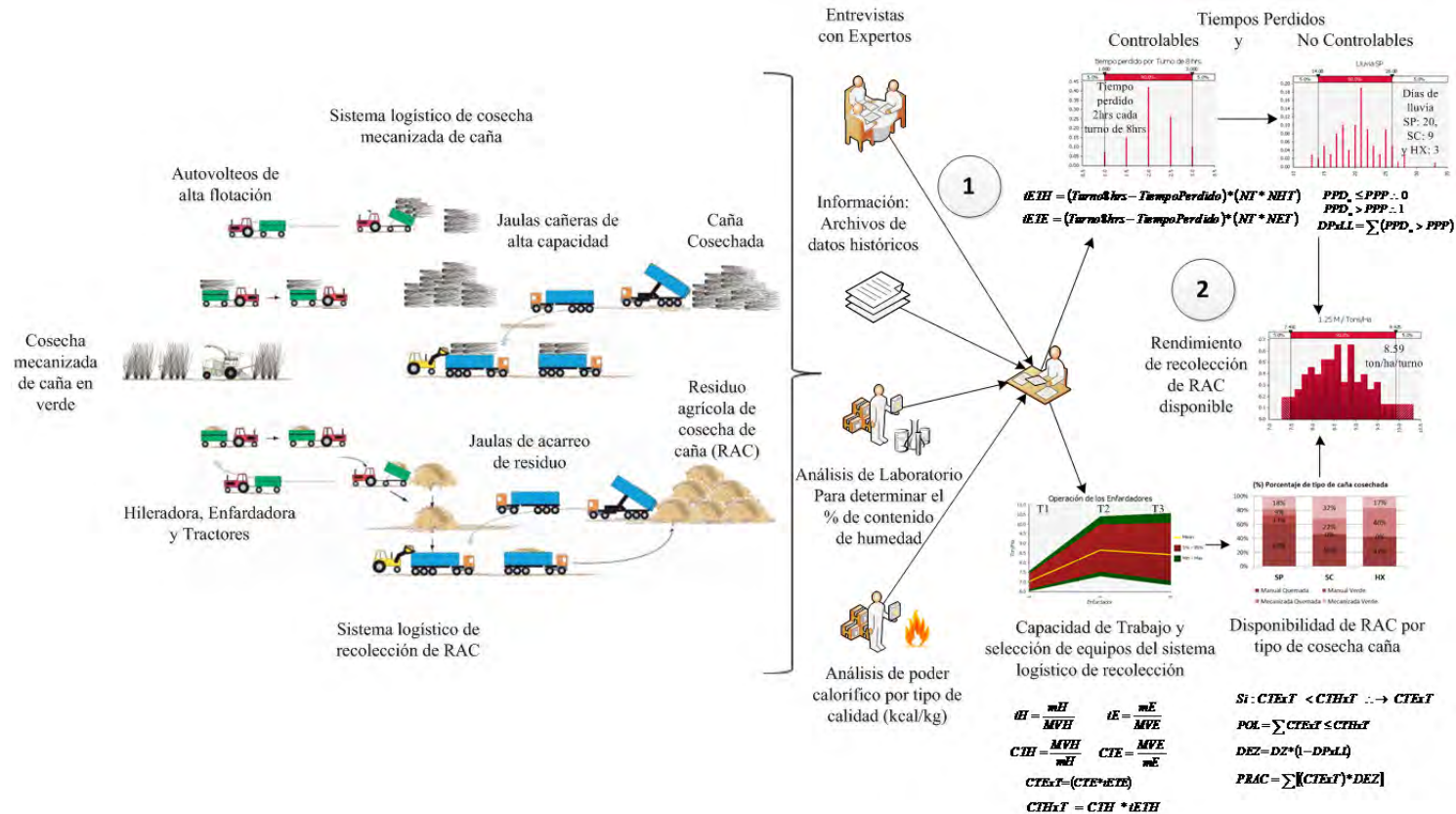


Figura 11. Estructura de la cadena de valor cañero – azucarera, usando RAC y Bagazo (parte 1)



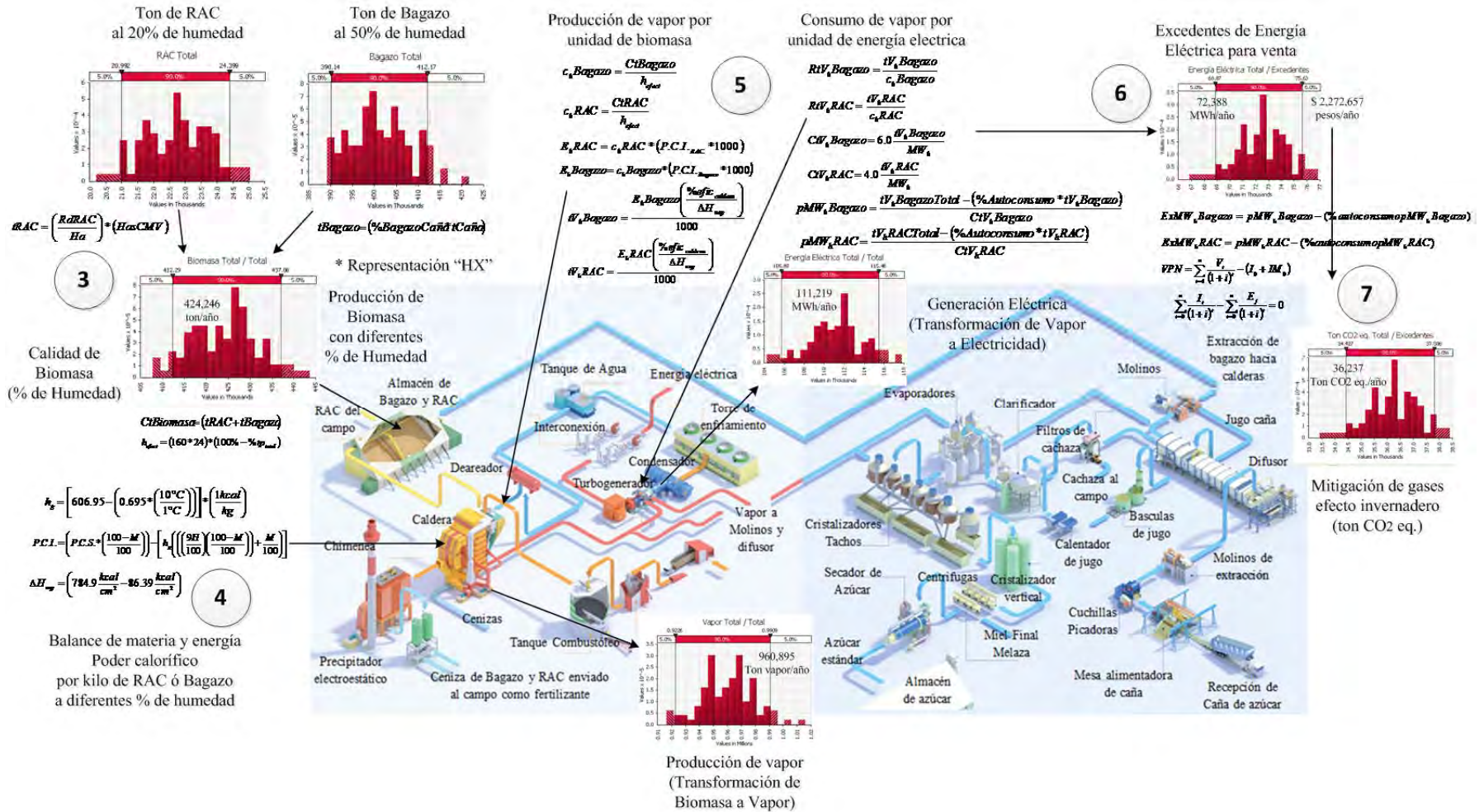


Figura 12. Estructura de la cadena de valor cañero – azucarera, usando RAC y Bagazo (parte 2)



### 1) Análisis del sistema de producción de RAC y Bagazo.

El residuo agrícola cañero (RAC) y el bagazo son residuos de biomasa considerados combustibles y fuentes de energía útil para los procesos industriales de elaboración de azúcar, etanol u otros derivados. En la sección 1.2.1, 1.2.2 y 1.2.3 del anexo 1 se encuentran la descripción del proceso de cosecha de caña de azúcar, de elaboración de azúcar y sistema de recolección del RAC

El bagazo se obtiene en los molinos del ingenio azucarero durante la extracción del jugo de la caña de azúcar, por el contrario el RAC se obtiene en las zonas de campo durante la cosecha mecanizada de caña de azúcar en verde y se realiza con equipos agrícolas sofisticados que depositan el residuo sobre el campo y la caña cosechada se envía al ingenio para producir azúcar y el bagazo resultante se utiliza como combustible para las calderas.

En la sección 2.1.3 del anexo 2 se encuentran las distribuciones de probabilidad utilizadas para modelar el comportamiento de la producción y rendimiento del bagazo y del residuo agrícola de cosecha de caña (RAC).

La recolección del RAC en el campo requiere del diseño de un sistema logístico que permita, organizar la operación de los vehículos, seleccionar los equipos mecánicos adecuados con la menor inversión en equipamiento para garantizar la rentabilidad del sistema logístico de recolección (SLR) de manera integral para hacer económica y energéticamente viable la utilización del residuo como biocombustible.

Para encontrar el costo y rendimiento de recolección de toneladas de RAC por hectárea se utiliza un modelo de recolección de RAC basado en simulación Montecarlo, que incluye restricciones y parámetros operativos que surgen de las muestras estadísticas, tiempos y movimientos de operación de la prueba piloto.

El modelo de simulación sirve como herramienta de soporte para la toma de decisiones de los inversionistas al aplicar tecnologías sustentables y energéticas. La verificación y validación del modelo es realizada por expertos agrícolas en cosecha mecanizada.

El sistema logístico de recolección está definido por un plan anual de crecimiento de caña de azúcar que incluye las toneladas de cosecha mecanizada en verde y el rendimiento de caña por hectárea para estimar el RAC disponible en cada cadena de valor (CV), representado por tres ingenios azucareros y tres empresas agrícolas.

El modelo es afectado por los días de lluvia que reduce la cantidad de RAC recolectado y los periodos de recolección, el modelo de simulación estima una disponibilidad de 26,119 toneladas en la CV 1, 26,710 toneladas en la CV 2 y de 20,838 toneladas en la CV 3 para hacer un total de 73,667 toneladas de RAC en la Red.

En la sección 2.2.6 del anexo 2 se presenta la formulación matemática del sistema de recolección del RAC y en la sección 3.3.1 del anexo 3 se encuentra el detalle del análisis del sistema de recolección del RAC, considerando los días de lluvia, los estimados de producción de caña y RAC por tipo de cosecha para los tres ingenios azucareros.

## **2) Control de las variables para mejorar la calidad de RAC y Bagazo.**

Las lluvias afectan la calidad y cantidad de RAC que es posible recolectar del modelo de simulación, el RAC de buena calidad para recolección y combustión debe tener una humedad inferior al 20%, si la humedad es superior hace difícil su recolección, disminuyendo el rendimiento de toneladas por hectárea y afectando la calidad energética de combustión.

En la sección 3.3.2 del anexo 3 se encuentra la eficiencia y rendimientos del hilerado, enfardado, alce y acarreo del sistema de recolección de RAC, incluido el programa de sincronización de equipos agrícolas a dos turnos.

El sistema de control y simulación Montecarlo permite definir el tamaño y diseño de Fardo de RAC con mayor rendimiento por hectárea en 8.59 toneladas por hectárea, se logran tener estimaciones cercanas al sistema real al incluir estimaciones de rendimiento de 17.25 hectáreas hileradas por turno y de 4.14 hectáreas enfardadas por turno.

El control permite definir la programación y sincronización de operaciones de recolección mecanizada de RAC con el menor número de recursos, unidades y equipos del sistema de recolección, alce y acarreo, haciendo posible una mínima inversión inicial y con el mayor rendimiento de RAC recolectado.

La operación del sistema logístico indica que operando dos turnos al día se puede recolectar hasta 15,454 toneladas de RAC por zafra con un paquete tecnológico de recursos.

### **3) Producción de RAC y Bagazo con porcentaje del inhibidor de rendimiento energético.**

La simulación del modelo logístico determina el desempeño de los recursos tecnológicos asegurando la demanda de Caña, Bagazo y RAC en el ingenio azucarero de cada cadena de valor.

Determinar el volumen de RAC a recolectar por zafra ayuda a diseñar los equipos de cogeneración para transformar la biomasa en energía y a estimar los periodos y volumen de energía a producir en periodos de zafra y no zafra.

En la sección 3.3.3 del anexo 3 se encuentra el estimado de producción anual de Bagazo y RAC considerando los tiempos perdidos, los periodos de zafra, la capacidad de molienda horaria de los tres ingenios azucareros.

La cadena de valor 1 con una producción de 1.5 millones de toneladas de caña se obtienen 217 mil toneladas de bagazo para utilizarlas en zafra, 30 mil toneladas de bagazo en no zafra y 26 mil toneladas de RAC en no zafra para producir energía eléctrica.

La cadena de valor 2 con una producción de 1.7 millones de toneladas de caña se obtienen 262 mil toneladas de bagazo para utilizarlas en zafra, 40 mil toneladas de bagazo para utilizar en no zafra, y 26 mil toneladas de RAC en no zafra para producir energía eléctrica.

La cadena de valor 3 con una producción de 700 mil toneladas de caña se obtienen 125 mil toneladas de bagazo para utilizarlas en zafra, 19 mil toneladas de bagazo en no zafra, y 20 mil toneladas de RAC en no zafra para producir energía eléctrica.

El resto de la biomasa proveniente del bagazo se utiliza para producir vapor en equipos para el proceso de elaboración de azúcar y en las turbinas que movilizan los molinos de extracción durante la zafra.

### **4) Balance de materia y energía utilizando combustión.**

Las presiones y temperaturas de vapor generado en las calderas actuales son relativamente bajas, por eso se propone la construcción de una planta de cogeneración sofisticada que pueda utilizar biomasa en periodos después de haber terminado la zafra y el rendimiento energético sea muy superior al actual.

Se toman muestras de bagazo y RAC para realizarles pruebas de laboratorio que incluyen análisis elemental y proximal, y la determinación del poder calorífico con un 8% en el contenido de

humedad, también llamado base seca, estos resultados sirven para obtener estimaciones del poder calorífico del RAC y del Bagazo a diferentes contenidos de humedad.

En la sección 3.3.4 del anexo 3 se encuentran los resultados de los análisis de laboratorio para estimar el poder calorífico, la composición elemental del RAC y del Bagazo a diferente contenido de humedad, las características de operación de los equipos para determinar su capacidad de cogeneración, y se presenta el flujo de demanda de biomasa, vapor y energía eléctrica de los tres ingenios en el periodo de zafra y no zafra. Se presenta los fundamentos técnicos, las características del sistema y los tipos de turbinas a utilizar para desarrollar la cogeneración.

Los valores energéticos estimados con el modelo de simulación considerando diferente contenido de humedad para cada tipo de residuo y demanda de biomasa por hora en cada cadena de valor, permite diseñar las capacidades de los equipos de generación de vapor, la generación eléctrica de manera integrada y la inversión inicial requerida para poner en marcha la integración de la red de valor de bioenergía.

La energía del RAC a 20% de humedad tiene un poder calórico “medio” de 3,119 kcal/kg, para efectos de estimación se propone usar un escenario “bajo” con un poder calorífico de 3,059 kcal/kg, y utilizar bagazo de 50% de humedad con un poder calorífico “medio” de 1,734 kcal/kg, esto evita presentar resultados muy optimistas, estos valores se utilizan para el modelo de simulación.

Dependiendo del poder calorífico y de la humedad contenida en la biomasa se hace uso de las ecuaciones de: 1) Mollier para estimar la entalpía del flujo de vapor a diferente presión y temperatura, medido en unidades de energía sobre unidades de masa (kcal/kg), y 2) Regnault para determinar el calor latente de vaporización del agua, se logra estimar la energía calorífica que puede ser liberada de la combustión del RAC y del Bagazo a diferente contenido de humedad para estimar la generación del flujo de vapor por hora. En la sección 2.2.1 del anexo 2 se presenta la formulación matemática de Mollier y de Regnault para estimar la energía contenida en la biomasa.

Las características de operación, producción y consumo de los equipos energéticos definen los índices de flujo de vapor y de energía eléctrica, los índices de rendimiento de generación de vapor (kg. vapor / kg. biomasa) y los índices de consumo de vapor para producir un kilowatt-hora por tipo de biomasa.

Los resultados del modelo de simulación determinan el balance de energía que define la capacidad de generación horaria de vapor y energía eléctrica, obteniendo que la cadena de valor 1 tiene una

capacidad de 21.5 MWh, la cadena de valor 2 una capacidad de 25.22 MWh y la cadena 3 una capacidad de 12.1 MWh.

### **5) Producción de energía térmica (vapor) y eléctrica.**

Los sistemas de cogeneración de energía en los ingenios azucareros, producen vapor para utilizarlo entre un 40% y 45% en los procesos de elaboración y entre un 55% y un 60% para los equipos de generación eléctrica.

En la sección 2.2.4 del anexo 2 se presenta la formulación matemática del proceso de transformación de biomasa (bagazo y RAC) a bioenergía (vapor y energía eléctrica) y son base para desarrollar los modelos de simulación.

En la sección 3.3.5 del anexo 3 se presentan los estimados de producción total de energía eléctrica considerando una demanda de bagazo y RAC, se realiza una segmentación por consumo y tipos de bioenergía (vapor para turbinas de molinos y para turbogeneradores) para distintos usos en el interior de la fábrica de elaboración de azúcar de los tres ingenios.

El vapor que es utilizado por los turbogeneradores produce energía eléctrica para su autoconsumo que requieren los equipos al interior del sistema para el proceso de elaboración de azúcar, que equivale al 10% del total, la energía excedente y/o sobrante representa el 90% y es entregada a la red nacional de energía eléctrica para que sea utilizada por otras industrias asociadas en una red de valor.

La combustión de ambos residuos cañeros se utilizan para producir vapor que se convierte en energía mecánica para: 1) mover los rotores de las turbinas de contrapresión y/o condensación de alta presión y 2) las turbinas de los molinos para realizar la extracción del jugo de caña; las turbinas de la planta eléctrica a su vez: 1) hacen mover a los rotores de los generadores eléctricos para producir energía eléctrica, y 2) producir vapor de escape de baja presión que se utiliza para los procesos de elaboración de azúcar.

Los resultados de los modelos de simulación indican que la cadena de valor 1 vende energía eléctrica hasta por 77 mil MWh por zafra y produce 33 mil toneladas de cenizas, la cadena de valor 2 vende hasta 90 mil MWh con 39 mil toneladas de cenizas y la cadena 3 vende hasta 50 mil MWh por zafra con 19 mil toneladas de cenizas, esta producción genera un total de 217 mil MWh por zafra y 91 toneladas de cenizas en la red de valor.

## **6) Análisis de riesgo para estimar la rentabilidad económica (escenarios).**

La producción de bioenergía en los ingenios azucareros de caña de azúcar es posible a través de sistemas de cogeneración eficiente de última generación para su venta o intercambio hacia la red nacional de energía eléctrica.

En la sección 3.3.6 del anexo 3 se presentan los ingresos generados por la venta de energía eléctrica excedente y los costos asociados a la producción de vapor y energía eléctrica. Se consideran dos escenarios: 1) la compra de materia prima para la combustión (RAC) y 2) la inversión para realizar la compra de los equipos de recolección.

Para estimar los beneficios económicos del aprovechamiento y transformación de los residuos se realiza una evaluación utilizando un modelo de simulación Montecarlo robusto para determinar los alcances técnico – económicos del comportamiento y conversión de la biomasa en bioenergía, biocombustibles y bioproductos para generar nuevas oportunidades de negocio.

Se presenta dos escenarios de evaluación económica para cada cadena de valor, el primer escenario considera comprar el RAC a un precio que se establece a partir del costo de operación del sistema logístico de recolección de RAC incluida una ganancia y el segundo escenario considera realizar la inversión en equipos de recolección sin considerar costo de RAC ni utilidad, la diferencia es un año en el retorno de la inversión.

Los resultados de la simulación Montecarlo presenta que los ingresos por bioenergía para la CV 1 son por 106 millones de pesos (mdp), para la CV 2 por 125 millones de pesos y para la CV3 por 69 millones de pesos, las tres cadenas de valor generan 300 millones de pesos por ingresos de energía eléctrica y 920 mil pesos por la venta de cenizas derivadas de la combustión de RAC y bagazo.

## **7) Sustentabilidad ambiental con reducción de emisiones.**

En la sección 2.2.5 del anexo 2 se presenta la formulación matemática para estimar la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y en la sección 0 del anexo 3 se encuentran las estimaciones de gases efecto invernadero que pueden ser mitigados al cogenerar energía eléctrica a partir de la combustión de bagazo y RAC en los tres ingenios.

La aplicación de la formulación permite estimar la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente a 38 mil toneladas en la cadena de valor 1, de 45 mil toneladas en la cadena de valor 2 y de 25 toneladas en la cadena de valor 3 para mitigar un total de 108 mil toneladas.

La reducción de gases efecto invernadero es posible por la energía eléctrica que es producida utilizando RAC y Bagazo, para venderse a la red nacional de energía eléctrica y con el intercambio en la red de valor.

En resumen, la aplicación de la metodología de la cadena de valor cañero – azucarera utilizando bagazo y RAC sirve para alimentar al modelo de red de valor que se desarrolla en Capítulo 6 referente a la red de valor agroindustrial. La red de valor optimiza los ingresos por bioenergía a partir del flujo y calidad de recolección de RAC y Bagazo con la menor humedad.

## Conclusiones.

En este capítulo se validan los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología de evaluación en las cuatro cadenas de valor a través de un caso de estudio.

Se logran identificar las variables más sensibles que afectan al sistema de producción para cada tipo de residuos y la forma en que afectan al desempeño de los sistemas tecnológicos de digestión, combustión, generación y cogeneración de bioenergía basados en la calidad del residuo. También se logran establecer los cambios en el proceso para mejorar el rendimiento de energía por unidad de biomasa.

Se proponen modelos de simulación Montecarlo basados en ecuaciones matemáticas y distribuciones de probabilidad del proceso de producción para cada cadena de valor que se integra en la red, esta distinción hace que la evaluación de la red de valor final sea robusta y objetiva en las estimaciones de biomasa y energía por etapa, ofrece resultados confiables, conservadores y sujetos a comprobación para que el tomador de decisiones pueda realizar cambios que favorezcan el rendimiento energético y económico del modelo de negocio.

Los resultados financieros de las cadenas de valor indican que es económicamente favorable invertir en tecnologías energéticas que utilicen los residuos agroindustriales en lugar de la alternativa que seguir igual y no hacer nada.

## CAPÍTULO 6. RED DE VALOR AGROINDUSTRIAL

### 6.1. Introducción.

Las redes de valor son conjuntos de funciones e intercambios que generan un determinado tipo de valor. Cualquier actividad con propósitos de intercambio puede ser entendido como una red de valor (RV). Una red de valor consiste en una organización focal, las partes interesadas y los intercambios de valor pueden ser tangibles e intangibles entre la organización central y sus partes interesadas.

La investigación busca desarrollar una red de valor basada en bioenergía integrando cadenas de valor avícolas y agroindustriales a partir de la gestión bioenergética de sus residuos para generar estrategias de negocios que permitan maximizar su rentabilidad económica y tecnológica.

En el capítulo 5 se desarrolla la metodología de 7 etapas a las cadenas de valor agroindustrial (CV) con el objetivo de evaluar cada una de las cadenas con sus respectivos residuos que utilizan para producir bioenergía, como son: Pollinaza, Lodos residuales, Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) y bagazo.

La presente investigación utiliza residuos agroindustriales proveniente de ocho unidades estratégicas de negocio (UEN), a través del caso de estudio de un grupo corporativo agroindustrial. En la sección 1.1 del anexo 1 se encuentra la descripción del proceso de las UEN de la cadena Avícola y en la sección 1.2 del anexo 1 se encuentra la descripción del proceso de las UEN de las cadenas cañero – azucareras.

La presente investigación utiliza un caso de estudio aplicando la metodología de Red de Valor y su gestión para el aumento o mejora de los beneficios obtenido del intercambio energético y económico.

### 6.2. Definición del objetivo de la red.

El objetivo de la presente investigación es desarrollar una RV de bioenergía integrando cuatro CV agroindustriales, a partir de la gestión bioenergética de sus residuos (lodos residuales, pollinaza, RAC y bagazo) para generar estrategias de negocios que permitan maximizar su rentabilidad económica y tecnológica.



### 6.3. Identificación y definición de los participantes de la red.

La Red de Valor está compuesta por cuatro cadenas de valor, la primera CV agroindustrial es del tipo avícola y las otras tres CV agroindustrial son del tipo Cañero – Azucarera.

La primera UEN está conformada por las Granjas de pollo de engorde que están dedicadas a producir pollo vivo, de este proceso se obtiene la pollinaza. La segunda UEN Planta procesadora de aves se dedica al procesamiento del pollo de engorde en diversas presentaciones, de este proceso se obtiene el lodo residual, estas dos UEN pertenecen a la cadena de valor avícola.

La tercera UEN son los Ingenios Azucareros que son las unidades industriales que procesan la caña de azúcar para elaborar azúcar. El grupo corporativo tiene tres ingenios azucareros, por tal motivo en nuestro estudio consideramos cada ingenio azucarero como una UEN, es decir el Ingenio de Huixtla (HX), el Ingenio San Pedro (SP) y el Ingenio Santa Clara (SC), son las tres UEN que forman la cadena de valor azucarera y de estos procesos se obtiene el Bagazo.

La cuarta UEN está integrada por las Empresas Agrícolas son tres fincas cañeras dedicadas a la producción y cosecha de caña de azúcar en el campo, y están representadas por tres UEN en distinta ubicación geográfica: Fomento Azucarero (FA), Excelencia Cañera (EC) y Cañaverales Mexicanos (CM) estas tres UEN forman la cadena de valor cañera y de sus procesos se obtiene el RAC.

La integración de UEN Ingenio Azucarero y UEN Empresa Agrícola forma la cadena de valor Cañero – Azucarera, la primera CV se integra por HX y FA, la segunda CV está integrada por SP y EC, y la tercera CV está integrada por SC y CM.

El grupo corporativo tiene otras empresas socias que están representadas en el nodo del mercado en el análisis de RV para simbolizar que: 1) el consumo de los productos (productos de línea y los subproductos bioenergía y biosólidos) está garantizado en cada una de las cadenas de valor y 2) para indicar donde se realiza la comercialización del flujo de valor de bioenergía y biosólidos en un flujo de valor monetario. En este nodo se evalúan los ingresos económicos para evaluar la rentabilidad de la Red en conjunto.

### 6.4. Identificación de las dimensiones de valor de los participantes de la red.

Cada cadena de valor está compuesta por nodos que representan las UEN mediante los cuales se dan intercambios de bioenergía, de materia prima representada por los residuos agroindustriales y por productos de línea finales con intercambios monetarios. Cada participante tiene sus funciones bien definidas para entregar valor a la UEN de la misma o de otra Cadena de Valor.

Los intercambios dan como resultado la conversión de valor, la cual, es la acción de alterar o transformar un tipo de valor en otro, tal como la transformación de biomasa (residuos agroindustriales) en bioenergía y biosólidos (vapor, biogás, electricidad y cenizas), obteniéndose como producto final una red de valor con base a la gestión de bioenergía.

La Red de Valor (RV) intercambia la bioenergía que se produce a partir de pollinaza y lodo residual en la cadena de valor avícola y la bioenergía que se produce del Bagazo y del RAC de las otras tres cadenas de valor cañero – azucareras, que tienen procesos similares pero están ubicadas en distintas zonas geográficas.

Cada modelado y análisis de las cadenas de valor (CV) se realiza por separado para finalmente integrarlas dentro de la presente Red, apoyadas principalmente en la simulación Monte Carlo.

En la UEN Granjas de pollo de engorde que producen pollo de engorde para su posterior venta en pie (vivo) producen más de 160 mil toneladas anuales de pollinaza y la UEN Planta procesadora de aves que realiza su procesamiento (ó sacrificio) para obtener carne en canal y mermas se producen más de 16,000 m<sup>3</sup> anuales de los lodos residuales.

Las UEN Ingenios Azucareros reciben caña de dos tipos de distintos proveedores: 1) UEN empresas agrícolas y de 2) diversos Agricultores, Ejidatarios, Productores que proveen de caña de azúcar al ingenio azucarero, y que fueron considerados para las cadenas de valor Cañero – Azucarera. En la CV cañero – azucarera 1 se utilizan 247 mil toneladas de bagazo y 26 mil toneladas de RAC, en la CV cañero – azucarera 2 se utilizan 302 mil toneladas de bagazo y 26 mil toneladas de RAC y en la CV cañero – azucarera 3 se utilizan 825 mil toneladas de bagazo y 20 mil toneladas de RAC.

La biomasa a base de pollinaza se utiliza para producir vapor en las calderas, para ser utilizado por los turbogeneradores para producir energía eléctrica, la biomasa a base de lodos residuales produce biogás al 75% de metano en los digestores anaeróbicos de tipo ovoide de para ser utilizado por los motogeneradores para producir energía eléctrica y la biomasa a base de Bagazo y RAC se utiliza para producir vapor en las calderas para: 1) ser utilizado por las turbinas de los molinos para mover las mazas cañeras que realizan la extracción de jugo de caña (no se produce energía eléctrica) y es utilizado 2) por los turbogeneradores para producir energía eléctrica.

## 6.5. Definición de los vínculos de valor.

La red de valor se representa por medio de un diagrama en el cual se colocan los nodos y sus relaciones (entregas), diferenciándose con diversos colores para una mejor comprensión. Las cadenas de valor se interrelacionan entre sí al entregar bioenergía o biofertilizantes y reciben como intercambio flujos monetarios.

A continuación se muestra dicha distinción, ver Tabla 1:

**Tabla 1. Definición de los vínculos de valor.**

<b>Flujos de intercambios de valor entre entidades</b>	<b>Color</b>
Unidades estratégicas de negocios	Verde
Tratamiento de residuos/Generación de energía	Amarillo
Flujo monetario	Azul claro
Ahorros por bioenergía (entre paréntesis)	Azul oscuro
Proveedores de materia prima	Verde
Mercado de biosólidos (vegetal y animal)	Gris
Mercado de productos finales	Morado
Otros mercados	Negro

Se propone el uso de colores para definir el flujo de intercambio de valor entre las entidades, una alternativa puede ser el uso de líneas con diferentes diseños.

Así, cada color representa un proceso o flujo diferente. Cabe destacar que en las figuras presentadas en la tesis muestran valores de los flujos, los cuales corresponden los resultados ponderados de las corridas de la simulación. En el caso del tratamiento de residuos/generación de energía se coloca un nodo para dicha actividad aunque esté dentro de la UEN correspondiente, esto debido a que se desea destacar la generación de energía.

Los nodos que se llaman mercado representan la comercialización de productos finales de primera línea y los productos obtenidos (cenizas y energía eléctrica) de la transformación energética de los residuos que realizan las empresas.

## 6.6. Análisis y modelo de Red de Valor de bioenergía

En esta sección se realiza una descripción del funcionamiento de los nodos de la red de valor.

### 1. Cadena de valor avícola utilizando Pollinaza.

De la UEN producción anual de pollo de engorde que genera en el nodo de producción de pollo, el 33% se envía al nodo de la UEN Planta Procesadora de Aves (PPA) porque tiene una capacidad instalada de 80 mil pollos procesados al día y el 67% de la producción se envía al nodo de Mercado de Pollo en Pie y Procesado para atender a los mercados de abasto.

En el nodo de producción de pollo se genera pollinaza de manera propia al interior de la empresa y se compra pollinaza adicional a otros proveedores de zonas cercanas representados por el nodo del mercado de pollinaza.

El volumen total de pollinaza ingresa al nodo sistema de generación, se realiza la producción de bioenergía en donde se genera vapor a partir de la combustión de la pollinaza y posteriormente energía. Una parte de la energía producida es consumida por la UEN producción de pollo de engorde para su consumo, el resto pasa al nodo de Mercado de Bioenergía para ser consumida por otras empresas del grupo Corporativo o vendida a otras empresas externas asociadas en la red.

Del nodo del sistema de Generación también se producen cenizas que se envían al Mercado de Biosólidos (ver Figura 13) que son consumidas por las empresas agrícolas del grupo corporativo para ser utilizadas como biofertilizantes en diversos cultivos agrícolas.

Los valores que se indican en la Figura 13 están disponibles en la sección 3.1 de anexos, y se presentan los valores para diferentes años. En esta figura se presentan los flujos de biomasa, bioenergía e importes del año 1, que son los resultados de la simulación Montecarlo, y son los que se utilizan en este diagrama.

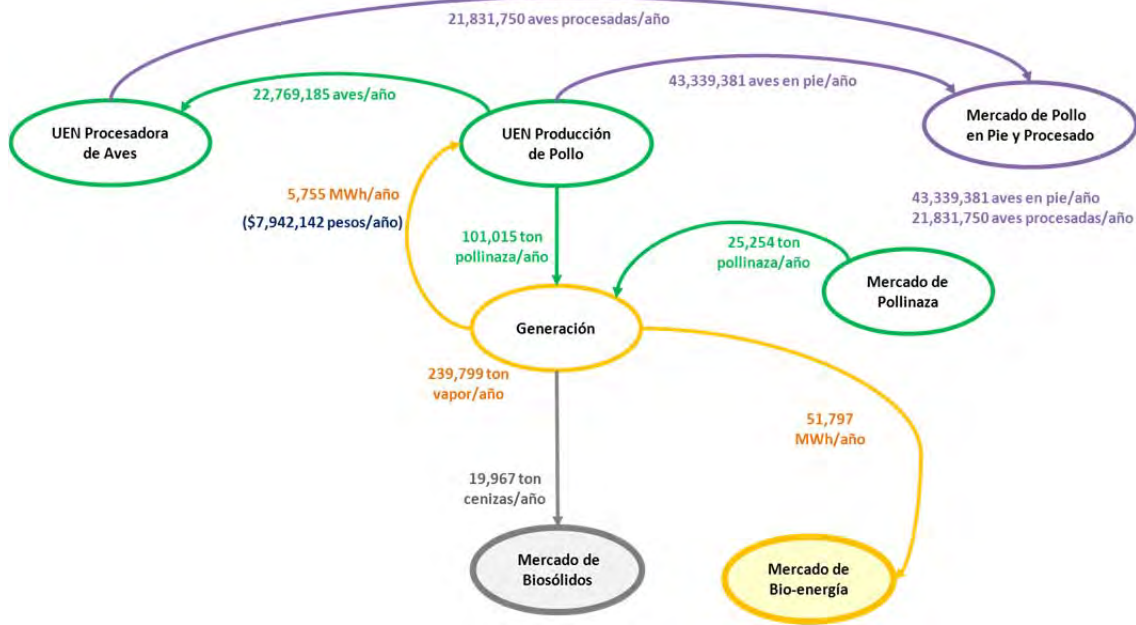


Figura 13. Representación de la CV Pollinaza

En la Tabla 2 se muestran los beneficios de la cadena de valor avícola usando pollinaza.

Tabla 2. Resumen de biomasa, bioenergía e ingresos de la pollinaza

Aportación	Cantidad	Unidad
Producción de Pollo de engorde	65,171,131	aves/año
Pollo para procesar	21,831,750	aves procesadas/año
Pollo en pie	43,339,381	aves en pie/año
Pollinaza propia	101,015	ton pollinaza/año
Pollinaza 3eros	25,254	ton pollinaza/año
Pollinaza total	126,269	ton pollinaza/año
Cenizas	19,967	ton cenizas/año
Cenizas (\$)	\$ 34,942,860	pesos/año
Vapor generado	239,798.98	ton vapor/año
Energía Autoconsumo	5,755	MWh/año
Energía Exportación	51,797	MWh/año
Energía total	57,552	MWh/año
Ingresos bioenergía	\$ 71,479,281	pesos/año
Ahorro por Bioenergía (\$)	\$ 7,942,142	pesos/año

## 2. Cadena de valor avícola utilizando Lodos residuales

Los pollos de engorde que son procesados en la UEN Planta Procesadora de Aves (PPA), se envían directamente al Mercado de Pollo en Pie y Procesado, porque son los productos de línea y tienen establecido su mercado.

Una proporción de pollo procesado de mala calidad es enviada al nodo de Mercado de Harinas y Aceites porque no están en condiciones de ser procesados para consumo humano.

En el nodo de la UEN Procesadora de aves se generan lodos residuales que son enviados al nodo del sistema de digestión anaeróbica para su tratamiento energético, en este nodo se produce el biogás que hace posible generar la energía eléctrica y los biosólidos.

La energía producida en este nodo se utiliza para autoconsumo en equipos eléctricos de la planta procesadora de aves y los biosólidos obtenidos son enviados al Mercado de Biosólidos (ver Figura 14) para su comercialización y consumo de empresas agrícolas para diversos cultivos.

Los valores que se indican en la Figura 14 están disponibles en la sección 3.2 de anexos, y se presentan los valores para diferentes años. En esta figura se presentan los flujos de biomasa, bioenergía e importes del año 1, que son los resultados de la simulación Montecarlo, y son los que se utilizan en este diagrama.

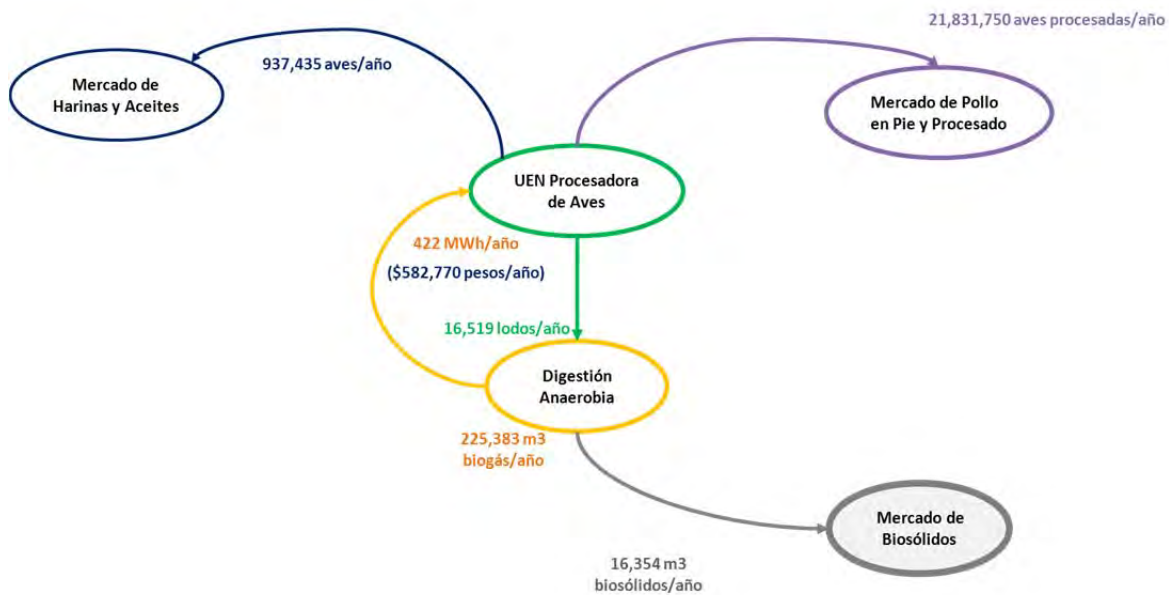


Figura 14. Representación de la CV Lodos Residuales

En la Tabla 3 se muestra el resumen de los beneficios de la cadena de valor avícola usando lodos residuales.

**Tabla 3. Resumen de biomasa, bioenergía e ingresos de los lodos residuales**

<b>Aportación</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Pollo de engorde procesado	22,769,185	pollos/año
Lodos	16,519	lodos/año
Biogás	225,383	m <sup>3</sup> biogás/año
Bioenergía	422	MWh/año
Ahorro por Bioenergía (\$)	\$ 582,770	pesos/año
Biosólidos	16,354	m <sup>3</sup> biosólidos/año
Biosólidos (\$)	\$ 1,689,887	pesos/año
Mermas	937,435	pollo/año
pollos procesados	21,831,750	Pollo procesado/año

### **Representación de la cadena de valor avícola utilizando pollinaza y lodo residual.**

Las cadenas avícolas tienen una relación tangible desde el inicio, ya que el nodo de Producción de Pollo alimenta al nodo de la Planta Procesadora de aves; de igual manera, ambas cadenas se unen en una misma red por medio del nodo de Mercado de Biosólidos alimentado por biosólidos y cenizas, los cuales generan un flujo monetario para cada cadena avícola.

En el nodo de Mercado de Biosólidos están representados los biosólidos (biosólidos y cenizas de tipo vegetal y animal) que son vendidos a otras empresas del grupo corporativo o empresas socias de la red para su aprovechamiento (ver Figura 15).

La Figura 15 representa la unión de las dos UEN en un solo diagrama para visualizar el intercambio que se da en la cadena de valor avícola.





del sistema de cogeneración al interior del ingenio azucarero para que sea utilizado como combustible al igual que el bagazo en las calderas y lograr producir vapor.

La biomasa total generada (Bagazo y RAC) se utiliza en el nodo del sistema de cogeneración para producir energía eléctrica, un 10% se regresa a la UEN Santa Clara para utilizarlo en su autoconsumo y el 90% restante es energía eléctrica que se envía al nodo de mercado de bioenergía para ser consumida y comercializada por las empresas del grupo corporativos u otras empresas asociadas en la red.

Del nodo de cogeneración también se producen cenizas que son enviadas al nodo de mercado de biosólidos para ser consumidos y comercializados por empresas agrícolas del grupo corporativo o empresas asociadas en la red para diversos cultivos agrícolas.

De los nodos de mercado de bioenergía y mercado se produce el valor monetario de la comercialización de bioenergía y biosólidos.

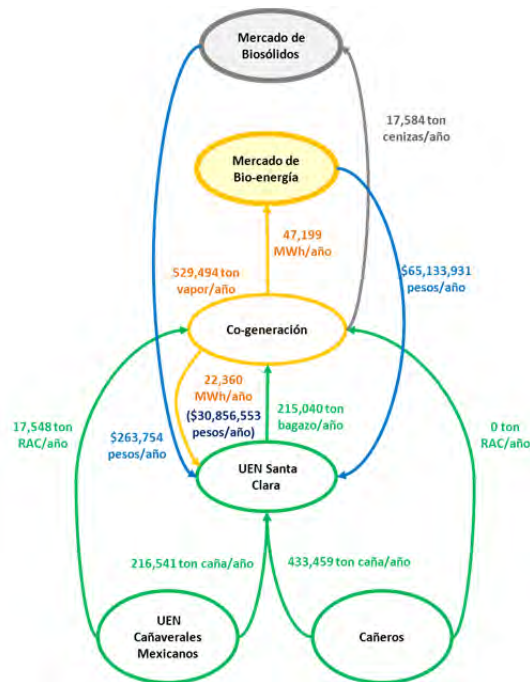


Figura 16. Representación de la CV usando RAC y bagazo en el Ingenio 1

En la Tabla 4 se muestra el resumen de los beneficios de la cadena de valor cañero – azucarera usando bagazo y RAC.

Tabla 4. Resumen de biomasa, bioenergía e ingresos de los RAC y Bagazo en Santa Clara

Aportación	Cantidad	Unidad
Caña	650,000	ton caña total
Caña (aprovechable)	216,541	ton caña/año
Caña (no aprovech.)	433,459	ton caña/año
RAC (caña mec. verde)	17,548	ton RAC/año
RAC (caña quemada)	-	ton RAC/año
Bagazo	215,040	ton bagazo/año
Bioenergía RAC	9,172	MWh/año
Bioenergía bagazo	42,187	MWh/año
Bioenergía total	51,359	MWh/año
Vapor equivalente	529,494	ton vapor/año
Bioenergía autoconsumo	22,360	MWh/año
Bioenergía venta	47,199	MWh/año
Ingresos Bioenergía	\$ 65,133,931	pesos/año
Ahorro por Bioenergía (\$)	\$ 30,856,553	pesos/año
Biosólidos	17,584	ton cenizas/año
Biosólidos (\$)	\$ 263,754	pesos/año
Azúcar	75,043	ton azúcar/año

Los nodos UEN Excelencia Cañera y el nodo Cañeros envían la caña de azúcar al nodo UEN San Pedro que procesa la caña de azúcar para elaborar azúcar y obtener bagazo. La UEN Excelencia Cañera adicionalmente envía RAC que fue recolectado en el campo hacia el nodo del sistema de cogeneración al interior del ingenio azucarero para que sea utilizado como combustible al igual que el bagazo en las calderas y lograr producir vapor.

La biomasa total generada (Bagazo y RAC) se utiliza en el nodo del sistema de cogeneración para producir energía eléctrica, un 10% se regresa a la UEN San Pedro para utilizarlo en su autoconsumo y el 90% restante es energía eléctrica que se envía al nodo de mercado de bioenergía para ser consumida y comercializada por las empresas del grupo corporativos u otras empresas asociadas en la red.

Del nodo de cogeneración también se producen cenizas que son enviadas al nodo de mercado de biosólidos para ser consumidos y comercializados por empresas agrícolas del grupo corporativo o

empresas asociadas en la red para diversos cultivos agrícolas. De los nodos de mercado de bioenergía y mercado se produce el valor monetario de la comercialización de bioenergía y biosólidos.

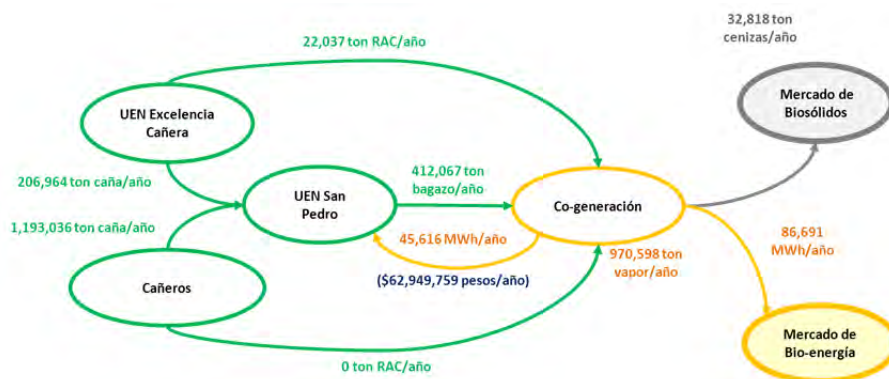


Figura 17. Representación de la CV usando RAC y bagazo en el Ingenio 2

En la Tabla 5 se muestra el resumen de los beneficios de la cadena de valor cañero – azucarera usando bagazo y RAC.

Tabla 5. Resumen de biomasa, bioenergía e ingresos de los RAC y Bagazo en San Pedro

Aportación	Cantidad	Unidad
Caña	1,400,000	ton caña total
Caña (aprovechable)	206,964	ton caña/año
Caña (no aprovech.)	1,193,036	ton caña/año
RAC (caña mec verde)	22,037	ton RAC/año
RAC (caña quemada)	-	ton RAC/año
Bagazo	412,067	ton bagazo/año
Bioenergía RAC	25,383	MWh/año
Bioenergía bagazo	106,924	MWh/año
Bioenergía total	132,307	MWh/año
Vapor equivalente	970,598	ton vapor/año
Bioenergía autoconsumo	45,616	MWh/año
Bioenergía venta	86,691	MWh/año
Ingresos bioenergía	\$ 119,634,108	pesos/año
Ahorro por Bioenergía (\$)	\$ 62,949,759	pesos/año
Biosólidos	32,818	ton cenizas/año

Biosólidos (\$)	\$	492,274	pesos/año
Azúcar		139,627	ton azúcar/año

Los nodos UEN Fomento Azucarero y el nodo Cañeros envían la caña de azúcar al nodo UEN Huixtla que procesa la caña de azúcar para elaborar azúcar y obtener bagazo. La UEN Fomento Azucarero adicionalmente envía RAC que fue recolectado en el campo hacia el nodo del sistema de cogeneración al interior del ingenio azucarero para que sea utilizado como combustible al igual que el bagazo en las calderas y lograr producir vapor.

La biomasa total generada (Bagazo y RAC) se utiliza en el nodo del sistema de cogeneración para producir energía eléctrica, un 10% se regresa a la UEN Huixtla para utilizarlo en su autoconsumo y el 90% restante es energía eléctrica que se envía al nodo de mercado de bioenergía para ser consumida y comercializada por las empresas del grupo corporativos u otras empresas asociadas en la red.

Del nodo de cogeneración también se producen cenizas que son enviadas al nodo de mercado de biosólidos para ser consumidos y comercializados por empresas agrícolas del grupo corporativo o empresas asociadas en la red para diversos cultivos agrícolas. De los nodos de mercado de bioenergía y mercado se produce el valor monetario de la comercialización de bioenergía y biosólidos.

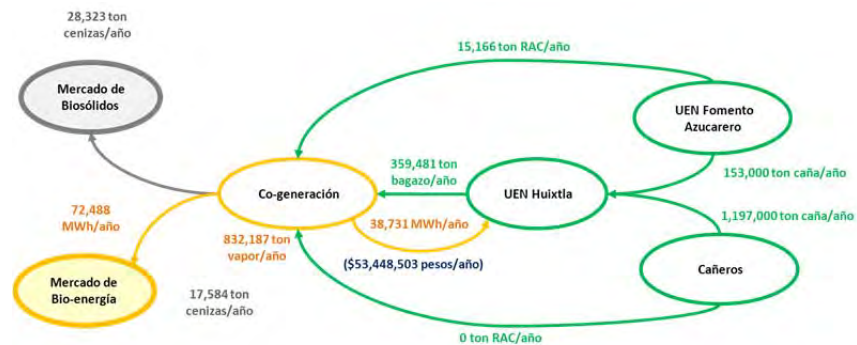


Figura 18. Representación de la CV usando RAC y bagazo en el Ingenio 3

En la Tabla 6 se muestra el resumen de los beneficios de la cadena de valor canero – azucarera usando bagazo y RAC.

Tabla 6. Resumen de biomasa, bioenergía e ingresos de los RAC y Bagazo en Huixtla

Aportación	Cantidad	Unidad
Caña	1,350,000	ton caña total
Caña (aprovechable)	153,000	ton caña/año
Caña (no aprovech.)	1,197,000	ton caña/año
RAC (caña mec verde)	15,166	ton RAC/año
RAC (caña quemada)	-	ton RAC/año
Bagazo	359,481	ton bagazo/año
Bioenergía RAC	4,527	MWh/año
Bioenergía bagazo	89,610	MWh/año
Bioenergía total	94,137	MWh/año
Vapor equivalente	832,187	ton vapor/año
Bioenergía autoconsumo	38,731	MWh/año
Bioenergía venta	72,488	MWh/año
Ingresos Bioenergía	\$ 100,034,120	pesos/año
Ahorro por Bioenergía (\$)	\$ 53,448,503	pesos/año
Biosólidos	28,323	ton cenizas/año
Biosólidos (\$)	\$ 424,850	pesos/año
Azúcar	133,214	ton azúcar/año

El RAC que se obtiene de los proveedores de caña, que en el caso de los cañeros es de 0 toneladas, debido a que no existe cosecha mecanizada en verde. El bagazo se obtiene en la molienda de la caña y es entregada al nodo “Co-generación”, en el cual por medio de calderas que combustionan estos residuos y se obtiene vapor. El vapor es transformado en energía eléctrica por el mismo nodo, el cual alimenta al ingenio con energía eléctrica, la energía restante es transmitida usando la red nacional de energía eléctrica de la paraestatal Comisión Federal de Electricidad (CFE) para ser comercializada a empresas socias. La entrega de azúcar es visible en figuras posteriores.

El retorno de energía eléctrica representa un ahorro en el gasto del ingenio, por lo cual la línea de retorno tiene dos valores diferentes, el primero en términos de energía y el otro en términos monetarios.

## Representación de las Cadenas Agroindustriales (Avícola y Cañero – Azucarera)

Las cadenas agroindustriales no tienen una interacción tangible en sus etapas iniciales, es hasta la entrega de energía que se puede decir que se unen en una misma red, por lo que dicha red queda representada en la Figura 19, este diagrama representa la fusión de las tres cadenas cañero – azucareras presentando biomasa, bioenergía, biosólidos y valor monetario de manera simultánea.

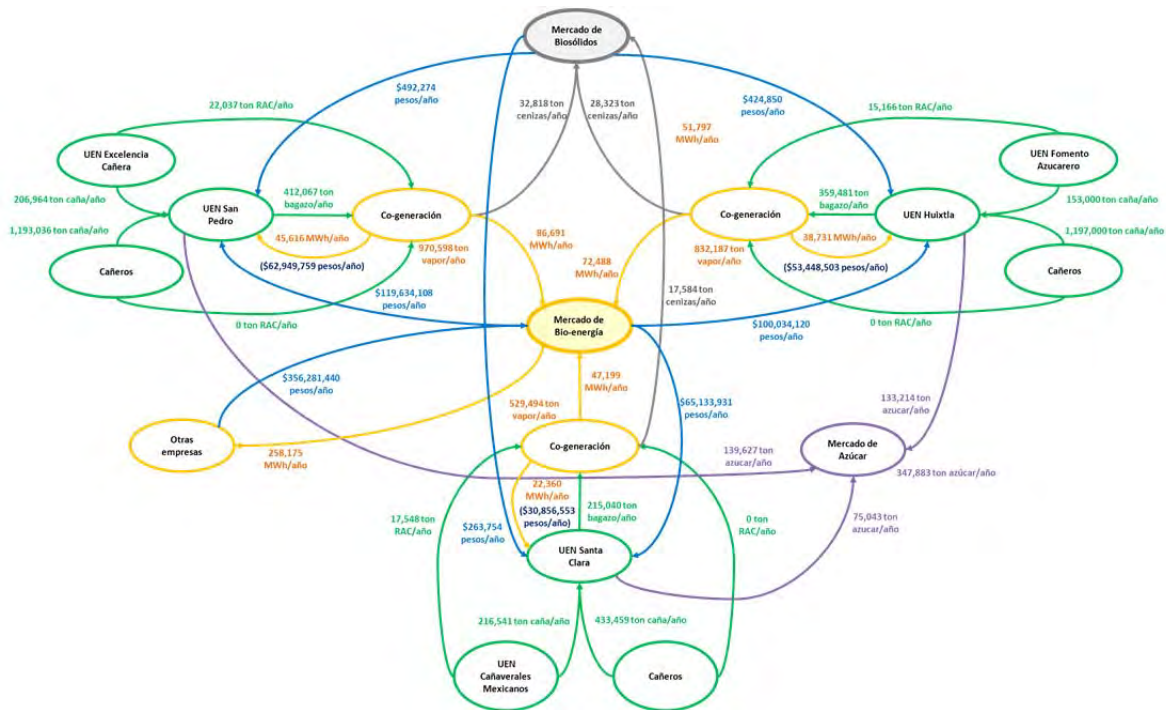


Figura 19. Representación de las cadenas de valor (CV) agrícolas.

Como se puede observar existe una entrega de “biosólidos” para cada uno de los ingenios. Estos biosólidos son las cenizas que se generan de la combustión del bagazo y el RAC, dichas cenizas tiene un valor comercial como fertilizantes de tierras, por lo que se consideró también este intercambio entre nodos.

Los ingresos económicos suceden una vez que los sub-productos llegan al mercado correspondiente, los cuales entregan ganancias a los ingenios, ya sea por bioenergía o por biosólidos. En el caso del azúcar no se contempló a fondo el mercado azucarero debido a las limitaciones de la presente investigación. En el caso de los biosólidos existe un mercado conformado por empresas externas, este nodo se mostrará más adelante en la red completa.

## Representación de la Red de Valor

La interacción entre las primeras cadenas (avícolas) y las agroindustriales, como se mencionó, ocurre en la entrega de biosólidos y energía eléctrica. Es por lo anterior que la Red de Valor queda representada como se puede observar en la Figura 20. Este diagrama representa la fusión de la cadena avícola y las tres cadenas de valor cañero – azucareras de manera integrada con intercambios de manera simultánea, en este punto se realizan la sincronización de las operaciones de biomasa y energía de la red de valor, para proceder a su optimización.

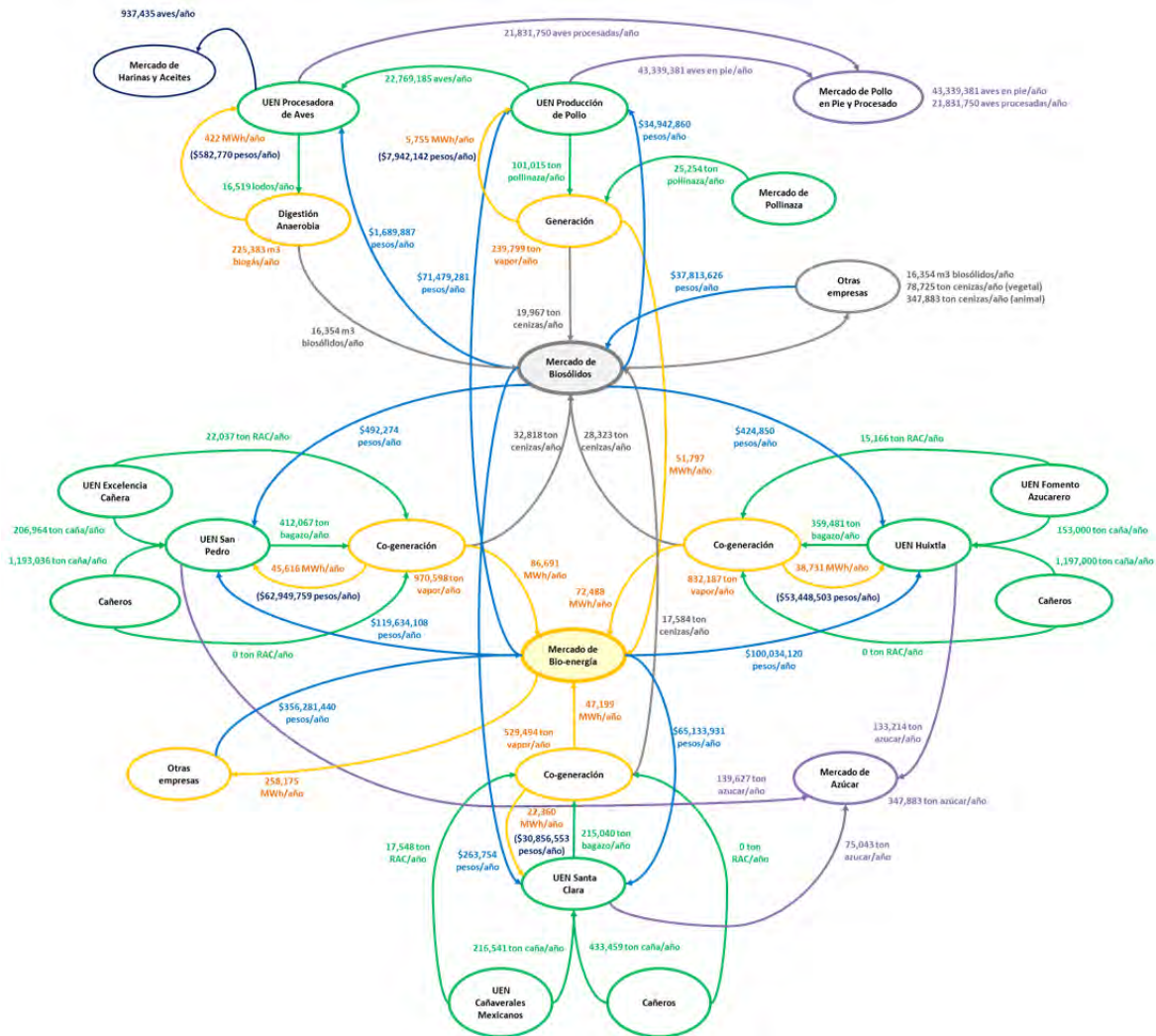


Figura 20. Representación de la Red de Valor.

En la Tabla 7 se muestra el resumen de los beneficios de todas las cadenas integradas en la RV.



Tabla 7. Resumen de biomasa, bioenergía e ingresos de la Red de valor

<b>Aportación</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Bioenergía total (venta)	258,175	MWh/año
Ingresos bioenergía	\$ 356,281,440	pesos/año
Azúcar total	347,883	ton azúcar/año
Biosólidos (lodos)	16,354	m3 biosólidos/año
Biosólidos (RAC y bagazo)	78,725	ton cenizas/año (vegetal)
Biosólidos (pollinaza)	347,883	ton cenizas/año (animal)
Ingresos por biosólidos	\$ 37,813,626	pesos/año

La energía llega a un solo nodo denominado “Mercado de Bioenergía” el cual se rige por la CFE para poder realizar ventas a “Otras empresas”. El nodo “Mercado de Biosólidos” es el que recibe todos los residuos de la generación de energía para venderlos como fertilizantes de suelos, el cual está regido por órganos gubernamentales como la SAGARPA y SEMARNAT por medio de las normas oficiales mexicanas (NOM’s).

## 6.7. Optimización de la Red de Valor

El objetivo de esta integración es aumentar los beneficios económicos obtenidos en cada cadena, por lo que se crean escenarios de operación basados en las variables más importantes de los modelos, a partir de los cuales se desarrollan estrategias de negocios que facilitan la toma de decisiones. Estos escenarios reflejan la sensibilidad del sistema debido a la presencia de incertidumbre y relaciones no-lineales, los cuales reportan en su mayoría una TIR atractiva (>10%).

El resultado es una red de valor basada en la gestión de la generación de bioproductos (bioenergía y biofertilizantes) obtenidos a partir de la transformación de residuos agroindustriales por cadena.

### 6.7.1. Sensibilidad de la cadena de valor usando pollinaza

La CV de Pollinaza es el resultado de tres etapas: 1) identificación de la tecnología a utilizar: Combustión de pollinaza seca, 2) optimización con Algoritmos Genéticos para determinar el tipo de pollinaza a combustionar: pollinaza seca y 3) Generación de escenarios con diferentes grados de humedad para determinar el tipo de pollinaza que debe ser combustionada: pollinaza 40% de humedad. Debido a que la CV usando Pollinaza muestra el resultado de la realización de un análisis de riesgo, una optimización y una evaluación financiera, se realizará un análisis de sensibilidad en los aspectos económicos y bioenergéticos; con el objetivo de identificar las variables de entrada que



son relevantes para el valor de la variable salida, llamada TIR y Producción de MWh, con un horizonte de planeación para el año 2021.

El método Montecarlo permite modelar la incertidumbre de sistemas complejos, donde intervienen variables y parámetros inciertos que simulan las condiciones físicas, químicas, de operación y económicas del proceso de transformación de la pollinaza en energía térmica y eléctrica, con ello es posible estimar el valor esperado de las variables que afectan el rendimiento energético y económico de la pollinaza en cada etapa del proceso, logrando identificar y medir el riesgo existente para mejorar la toma de decisiones con el mínimo riesgo.

El objetivo de la realización del análisis de sensibilidad, es el identificar las variables de entrada que son relevantes para los valores de las variables de salida TIR y “MWh Producidos (2021)”.

El primer paso para llevar a cabo el análisis de sensibilidad es la identificación de las variables de entrada del modelo son: población de aves y horas de operación y los parámetros inciertos del modelo son: kg de vapor por kg de pollinaza, cantidad de pollinaza, tiempos perdidos (falla y mantenimiento), eficiencia de generación, % cenizas, mermas, kg de vapor por kwh, precio kwh, rendimiento de pollinaza por ave, tipo de cambio (dólar-pesos).

### 1. Modelo matemático

Las ecuaciones para el aspecto económico y bioenergético se muestran a continuación:

#### Ecuación 3. Tasa interna de retorno

$$TIR = \sum_{j=0}^n \frac{FlujoNeto_j}{(1+i)^j} = 0$$

#### Ecuación 4. Producción de energía eléctrica (MWh)

$$EnergíaMWh = Capacidad eGeneración * Horas al Año$$

La capacidad nominal de generación, se determina mediante la siguiente ecuación:

#### Ecuación 5. Capacidad de Generación Eléctrica

$$Capacidad eGeneración = \frac{DemandadelaPollinaza * \left( \frac{kgdeVapor}{kgdePollinaza} \right)}{\left( \frac{kgdeVapor}{kWh} \right)}$$

De la siguiente ecuación se obtiene el valor para la demanda de la pollinaza:

**Ecuación 6. Demanda de Pollinaza**

$$DemandadePollinaza = \frac{PollinazaparaGeneración}{HorasEfectivasdeOperación}$$

**Ecuación 7. Demanda de Pollinaza para generación**

$$PollinazaparaGeneración = (PollinazaAñoCero + 25\%deCompra) * (\%TMCA)^{7años}$$

Los valores de “Kg de vapor por Kg de pollinaza” y “Kg de vapor por KWh” están definidos por distribuciones de probabilidad

**Ecuación 8. Rendimiento de vapor por pollinaza**

$$\frac{kgdeVapor}{kgdePollinaza} = Triangular(1.8,2,2.1)$$

**Ecuación 9. Rendimiento de vapor por kilowatt-hora**

$$\frac{kgdeVapor}{kWh} = Triangular(3.9,4.2,4.4)$$

**2. Económico**

El modelo a analizar, está alimentado por 66 variables de entrada. Se propone una simulación Monte Carlo con 1,000 iteraciones para identificar las variables de entrada que tienen mayor impacto en la variable de salida TIR. En la Figura 21 se muestra el gráfico de tornado con las variables y los parámetros que más impactan a la TIR.

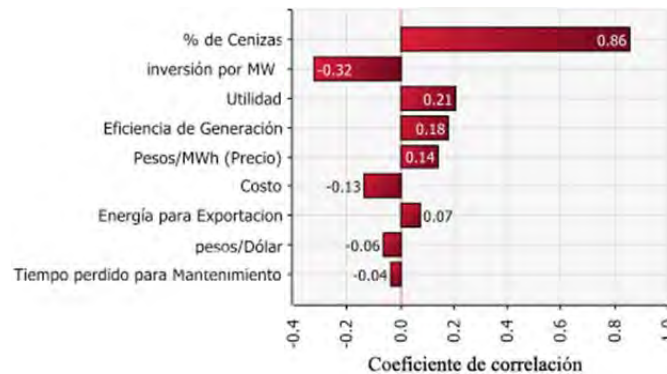


Figura 21. Gráfico de tornado para la TIR optimizada en la cadena de valor con pollinaza (prueba 1, económico)

Como se puede observar en el gráfico de Tornado, las variables que tienen un mayor impacto positivo sobre la TIR, son % de Cenizas, la cual tiene mayor impacto dentro del modelo con un coeficiente de 0.82, Utilidad con un coeficiente de 0.21, Eficiencia de Generación con 0.18 de coeficiente, Pesos/MWh y la Energía para Exportación con un 0.14 y 0.07 de coeficiente respectivamente. Mientras que las variables Inversión por MW tiene un mayor impacto negativo hacia la TIR con un 0.32 de coeficiente, Costo con un 0.13, Cambio Pesos/dólar y el tiempo para mantenimiento con un coeficiente del 0.06 y 0.04 respectivamente.

Dado que las 66 variables de entrada interactúan al mismo tiempo en la simulación, al realizar el análisis de sensibilidad deben considerarse sólo aquellas variables que tienen mayor impacto para la variable de salida. Como resultado del análisis de las variables de entrada con respecto al impacto que tienen en la variable de salida, se encontró que de las 66 Inputs, sólo 19 impactan la TIR.

Sin embargo, de las 19 variables de entrada identificadas, las variables Pesos /t pollinaza para el precio de seca, de 1ra y 2da en temporada buena, así como las variables Pesos / t pollinaza para el precio en seca, 1ra y 2da en temporada mala; pueden representarse en una sola variable, debido a que no importa si la pollinaza es seca, es de primera o segunda, ya que toda la pollinaza es quemada para la generación de energía.

Las variables de entrada del modelo son: costo, utilidad, % cenizas / t pollinaza, eficiencia para cogeneración / cantidad, mdd /MW (inversión por MW), pesos /dólar tipo de cambio, pesos/ MWh (precio), tiempo perdido para mantenimiento (programado), % de humedad en la pollinaza, kg vapor /kWh, kg/kg de pollinaza 40° humedad, pesos / MWh costo de servicios conexos, reducción días de ciclo de retiro de pollinaza, pesos / t pollinaza precio temporada buena, pesos / t pollinaza precio temporada mala. En la Figura 22 se presentan las variables de entrada que tiene mayor impacto hacia la TIR y al modelo de simulación, se realiza la simulación con 5,000 iteraciones.

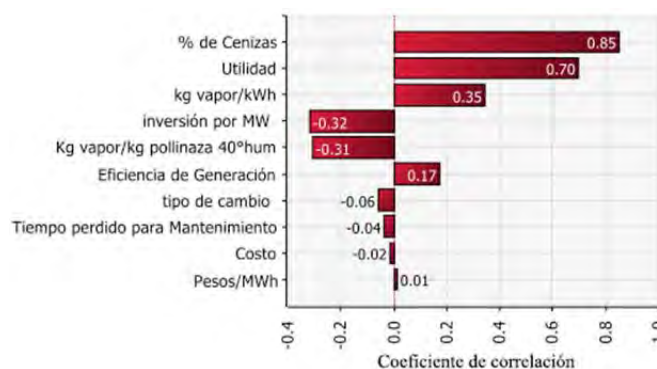


Figura 22. Gráfico de tornado para la TIR optimizada en la cadena de valor con pollinaza (prueba 2, económico).

En este tipo de gráfico, se utiliza el análisis de regresión, el cual muestra los valores de las variables de entrada comparados regresivamente con los valores de salida, es decir, el coeficiente calculado por cada variable de entrada mide la sensibilidad con respecto a la distribución de entrada de la variable.

Se puede concluir que de las 15 variables de entrada, solamente las variables % de Ceniza, Utilidad, kg vapor/kWh, inversión por MW, kg vapor/ kg de pollinaza 40° humedad, Eficiencia de generación, Peso /dólar (tipo de cambio), Tiempo perdido para mantenimiento, Costo y Precio MWh, impactan a la variable de salida TIR ya sea que la afecten de manera positiva o negativa. En la Tabla 8 se muestran los valores de sus coeficientes de correlación negativos, los cuales indican que las variables tienen una correlación negativa moderada con respecto a la variable de salida.

**Tabla 8. Coeficientes negativos de correlación en la cadena de valor con pollinaza (económico).**

<b>Variable</b>	<b>Coef. Correl. de Pearson</b>
Costo	-0.1592
Inversión MW	-0.3393
Pesos /Dólar (tipo de cambio)	-0.0579
kg vapor/kWh	-0.114
Tiempo perdido de mantenimiento	-0.0778

Los coeficientes de correlación positivos indican que a medida que los valores de dichas variables aumentan también lo hace la variable de salida (TIR) teniendo mayor correlación la variable % de Cenizas con una correlación positiva alta; mientras que para las variables Utilidad, Eficiencia de Generación, Pesos /MWh (Precio) y Kg Pollinaza 40° hum., la correlación es positiva baja. En la Tabla 9 se muestra los coeficientes de correlación positivos.

**Tabla 9. Coeficientes positivos de correlación en la cadena de valor con pollinaza (económico).**

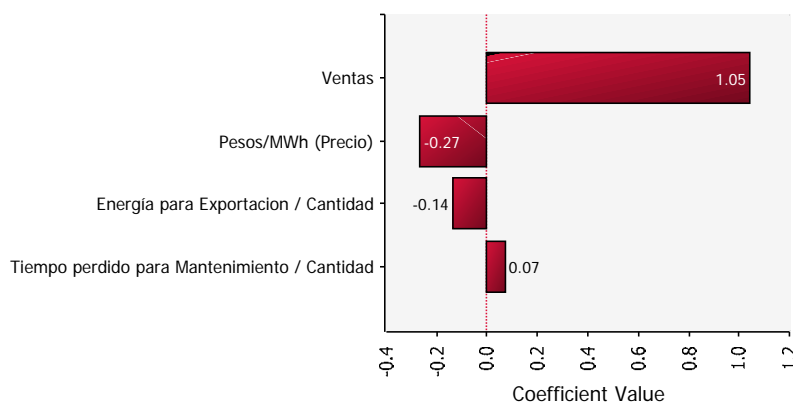
<b>Variable</b>	<b>Coef. Correl. de Pearson</b>
Utilidad	0.2683
% Cenizas	0.8693
Eficiencia de Generación	0.1678
Pesos / MWh (Precio)	0.2117
Kg Pollinaza 40° hum	0.1218

Habiendo analizado los resultados arrojados por el gráfico de tornado, se puede concluir que la variable que mayor impacto hacia la variable de salida TIR es la variable % de Cenizas, ya que a medida que el valor de ésta aumenta lo hará en el mismo sentido la variable TIR.

### 3. Energía.

En el análisis de sensibilidad de la variable de salida “MWh Producidos (2021)”, se realizó el mismo procedimiento que para la variable de salida TIR.

Como resultados preliminares, se encontró que las variables que tienen mayor impacto sobre la variable “MWh Producidos (2021)”, se muestran en la Figura 23.

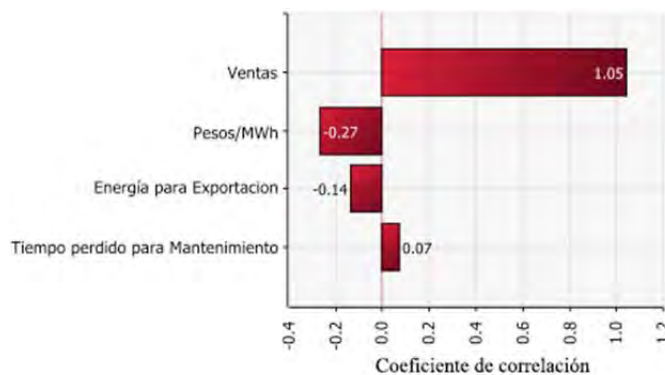


**Figura 23. Gráfico de tornado para la energía generada en 2021 en la cadena de valor con pollinaza (energía).**

Como se puede observar en el gráfico de tornado, la variable que mayor impacta a la variable de salida, es la variable ventas, con un coeficiente de regresión de 1.05, seguida de la variable tiempo perdido por mantenimiento con un coeficiente de regresión de 0.07. mientras que las variables que impactan de manera negativa en el modelo, son Pesos/MWh (precio) con un 0.27 y energía para exportación con un 0.14.

Las variables de entrada del modelo son: contenido de humedad, kg vapor/kWh, kg vapor/kg pollinaza 40° hum, reducción de días de retiro pollinaza, rendimiento de la planta de cogeneración, tiempo perdido de mantenimiento, valor calorífico alto base seca, ventas, energía para exportación, pesos MWh (precio).

Posteriormente se realizó un análisis de la interrelación de las variables de entrada hacia la variable de salida (energía), para determinar cuáles son significativas para el resultado. En la Figura 24 se muestran las 4 variables de entrada que afectan significativamente el modelo, de un total de 68 variables de entrada.



**Figura 24. Gráfico de tornado para la energía generada en la cadena de valor con pollinaza (energía).**

Como se puede observar en la figura anterior, la variable que mayor impacto sigue teniendo es la variable “Ventas”; sin embargo existen otras dos variables que a diferencia de la Figura 22 están impactando a la variable de salida, la variable Kg vapor/MWh y la variable Kg vapor/kg pollinaza 40°hum; mientras que la variable energía para exportación es aquella que impacta en menor cantidad a la variable de respuesta. La variable tiempo perdido para mantenimiento conserva su mismo valor de salida que en la simulación anterior. En la Tabla 10 se muestra el coeficiente de correlación de Pearson de las 6 variables de entrada.

**Tabla 10. Coeficientes de correlación en la cadena de valor con pollinaza (energía).**

Variable	Coef. Correl. Pearson
Kg vapor/MWh	-0.7379
Kg vapor/Kg pollinaza 40° hum	0.6608
Tiempo perdido para mantenimiento	0.00843
Ventas	0.7471
Energía para exportación	0.0222
Pesos/MWh (precio)	0.00764

Como se observa en la tabla anterior, la variable Kg vapor/MWh tiene un coeficiente de correlación negativo con un valor de -0.7379 lo cual indica que la variable tiene una correlación negativa alta con respecto a la variable de salida MWh producidos para el año 2021.

Las variables Tiempo perdido por mantenimiento, Energía para exportación y Pesos/MHW (precio) presentan un coeficiente de correlación de Pearson muy bajo, sin embargo al ser positivo, a medida de que el valor de éstas variables aumenta o disminuye el valor de la variable de salida “MWh

producidos (2021)” también lo hace. Las variables que mayor coeficiente de correlación presentan son: Kg vapor/kg pollinaza 40° hum., y Ventas con coeficientes de correlación de 0.6608 y 0.7471 respectivamente

### 6.7.2. Optimización de la cadena de valor usando lodos residuales.

En la CV de Lodos Residuales se tienen 3 diferentes tipos de aves que se procesan para obtener carne en canal, de las cuales se obtienen los residuos orgánicos que se convierten en lodos residuales, por lo que la optimización se enfoca en determinar la cantidad idónea de cada tipo de ave que debería ser procesada en la PPA para lograr una mejor calidad y cantidad de biogás. La función objetivo es la TIR, debido a que toda la energía generada será autoconsumida en la planta, lo cual generará ahorros por la sustitución de la energía convencional por la bioenergía a partir de lodos residuales.

El primer paso para la modelación consistió en la identificación de las variables de entrada que intervienen en la generación de lodos residuales es: aves procesadas por tipo y los parámetros inciertos son. precio de kWh, rendimiento de biogás (m<sup>3</sup> biogás/kg stv removido), eficiencia de remoción (%), ST en lodo (%), STV por ST (%), composición de residuos en lodo (%), eficiencia de recuperación de residuos (%), residuos generados en el proceso, producto defectuoso (%), efecto del cloro en rendimiento de biogás (%), efecto del colorante en rendimiento de biogás (%).

La única variable controlable es la cantidad de aves que se procesan por día en la PPA, siendo 3 en realidad por los 3 tipos de pollos que se tratan en el modelo. Se debe tener en cuenta que estas 3 variables son las iniciales del modelo de tal manera que provocan toda la producción de lodos residuales.

#### 1. Modelo Matemático

Este modelo se basó en la TIR para su optimización, tomando en cuenta un horizonte de planeación de 10 años. La nomenclatura se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11. Nomenclatura para el modelo matemático cadena de valor usando lodos residuales**

Variable	Identificación
Pollo seco natural	X1
Pollo hidratado natural	X2
Pollo hidratado pintado	X3

---

Tasa de interés	$i$
Límite inferior del tipo de pollo n	LIXn
Límite superior del tipo de pollo n	LSXn
Distribución uniforme resultante para el tipo de pollo n	DUXn
Límite inferior de capacidad del tipo de pollo n	LICXn
Límite superior de capacidad del tipo de pollo n	LSCXn

---

Función objetivo: Maximizar

**Ecuación 10. Tasa interna de retorno de lodos residuales**

$$TIR = \sum_{j=0}^n \frac{FlujoNeto_j}{(1+i)^j} = 0$$

Sujeto a las restricciones:

El primer conjunto de restricciones establece que los límites inferiores deberán ser menores en todo momento a los límites superiores, para cada tipo de ave.

1.  $LIX_1 \leq LSX_1$
2.  $LIX_2 \leq LSX_2$
3.  $LIX_3 \leq LSX_3$

La 4ª restricción establece que la suma de las producciones de los tipos de aves no podrá sobrepasar el límite de capacidad de producción de la PPA (110,000 aves/día).

$$4. \quad X_1 + X_2 + X_3 \leq CapacidadP PA$$

Ya que el rango se modeló con una distribución uniforme, el resultado de esta deberá estar dentro de los límites de producción para cada tipo de ave.

5.  $DUX_1 \leq LSCX_1$
6.  $DUX_1 \geq LICX_1$
7.  $DUX_2 \leq LSCX_2$
8.  $DUX_2 \geq LICX_2$



$$9. DUX_3 \leq LSCX_3$$

$$10. DUX_3 \geq LICX_3$$

Cada uno de los tipos de ave que se procesan tienen sus propias características, por lo que el modelo de optimización decidirá la cantidad a procesar de cada tipo a partir de estas diferencias y aportes a la TIR.

## 2. Optimización

La optimización se llevó a cabo con Algoritmos Genéticos, al ser un modelo no-lineal y con presencia de incertidumbre. El algoritmo genético busca la mejor combinación de las variables de entrada para lograr un resultado cuasi-óptimo. El modelo corrió por un periodo de 5 horas y 23 minutos, dentro de lo cual se encontraron 96 generaciones válidas, es decir, 96 resultados que cumplen al 100% con las restricciones introducidas.

La Figura 25 presenta la evolución de la TIR, desde la primera generación válida hasta la última encontrada.

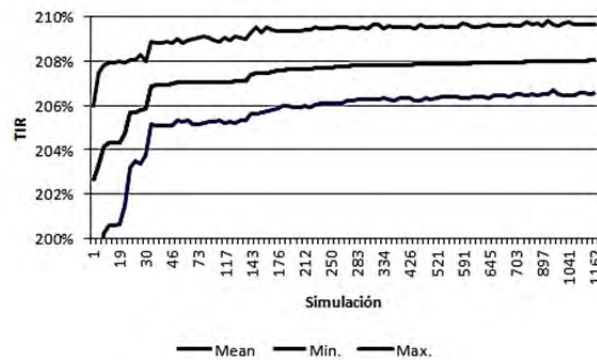


Figura 25. Comportamiento de la TIR optimizada en la cadena de valor usando lodos residuales

Por lo que los resultados para cada uno de los tipos de aves procesadas se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados de la optimización de la Cadena de valor usando lodos residuales

Variable	Valor del Rango (Uniforme)	Unidad
- Ave tipo seco natural*	[42,057 – 42,150]	aves/día
- Ave tipo hidratado natural*	[34,404 – 34,553]	aves/día
- Ave tipo hidratado pintado*	[33,204 – 33,295]	aves/día
- TIR	30.84%	%

El modelo matemático está diseñado para obtener la cantidad de aves a procesar por día, por tal motivo para obtener el resultado anual de la operación de la PPA se multiplica por 313 día laborales y así se obtiene el valor anual, la cantidad de aves a procesar por día no significa que no se deba salir de ese rango en un determinado día, sino que el promedio de la operación de ‘n’ días debe estar entre este rango y no cada día en particular, para obtener los mejores ingresos.

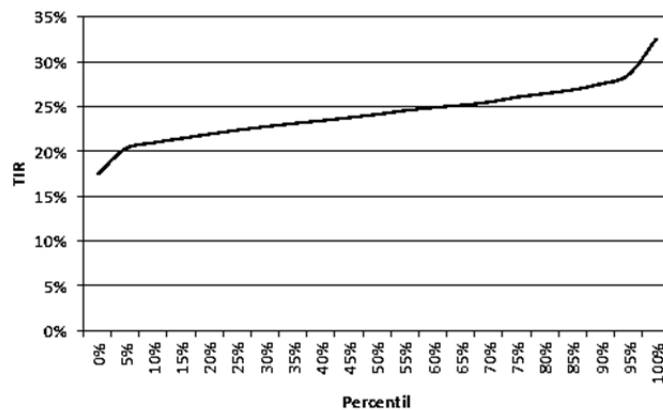
La siguiente Tabla 13 muestra estadísticos obtenidos de los resultados de la optimización.

**Tabla 13. Estadísticos de la optimización en la Cadena de valor usando lodos residuales**

Variable	Valor	Unidad
Min	22.77%	TIR
Media	30.84%	TIR
Max	38.62%	TIR
Mejora	100%	

\*Probabilidad de obtener una  $TIR \geq 20\%$

La Figura 26 muestra el comportamiento de los percentiles, el cual se puede ver no es lineal, pues depende de parámetros inciertos modelados con distribuciones de probabilidad.



**Figura 26. Comportamiento de los percentiles de la TIR optimizada en la cadena de valor usando lodos residuales**

### 6.7.3. Optimización de la cadena de valor usando residuos agrícolas de cosecha (RAC) de Caña.

La optimización aborda el problema en la recolección de residuos agrícolas de cosecha (RAC) de caña en tres ingenios azucareros pertenecientes al mismo grupo azucarero, donde ha surgido la idea

de trasladar estos residuos a la fábrica para ser combustiónados en calderas y así obtener energía a partir del vapor, la cual puede ser utilizada para el mismo proceso de obtención de azúcar. Estos RAC complementarían al bagazo que ya es combustionado, sustituyendo en gran parte a los combustibles fósiles como el fueloil (combustóleo). Por lo que la optimización está basada en la elección de los equipos tecnológicos para el transporte de los RAC's del campo al ingenio para aumentar la TIR (función objetivo).

Estos modelos fueron planteados con la ayuda de la simulación Monte Carlo, la cual permitió llevar a cabo las optimizaciones y análisis de sensibilidad. La mayor parte de las variables y parámetros inciertos fueron modelados con distribuciones de probabilidad a partir de datos históricos y/o muestreos tomados en cada una de las cadenas. En algunos otros casos se tomó como referencias el conocimiento de los expertos, modelados con distribuciones de probabilidad triangulares.

Las variables de entrada más importantes para este modelo son: cantidad de enfardadores, tipo de enfardador, cantidad de tractocamiones, cantidad de alzadoras, planas por tractocamión, punto de nueva inversión (w), cantidad de paquetes tecnológicos, turnos de operación, % de caña verde o quemada y los parámetros inciertos más importantes son: capacidad de hilerado diario, capacidad de enfardado, tiempo para enfardar, capacidad de alzado, capacidad de acarreo, tiempo perdido, paro por lluvia, TMCA (cosecha caña), poder calorífico del RAC, precio del kWh

Se entiende por paquete tecnológico al conjunto de equipos necesarios para disponer del RAC (tractores, hileradoras, tractocamiones, etc.). En el caso del enfardador existen diferentes tipos de ellos, por lo que en la optimización se evaluarán cada uno para determinar la mejor alternativa.

Los costos de cada uno de los equipos que conforman el paquete tecnológico se muestran en la Tabla 15. Se asumen los mismos costos para cada uno de los 3 ingenios azucareros.

**Tabla 14. Costos del paquete tecnológico y capacidades de operación de la cadena de valor con RAC**

<b>Hileradora de 8 Aros</b>	Implemento	\$50,000	Lognorm(17.219,2.0854)
<b>Enfardadora John Deere 468</b>	Implemento	\$480,000	Weibull(4.2417,1.705)
<b>Tractor John Deere 6603</b>		\$730,000	–
<b>Plana de 9 Mts X 2.5 Mts</b>		\$150,000	*
<b>Estructura Móvil para Plana</b>		\$100,000	–
<b>Alzadora</b>		\$730,000	Logistic(2.8751, 1436)

<b>Alzadora Parte B</b>	Implemento	\$400,000	–
<b>Tractocamión Kenworth 660</b>	Seminuevo	\$700,000	1 a 3 vueltas día
<b>Desfibradora</b>		\$150,000	–

\*Depende del tipo de enfardador.

### 1. Modelo matemático

Este modelos se basó en los indicadores financieros, para este caso se tomó la TIR como punto de referencia.

Función objetivo: Maximizar

#### Ecuación 11. Tasa interna de retorno de RAC

$$TIR = \sum_{k=1}^m \sum_{j=0}^n \frac{FlujoNeto_j}{(1+i)^j} = 0$$

Dónde:  $k$ = ingenio azucarero (1, 2, 3),  $j$ = año,

Para este modelo se han encontrado 9 Restricciones, las cuales se presentan a continuación:

La primer restricción se refiere a que en el año 1 debe haber obligatoriamente uno o más equipos tecnológicos en operación, y por lo tanto una inversión en el año “ $j-1 = 0$ ” (hoy).

$$1. \quad PaqueteTec_1 \geq 1$$

Al mismo tiempo que el número máximo de paquetes no deberá sobrepasar los 4.

$$2. \quad PaqueteTec_4 \leq 4$$

Uno de los puntos importantes en la recolección es el tamaño de los fardos (1, 1.25 o 1.5 metros), por lo que es esta optimización se colocan como una decisión binaria, en la cual se debe cumplir la restricción que sólo uno de ellos se podrá elegir.

$$3. \quad \sum_{b=1}^p D.Enfardado_b = 1$$

$$4. \quad D.Enfardado_b = (0,1)$$

Dónde:  $b$ = es el tipo de enfardador (tipo 1, 2 o 3).

Dado que al inicio de la simulación Monte Carlo se consideraron algunos escenarios dependiendo del número de enfardadores, también se consideró en esta optimización evaluar con diferentes cantidades de éste.

5. *Enfardador Extra*  $_j \leq 2$

Cada vez que la lluvia se haga presente se darán por perdidos los residuos que se mojen con ésta, a menos que ya hayan sido enfardados, en ese caso deberán recolectarse para no tener pérdidas de los materiales ya utilizados. Es por lo anterior que la capacidad de las alzasoras deberá ser mayor siempre que la capacidad del enfardado.

$$6. \frac{\sum_{d=1}^e \left[ \sum_{b=1}^e \text{alce}_b \right]_d}{e} \geq \frac{\sum_{d=1}^e \left[ \sum_{b=1}^e \text{Enfardado}_b \right]_d}{e}$$

$$7. \frac{\sum_{d=1}^e \left[ \sum_{b=1}^e \text{alce}_b \right]_d}{e} \leq 2 * \frac{\sum_{d=1}^e \left[ \sum_{b=1}^e \text{Enfardado}_b \right]_d}{e}$$

Dónde:  $d$ = día de zafra,  $e$ = días de zafra (total)

Se establece también una igualdad que debe cumplirse en todo momento, la cual gira entorno a la cantidad de RAC, ya sea en toneladas o hectáreas, y marca que la cantidad de RAC hilerado/alineado debe ser igual a la cantidad de RAC perdido por lluvia, perdido por falta de capacidad y por término de zafra.

$$8. \sum_{d=1}^m \text{Hilerado}_d = \sum_{d=1}^n \text{Alce}_d + \sum_{d=1}^m \text{PerdEnfardado}_d + \sum_{d=1}^m \text{PerdAlzado}_d + \sum_{d=1}^m \text{PerdAcarreo}_d + \sum_{d=1}^m \text{PerdLluvia}_d$$

No se debe confundir la pérdida en el alzado a una falta de capacidad, pues como establece la restricción 6, la capacidad de alzado siempre será mayor a la de enfardado. Esta pérdida hace referencia a lo que se pierde cuando termina la zafra y los equipos no recolectan los remanentes.

La siguiente restricción hace referencia a la variable que ayudará a tomar la decisión de adquisición de un nuevo equipo tecnológico en base al porcentaje de utilización que este tendría en base al estimado de RAC recolectable en la zafra  $j+1$ . Anteriormente esta decisión se tomó arbitrariamente con un valor de 50%, es decir, que si el equipo tuviera una utilización del 50% para la siguiente

zafra se adquiriría, de lo contrario se esperaba hasta el siguiente año y se evaluaba nuevamente. Con esta nueva variable ( $w$ ) se pretende encontrar el mejor porcentaje que disminuya el riesgo de pérdida de la inversión, por lo que esta variable tendrá un valor entre 0 y 1.

$$9. \quad 0 \leq W \leq 1$$

Estas restricciones aplican para los 3 ingenios, con un total de 27 restricciones para el modelo.

## 2. Optimización.

La optimización se realizó con Algoritmos Genéticos. El modelo corrió por un periodo de 46 horas y 9 minutos, dentro de lo cual se encontraron cerca de 100 resultados válidos. Los resultados en cuanto a las variables controlables se muestran en la Tabla 15

**Tabla 15. Resultados de la optimización para la cadena de valor con RAC**

<b>Paquete tecnológico</b>	<b>Ingenio 1</b>	<b>Ingenio 2</b>	<b>Ingenio 3</b>	<b>Tipo</b>
Paquete Tecnológico año 1	1	1	1	Entero
Enfardador extra	1	1	1	Binaria
<b>Tamaño enfardador</b>				
1.00 M	0	0	0	Binaria
1.25 M	1	1	1	Binaria
1.50 M	0	0	0	Binaria
<b>Equipo requerido</b>				
Alzadora	3	3	3	Entero
Tractocamiones	2	2	2	Entero
<b>Inversión adicional</b>				
Decisión de capacidad	0.8820	0.5071	0.6054	Decimal
<b>Turnos de operación</b>				
Turnos por día	2	2	2	Entero

Como puede observarse, los resultados son prácticamente iguales en cada uno de los ingenios, la diferencia radica en el valor de “ $w$ ”, el cual al final es el que determina la cantidad de equipos o paquetes tecnológicos a utilizar. Lo anterior se puede expresar de la siguiente manera para el caso del ingenio 1: “Adquirir un paquete tecnológico nuevo cada vez que la capacidad utilizada estimada

de éste sea de por lo menos el 88.20% (considerando 100% para los existentes), de lo contrario no hacerlo, a menos que se determine algo diferente por la directiva”. Por lo que los costos quedan como se observa en la Tabla 16.

**Tabla 16. Costos resultantes por la adquisición de 1 paquete tecnológico en la cadena de valor con RAC**

<b>Inversión en Máq. Agrícola</b>	<b>Costo</b>	<b>Requerimiento</b>	<b>Total</b>
Hileradora de 8 Aros	\$ 50,000	1	\$ 50,000
Enfardadora John Deere 468	\$ 480,000	2	\$ 960,000
Tractor John Deere 6603	\$ 730,000	2	\$ 1,460,000
Plana de 9 Mts X 2.5 Mts	\$ 150,000	4	\$ 600,000
Estructura Móvil para Plana	\$ 100,000	4	\$ 400,000
Alzadora Parte A	\$ 730,000	3	\$ 2,190,000
Alzadora Parte B	\$ 400,000	3	\$ 1,200,000
Tractocamión Kenworth 660	\$ 700,000	2	\$ 2,100,000
Desfibradora	\$ 150,000	2	\$ 300,000
<b>Total</b>			<b>\$ 8,560,000</b>

Así, el estimado de paquetes tecnológicos es el presentado en la Tabla 18. En dos de los ingenios existentes se necesitará un solo paquete tecnológico debido a la poca caña mecanizada en verde que existe en esas zonas. Cabe hacer mención que al decir que se tendrá una utilización del 100% en los equipos tecnológicos no significa que estarán utilizados las 8 horas del turno de trabajo, ya que se está considerando una probabilidad de tiempo perdido por turno de hasta 2.5 horas. También se debe a que la cantidad de RAC disponible es mayor a la que puede recolectar el paquete tecnológico, pero no lo suficiente como para adquirir otro.

**Tabla 17. Adquisición de paquetes tecnológicos y capacidades utilizadas.**

<b>Año</b>	<b>Ingenio 1</b>		<b>Ingenio 2</b>		<b>Ingenio 3</b>	
	<b>Paq. Tec.</b>	<b>Utilización</b>	<b>Paq. Tec.</b>	<b>Utilización</b>	<b>Paq. Tec.</b>	<b>Utilización</b>
2015/16	0	0	0	0.00%	0	0.00%
2016/17	1	100%	1	100.00%	1	85.58%
2017/18	1	100%	2	78.88%	1	99.85%
2018/19	1	100%	2	86.42%	1	100.00%
2019/20	1	100%	2	86.42%	1	100.00%

2020/21	1	100%	2	86.42%	1	100.00%
2021/22	1	100%	2	86.42%	1	100.00%
2022/23	1	100%	2	86.42%	1	100.00%
2023/24	1	100%	2	86.42%	1	100.00%
2024/25	1	100%	2	86.42%	1	100.00%
2025/26	1	100%	2	86.42%	1	100.00%

En el caso del Ingenio 2, la utilización difícilmente llegará al 100% debido a la gran cantidad de días perdidos por lluvia. Una utilización del 86.42% significa que en promedio todos los paquetes se utilizarán en esta cantidad y no debe confundirse con el valor de “w”.

Lo anterior es fácilmente apreciado en las gráficas siguientes, donde la línea azul representa a la cantidad de RAC disponible o recolectable dada la cosecha de caña y la línea roja es la capacidad del equipo tecnológico (ver Figura 27, Figura 28, Figura 29).

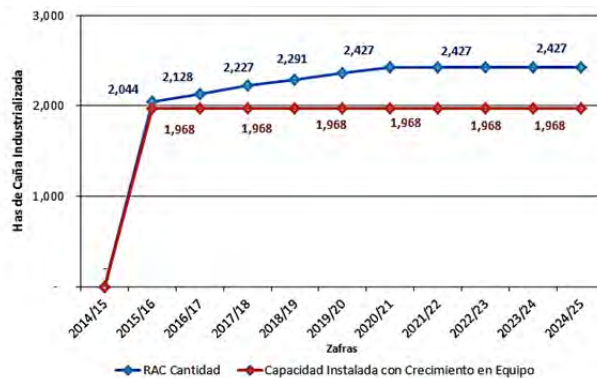


Figura 27. Comportamiento del sistema en UEN Ingenio 1.

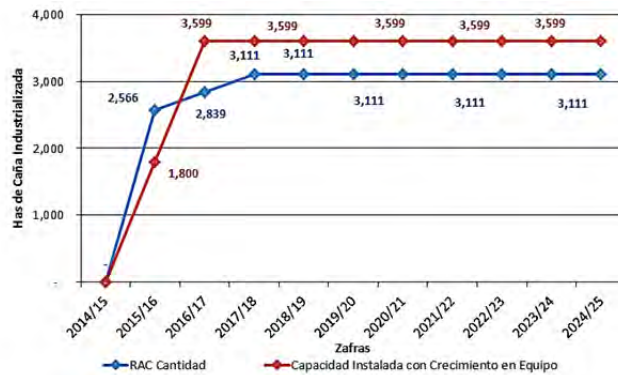


Figura 28. Comportamiento del sistema en UEN Ingenio 2.



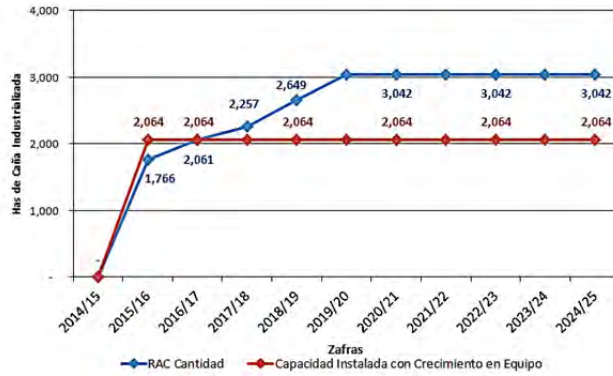


Figura 29. Comportamiento del sistema en UEN Ingenio 3.

Algo más que se debe destacar de este modelo es lo siguiente, la variable “w” ayuda a disminuir el riego en la inversión, pues a simple vista se pudiera pensar que ese valor se podría establecer a prueba y error y sin necesidad de una optimización, pero lo que se estaría dejando de lado es que los parámetros inciertos afectan el modelo de una manera que no es fácilmente perceptible. De manera que los indicadores financieros quedan como se observa en la Tabla 18.

Tabla 18. Resultados de la optimización en la cadena de valor de RAC

Indicador	Ingenio 1	Ingenio 2	Ingenio 3	Unidad
Tasa Interna de Retorno (TIR)	62.35%	24.14%	42.87%	%
Valor Presente (VA)	\$ 30,668,443	\$ 18,127,909	\$ 22,758,969	Pesos
Valor Presente Neto (VNA)	\$ 22,108,443	\$ 9,567,909	\$ 14,128,969	Pesos
Retorno de la Inversión (Payback)	2.46	4.72	3.01	Años

Existe una gran diferencia entre el Ingenio 2 y los 2 ingenios restantes debido a la alta presencia de lluvia en el primero, lo que hace de mayor riesgo la inversión considerando una de TREMA=10%.

## 6.8. Escenarios de la red de valor

Para realizar la construcción de los diferentes posibles escenarios, se emplean la red de valor propuesta. En los escenarios planteados a continuación, se manipulan variables controlables, las cuales consideran tanto el “mejor de los casos” como el “peor de los casos”. La Tabla 19 muestra las variables y sus valores a ser modificados en la creación de escenarios.

Tabla 19. Definición de escenarios para la Red de Valor

Escenario	Valor Inicial	Valor Modificado
1. Inversión inicial	\$ 2'000,000	\$ 1'500,000
2. Precio de kWh (\$/kWh)	1.38	1.15
3. Precio ceniza pollinaza	\$ 1,750	\$ 1,350
4. Poder calorífico (pollinaza – bagazo)	Medio	Alto
	Bajo	Medio
5. Autoconsumo de kWh	10 %	12 %
6. Escenario optimista	Actuales	Valores que generen + \$
7. Escenario pesimista	Actuales	Valores que generen - \$

Primeramente se obtuvieron los resultados de la Red optimizada original para tomarla como base para las comparaciones posteriores (ver Tabla 20).

Tabla 20. Resultados del escenario base de la Red de Valor

Variable	Media	Desv. estándar	2.50%	97.50%	Rango 95%
Bioenergía p/autoconsumo (MWh)	113,001	1,988	109,423	117,074	7,651
Bioenergía p/venta (MWh)	258,046	3,784	250,574	265,993	15,419
Ingresos bioenergía (\$)	356,109,311	5,637,136	345,330,856	368,385,088	23,054,232
Biosólidos (toneladas)	455,570	6,311	443,424	468,643	25,219
Ingresos por biosólidos (\$)	38,235,579	2,488,205	33,571,521	42,544,635	8,973,114
Ahorros de bioenergía (\$)	155,942,626	2,901,596	150,613,012	161,722,500	11,109,488
TIR (CV 1)	30.83%	2.66%	26.35%	37.00%	10.65%
Payback (CV 1) (Años)	2.87	0.21	2.42	3.26	0.84
TIR (CV 2)	12.63%	1.52%	10.00%	15.61%	5.62%
Payback (CV 2) (Años)	3.98	0.33	3.38	4.58	1.21
TIR (CV 3)	10.79%	0.90%	9.08%	12.39%	3.31%
Payback (CV 3) (Años)	5.24	0.22	4.87	5.67	0.80
TIR (CV 4)	7.58%	0.78%	6.05%	9.27%	3.22%
Payback (CV 4) (Años)	5.74	0.22	5.28	6.19	0.91
TIR (CV 5)	7.58%	0.78%	6.13%	8.93%	2.80%

Payback (CV 5) (Años)	6.06	0.23	5.67	6.51	0.84
-----------------------	------	------	------	------	------

### 6.8.1. Escenario 1. Inversión inicial en la red

Para el aprovechamiento energético y térmico de los residuos son necesarios paquetes integrales de soluciones, y para su instalación las empresas deben tener un buen balance de energía, ser productivos térmicamente, y principalmente que los equipos con los que cuenta actualmente sean energéticamente compatibles con los equipos a instalar, si esta condición se cumple la inversión estará alrededor de \$ 1.5 mdd por MW instalado.

Si no se cumple quiere decir que se requieren inversiones adicionales y complementarias para mejorar sus condiciones de capacidad y operación en los equipos existentes, para que sean compatibles con el nuevo sistema de cogeneración y transformación de energía.

Esta condición regularmente se debe porque las empresas que forman la red tienen atrasos tecnológicos, cuando esta condición se da, la inversión regularmente crece \$ 0.5 mdd más por MW instalado (\$2 mdd por MW instalado). Los resultados obtenidos en el escenario 1 son similares a los obtenidos en el escenario base (ver Tabla 21).

**Tabla 21. Resultados del escenario 1 en la red**

Variable	Media	Desv estándar	2.50%	97.50%	Rango 95%
Bioenergía p/autoconsumo (MWh)	112,990	1,803	109,671	116,609	6,938
Bioenergía p/venta (MWh)	258,032	3,775	251,177	265,833	14,657
Ingresos bioenergía (\$)	356,076,122	5,468,784	346,472,507	366,179,847	19,707,341
Biosólidos (toneladas)	455,545	6,617	444,496	466,357	21,861
Ingresos por biosólidos (\$)	38,237,813	2,466,203	33,793,927	42,544,395	8,750,468
Ahorros de bioenergía (\$)	155,925,060	2,606,851	151,335,614	160,836,042	9,500,428
TIR (CV 1)	30.83%	2.71%	25.70%	36.56%	10.86%
Payback (CV 1) (Años)	2.87	0.22	2.45	3.33	0.88
TIR (CV 2)	19.42%	1.50%	16.81%	22.41%	5.60%
Payback (CV 2) (Años)	2.78	0.21	2.38	3.17	0.79
TIR (CV 3)	17.26%	0.69%	15.84%	18.80%	2.96%
Payback (CV 3) (Años)	3.96	0.11	3.72	4.20	0.47

TIR (CV 4)	13.65%	0.80%	12.23%	15.33%	3.10%
Payback (CV 4) (Años)	4.32	0.15	4.01	4.60	0.58
TIR (CV 5)	13.61%	0.71%	12.01%	15.07%	3.07%
Payback (CV 5) (Años)	4.57	0.14	4.29	4.91	0.62

### 6.8.2. Escenario 2. Precio de KWh (\$/KWh) en la red

El costo de generación eléctrica en el mundo es muy diverso principalmente por los recursos naturales y el nivel tecnológico y de industrialización con el que cuenta un país, estos precios van desde los 5.2 pesos por kilowatt-hora en países escandinavos, y hasta 0.9 pesos por kilowatt-hora en países como estados Unidos, China e India.

En este escenario se considera una disminución en el precio de KWh, ya que originalmente se tiene un precio de \$1.38/kWh y se redujo en un 17.78%, debido a que \$1.15 es el valor que los expertos creen como mínimo para hacer rentable el negocio energético.

Los resultados obtenidos en el escenario 2, arrojan disminución de aproximadamente 60 millones en los ingresos por bioenergía. También se presenta una disminución en los ahorros por bioenergía por un estimado de 26 millones; el indicador financiero (TIR) para cada ingenio presenta un decremento siendo el de la pollinaza el más afectado. El periodo de recuperación aumento (ver Tabla 22).

**Tabla 22. Resultados del escenario 2 en la red**

Variable	Media	Desv estándar	2.50%	97.50%	Rango 95%
Bioenergía p/autoconsumo (MWh)	112,998	1,986	109,488	116,770	7,281
Bioenergía p/venta (MWh)	258,062	3,821	250,502	266,192	15,689
Ingresos bioenergía (\$)	296,762,651	5,195,548	285,995,264	306,582,818	20,587,554
Biosólidos (toneladas)	455,552	6,784	443,838	470,219	26,381
Ingresos por biosólidos (\$)	38,240,118	2,574,216	33,240,925	42,588,270	9,347,345
Ahorros de bioenergía (\$)	129,951,362	2,697,012	124,983,474	134,751,122	9,767,649
TIR (CV 1)	29.23%	3.00%	23.42%	35.48%	12.05%
Payback (CV 1) (Años)	3.01	0.26	2.52	3.58	1.07
TIR (CV 2)	6.51%	1.90%	2.95%	10.01%	7.07%
Payback (CV 2) (Años)	5.64	0.64	4.58	6.93	2.35

TIR (CV 3)	7.14%	0.70%	5.83%	8.75%	2.92%
Payback (CV 3) (Años)	6.23	0.21	5.75	6.65	0.89
TIR (CV 4)	3.84%	0.79%	2.43%	5.52%	3.10%
Payback (CV 4) (Años)	6.92	0.29	6.34	7.46	1.12
TIR (CV 5)	4.08%	0.69%	2.82%	5.23%	2.41%
Payback (CV 5) (Años)	7.25	0.27	6.81	7.75	0.94

### 6.8.3. Escenario 3. Precio de la ceniza de pollinaza en la red

Los procesos de generación eléctrica regularmente producen otro tipo de residuos, principalmente cuando queda un porcentaje de cenizas superior al 18%, esto se debe a que la composición de la biomasa que se utiliza para combustión contiene menor material volátil, por tener mayor cantidad de elementos minerales para ser utilizados en otras actividades agroindustriales. Un ejemplo de lo anterior es la utilización de cenizas de combustión como fertilizantes de suelos, lo cual le da un valor extra a los residuos y un ingreso adicional a las UEN's. Originalmente para el desarrollo del proyecto se considera un valor de \$1,750 en el valor de la ceniza de pollinaza; para el presente escenario se considera una disminución en el precio de la ceniza de pollinaza, teniendo como el peor de los casos que la ceniza se vendiera en \$1,350.

Los resultados obtenidos en la bioenergía total (autoconsumo y venta), ingresos por bioenergía, cantidad total de biosólidos y ahorros por bioenergía son similares a los obtenidos en el escenario base, siendo los ingresos por biosólidos menores, los indicadores financieros de la pollinaza y los ingenios arrojan resultados desfavorables a los obtenidos en el escenario base (Tabla 23).

**Tabla 23. Resultados del escenario 3 en la red**

<b>Variables</b>	<b>Media</b>	<b>Desv estándar.</b>	<b>2.50%</b>	<b>97.50%</b>	<b>Rango 95%</b>
Bioenergía p/autoconsumo (MWh)	112,996	1,768	109,710	116,349	6,639
Bioenergía p/venta (MWh)	258,043	3,384	250,918	263,441	12,523
Ingresos bioenergía (\$)	356,095,700	4,844,273	346,123,238	365,627,579	19,504,341
Biosólidos (toneladas)	455,568	6,967	443,165	471,121	27,956
Ingresos por biosólidos (\$)	30,251,220	2,002,492	26,266,417	33,687,910	7,421,493
Ahorros de bioenergía (\$)	155,934,995	2,637,435	151,565,480	160,856,920	9,291,440

TIR (CV 1)	30.85%	2.81%	26.26%	38.07%	11.82%
Payback (CV 1) (Años)	2.87	0.22	2.36	3.27	0.92
TIR (CV 2)	8.66%	1.37%	6.08%	11.06%	4.98%
Payback (CV 2) (Años)	4.96	0.39	4.32	5.74	1.42
TIR (CV 3)	10.79%	0.87%	9.08%	12.60%	3.51%
Payback (CV 3) (Años)	5.24	0.21	4.83	5.67	0.84
TIR (CV 4)	7.58%	0.74%	6.20%	9.04%	2.84%
Payback (CV 4) (Años)	5.74	0.21	5.34	6.14	0.80
TIR (CV 5)	7.58%	0.79%	6.22%	9.20%	2.98%
Payback (CV 5) (Años)	6.06	0.24	5.59	6.49	0.90

#### 6.8.4. Escenario 4. Poder calorífico en la red

Los especialistas y asesores en procesos energéticos pueden tener diferentes puntos de vista con respecto al poder calorífico que se obtiene de la combustión de los residuos aprovechables. Están aquellos especialistas que realizan los análisis de balance de energía utilizando un poder calorífico conservador para garantizar que la producción de energía a partir de la combustión de la pollinaza esté garantizada, sin embargo los retornos de inversión y la rentabilidad para el inversionista tiene un nivel medio de atracción. También existen los expertos en energía que proponen utilizar para efectos de estudio un poder calorífico más alto para no quedar cortos al momento de diseñar los equipos de cogeneración y/o transformación de energía, esta perspectiva genera un mayor nivel de atracción para el inversionista y los valores esperados de producción de energía son mayores y su rentabilidad se eleva.

Para la optimización de la red de valor original se considera que la pollinaza con 40% de humedad tenga un poder calorífico (PC) “Bajo”, el cual oscila de 1,597 a 1,789 kcal/kg; sin embargo, dado que la humedad es un parámetro incierto y no controlable directamente se propone analizar los efectos de un poder calorífico “Medio”, el cual tiene un rango de 1,790 a 1,981 kcal/kg. En el caso del bagazo se considera de inicio y para toda la simulación un PC “Medio” (1,735 kcal/kg), por lo que para este escenario se considera “Alto” (1,956 kcal/kg) (ver Tabla 24).

Tabla 24. Resultados del escenario 4 en la red

Variables	Media	Desv. estándar.	2.50%	97.50%	Rango 95%
Bioenergía p/autoconsumo (MWh)	113,678	2,090	110,077	118,129	8,052
Bioenergía p/venta (MWh)	264,224	3,895	257,934	270,543	12,609
Ingresos bioenergía (\$)	364,619,808	5,948,657	354,195,569	375,271,877	21,076,308
Biosólidos (toneladas)	455,581	6,466	444,068	469,763	25,695
Ingresos por biosólidos (\$)	38,225,115	2,404,601	33,193,270	42,412,054	9,218,784
Ahorros de bioenergía (\$)	156,871,377	3,124,886	151,816,950	163,479,550	11,662,600
TIR (CV 1)	30.86%	2.99%	25.45%	37.66%	12.21%
Payback (CV 1) (Años)	2.87	0.24	2.38	3.36	0.98
TIR (CV 2)	13.78%	1.31%	10.69%	16.11%	5.42%
Payback (CV 2) (Años)	3.74	0.27	3.29	4.41	1.12
TIR (CV 3)	8.31%	0.84%	6.70%	10.01%	3.31%
Payback (CV 3) (Años)	5.90	0.24	5.43	6.37	0.94
TIR (CV 4)	5.24%	0.81%	3.66%	6.62%	2.96%
Payback (CV 4) (Años)	6.46	0.27	6.02	7.01	0.99
TIR (CV 5)	2.27%	0.64%	0.94%	3.37%	2.43%
Payback (CV 5) (Años)	8.07	0.29	7.59	8.68	1.09

### 6.8.5. Escenario 5. Autoconsumo de kWh en la red.

Al momento de implementar sistemas de generación eléctrica es muy importante definir el requerimiento eléctrico y térmico que requieren los equipos instalados en el interior de las empresas para determinar los niveles de autoconsumo, es decir el consumo interno de energía eléctrica requerida para mover los equipos y periféricos para la generación total. Esta energía debe ser disminuida de la producción total de energía.

Actualmente se tiene un autoconsumo de kWh de un 10%, sin embargo, se debe considerar que el autoconsumo aumente, por lo cual se considera un valor de un 12% en el autoconsumo de kWh.

Con los resultados obtenidos del escenario 5, puede observarse que al aumentar el autoconsumo de kWh se presenta un aumento considerable de la cantidad de biosólidos generada, sin embargo, la

TIR para la pollinaza y los ingenios presenta una disminución, mientras que el periodo de recuperación aumenta (ver Tabla 25).

**Tabla 25. Resultados del escenario 5 en la red**

<b>Variables</b>	<b>Media</b>	<b>Desv Est</b>	<b>2.5%</b>	<b>97.5%</b>	<b>Rango 95%</b>
Bioenergía p/autoconsumo (MWh)	114,145	2,089	110,595	118,527	7,931
Bioenergía p/venta (MWh)	256,862	3,324	250,793	264,072	13,279
Ingresos bioenergía (\$)	354,461,340	4,603,078	346,513,598	363,399,405	16,885,808
Biosólidos (toneladas)	157,519,133	2,930,415	151,697,864	163,797,960	12,100,096
Ingresos por biosólidos (\$)	38,229,796	2,416,515	33,699,703	42,792,197	9,092,494
Ahorros de bioenergía (\$)	157,519,133	2,930,415	151,697,864	163,797,960	12,100,096
TIR (CV 1)	30.83%	2.80%	25.65%	37.74%	12.09%
Payback (CV 1) (Años)	2.87	0.22	2.38	3.33	0.96
TIR (CV 2)	11.91%	1.37%	8.67%	14.31%	5.64%
Payback (CV 2) (Años)	4.14	0.31	3.62	4.94	1.32
TIR (CV 3)	10.78%	0.68%	9.08%	12.24%	3.16%
Payback (CV 3) (Años)	5.24	0.17	4.90	5.67	0.77
TIR (CV 4)	7.58%	0.78%	6.35%	9.29%	2.95%
Payback (CV 4) (Años)	5.74	0.22	5.27	6.10	0.83
TIR (CV 5)	4.49%	0.74%	3.06%	6.02%	2.96%
Payback (CV 5) (Años)	7.16	0.28	6.60	7.72	1.12

### 6.8.6. Escenario 6. Valores optimistas en la red

Para el escenario optimista se consideraron en conjunto los cambios anteriores que daban como resultado un aumento en los indicadores financieros (escenarios 1 y 4). Los valores para las demás variables se dejaron como se han considerado en toda la simulación.

El escenario muestra en el mejor de los casos la situación de la red de valor final, ya que se manipulan las variables de modo que éstas generen una maximización en los ingresos obtenidos por biosólidos y bioenergía. Sin embargo, los indicadores financieros de los ingenios presentan una disminución en el valor de la TIR y un aumento en el periodo de recuperación (ver Tabla 26).



**Tabla 26. Resultados del escenario 6 en la red**

<b>Variables</b>	<b>Media</b>	<b>Desv Est</b>	<b>2.50%</b>	<b>97.50%</b>	<b>Rango 95%</b>
Bioenergía p/autoconsumo (MWh)	113,694	1,941	110,285	117,502	7,217
Bioenergía p/venta (MWh)	264,244	3,528	257,490	271,989	14,499
Ingresos bioenergía (\$)	364,655,886	4,869,549	355,928,556	375,784,088	19,855,532
Biosólidos (toneladas)	156,894,676	2,627,068	152,114,640	161,777,365	9,662,725
Ingresos por biosólidos (\$)	38,245,678	2,504,178	33,378,097	42,848,646	9,470,549
Ahorros de bioenergía (\$)	156,894,676	2,627,068	152,114,640	161,777,365	9,662,725
TIR (CV 1)	30.86%	3.21%	25.52%	36.53%	11.01%
Payback (CV 1) (Años)	2.87	0.26	2.45	3.35	0.90
TIR (CV 2)	20.73%	1.45%	18.14%	23.40%	5.26%
Payback (CV 2) (Años)	2.60	0.19	2.27	2.96	0.69
TIR (CV 3)	14.47%	0.86%	12.85%	16.07%	3.22%
Payback (CV 3) (Años)	4.45	0.16	4.16	4.77	0.61
TIR (CV 4)	11.03%	0.95%	9.39%	12.96%	3.57%
Payback (CV 4) (Años)	4.86	0.21	4.45	5.25	0.80
TIR (CV 5)	11.01%	0.86%	9.48%	12.50%	3.03%
Payback (CV 5) (Años)	5.14	0.21	4.80	5.52	0.72

### 6.8.7. Escenario 7. Valores pesimistas en la red.

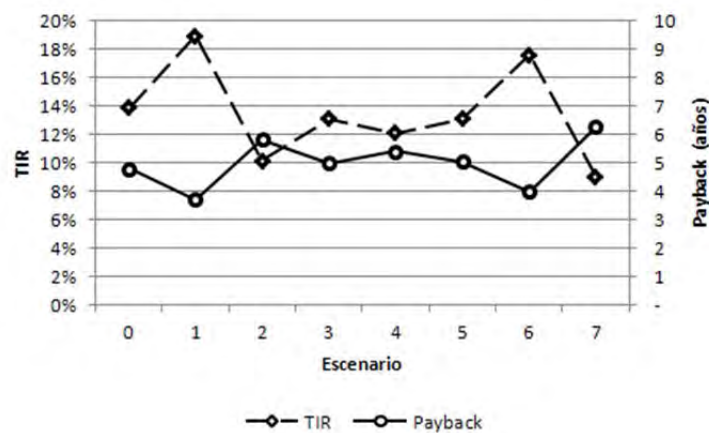
En el caso pesimista se consideraron en conjunto los cambios que dan como resultado un decremento en los indicadores financieros (escenarios 2, 3, y 5). Los demás valores se dejaron como originalmente se plantearon.

Este escenario muestra el peor de los casos que se puede presentar en la red de valor, aquí se manipularon las variables de modo que se minimicen los ingresos obtenidos por biosólidos y bioenergía, también puede observarse que los valores obtenidos en los indicadores financieros presentan un panorama poco factible en comparación con los valores obtenidos en el escenario base; sin embargo, se puede observar un aumento considerable en la cantidad de biosólidos obtenida (ver Tabla 27).

**Tabla 27. Resultados del escenario 7 en la red**

Variables	Media	Desv Est	2.50%	97.50%	Rango 95%
Bioenergía total (autoconsumo)	114,136	2,030	109,860	118,478	8,617
Bioenergía total (venta)	256,873	3,381	250,651	263,168	12,517
Ingresos bioenergía	295,404,235	4,600,907	287,467,680	304,927,445	17,459,765
Biosólidos (total)	131,254,189	2,707,885	125,854,182	136,633,083	10,778,901
Ingresos por biosólidos	30,254,398	1,988,554	26,387,220	34,157,419	7,770,199
Ahorros de bioenergía (total)	131,254,189	2,707,885	125,854,182	136,633,083	10,778,901
TIR (Lodos)	29.21%	2.67%	24.84%	34.58%	9.75%
Payback (Lodos)	3.01	0.23	2.58	3.42	0.85
TIR (Pollinaza)	0.80%	1.92%	-3.50%	3.78%	7.28%
Payback (Pollinaza)	7.99	1.03	6.59	10.50	3.92
TIR (SC)	7.14%	0.78%	5.55%	8.40%	2.85%
Payback (SC)	6.23	0.24	5.85	6.74	0.89
TIR (SP)	3.84%	0.83%	2.05%	5.79%	3.74%
Payback (SP)	6.92	0.30	6.24	7.62	1.38
TIR (HX)	4.08%	0.76%	2.61%	5.44%	2.83%
Payback (HX)	7.25	0.29	6.75	7.84	1.09

Finalmente se obtiene la TIR y el payback de la RV total, los cuales se representan en la Figura 30.



**Figura 30. Indicadores financieros de la Red de Valor total.**

Se utilizan la TIR y el payback para el análisis por su fácil comprensión y su comportamiento totalmente contrario, pues como se ve en la Figura 18 cuando el valor de la TIR aumenta el payback disminuye y viceversa.

## 6.9. Estrategias de Negocios.

### **Escenario 1. Inversión Inicial**

La estrategia es implementar secuencialmente equipos de generación y transformación de energía en aquellas unidades de negocio que sus equipos actuales estén en condiciones tecnológicas para implementar el sistema de cogeneración sin inversiones adicionales en su proceso, para minimizar la inversión inicial de sistemas de cogeneración, la TIR sea más atractiva y el periodo de recuperación más rápida.

Las unidades de negocio preparadas energéticamente puede lograr una TIR de 18.95% con una inversión baja y aquellas que no estén preparados sus procesos actuales su TIR será de 13.88% con un inversión más alta.

### **Escenario 2. Precio en kWh**

Las tendencias mundiales de generación en energía eléctrica están buscando cada vez más reducir los costos de generación utilizando diferentes tecnologías para conseguirlo. Si las empresas en red buscan consolidar este tipo de proyectos deberán asegurar la comercialización de la energía con contratos a largo plazo con precios altos si se busca elevar la rentabilidad económica de la energía eléctrica producida y comercializada a partir de residuos, para este caso la TIR para esta estrategia es de 13.88%.

Si las empresas buscan elevar su competitividad como parte de un “holding” deberán reducir los precios de venta de energía eléctrica entre la ellas, para reducir sus costos de transformación y competir con otras empresas que estén fuera de la red, la TIR para esta estrategia es de 10.16%.

### **Escenario 3. Precio de la ceniza de pollinaza**

Si se utiliza las cenizas de la combustión de la pollinaza para preparar ortofosfato la TIR de la red será de 13.88% y si se utiliza para elaborar fertilizante será de 13.09%. Es decir, la elección no afecta en gran manera el ingreso económico para las UEN's y deberá considerarse este cambio en conjunto con algunos otros para obtener conclusiones más acertadas.

#### **Escenario 4. Poder calorífico de la biomasa**

Para aquellos inversionistas que sean conservadores desearán que los niveles de producción de energía sean alcanzables dentro de los parámetros medios, y la TIR de la red será de 13.88%. Este valor está influenciado por la inversión inicial, porque al tener menos poder calorífico los equipos son de menor capacidad y menor su costo.

Para los inversionistas que no desean quedarse cortos en el diseño de sus equipos utilizarán niveles de poder calorífico más altos y en consecuencia la producción de energía eléctrica y su rentabilidad económica es mayor, con una TIR de 12.09%. La reducción en el valor de la TIR se debe porque el poder calorífico es mayor y el diseño en la capacidad de generación de los equipos es mayor aumentando su costo de inversión. Este valor puede mejorar si se logra negociar y reducir el costo de la inversión con los fabricantes de los equipos al ser de mayor capacidad.

#### **Escenario 5. Autoconsumo de energía en la red**

El autoconsumo depende en gran medida del tipo de tecnología en el sistema actual y de la tecnología del nuevo sistema y de la eficiencia en los equipos actuales producto de su desgaste de operación. Si los equipos son relativamente nuevos y con tecnología superior el autoconsumo es de un 10% de la generación térmica y eléctrica total, y la TIR de la red será de 13.88% y si los equipos tienen un menor desempeño tecnológico o su eficiencia es bajo, el autoconsumo puede llegar al 12% de la generación total y la TIR resultante de la red es de 13.12%.

#### **Escenario 6. Valores optimistas en la red**

El valor de la TIR sin cambios es de 13.88% y con los cambios propuestos mejorando las variables para generar el escenario optimista es de 17.62%. Este escenario tiene un comportamiento similar a la primera estrategia, pero menor debido a que como se mencionó ya, es necesario contemplar un horizonte más grande para poder recuperar la inversión inicial.

#### **Escenario 7. Valores pesimistas en la red**

El valor de la TIR sin cambios es de 13.88% y con los cambios no favorables en las variables para generar el escenario pesimista es de 9.01%. Esta estrategia es la peor de todas, y es el valor mínimo de rentabilidad que se tendría al formar la red. Es por lo que se debe tener mucho cuidado con estas variables (\$/kWh, precio de cenizas y autoconsumo) de modo que la rentabilidad no se vea en riesgo, debido a que la TREMA deseada en la Red es de 10%, así como para cada una de las UEN's.

## Conclusiones

En este capítulo se presenta la aplicación y validación de la red de valor integrando de manera simultánea los nodos de las cadenas de valor, se logra obtener estimaciones de los valores de intercambio de manera dinámica permitiendo identificar que variable debe ser modificada para mejorar los rendimientos energéticos y los beneficios económicos.

La utilización de simulación Montecarlo permite diseñar modelos complejos de redes de valor y mejorar la evaluación del proceso de transformación de los residuos a energía en las cadenas de valor.

Los resultados de intercambio de bioenergía y monetarios permiten realizar un análisis de sensibilidad y optimización con algoritmos genéticos para maximizar el rendimiento energético y los beneficios económicos de la red de valor al integrar las cadenas de valor de cada tipo de residuo (pollinaza, lodos residuales, RAC y bagazo)

Es importante destacar que se propone la tasa interna de retorno (TIR) para medir el desempeño económico de la red de valor. Las referencias documentadas de redes de valor carecen de este parámetro económico que mide la rentabilidad del modelo de negocio en red.

## CAPITULO 7. CONCLUSIONES

### **Problemática.**

Son muy pocas las agroindustrias que generan bioenergía a partir del uso y aprovechamiento de mermas, residuos, derivados y subproductos provenientes de sus procesos de producción, es por ello la importancia de esta investigación.

La problemática se centra en la falta de utilización y transformación energética de los residuos agroindustriales y la falta de un plan de estrategias de negocio que les permitan a las empresas generar oportunidades económicas para reducir sus costos de producción o aumentar sus ingresos por la diversificación de nuevos productos.

La rentabilidad económica de una cadena de valor depende de sus productos centrales y su posición en el mercado, este trabajo de investigación crea una visión para diversificar productos energéticos a partir de la reutilización de sus residuos como alternativa para elevar los beneficios económicos a partir de un intercambio energético en una red de valor.

### **Evolución estado del arte**

La utilización de la pollinaza en términos energéticos es muy reciente, se han realizado diversas pruebas de conversión energética de residuos utilizando digestión y combustión (*Kelleher et al. 2002*), en dichos estudios no clasifican la pollinaza por su calidad antes de utilizarla como combustible, no determinan que tecnología energética es más conveniente utilizar a partir de la calidad de la pollinaza y no se presenta el poder calorífico que libera la pollinaza con diferentes contenidos de humedad.

La aplicación de técnicas de inteligencia artificial para el aprovechamiento energético de residuos también es nuevo, existen registros sobre aplicaciones de RNA para determinar el patrón de comportamiento de la caldera durante la combustión de la pollinaza con diferentes variables y condiciones de operación (*Zhu et al. 2007*), pero sin identificar el comportamiento en la calidad de la humedad antes de que se utilice en la caldera, es decir cuando se genera la pollinaza desde la granja, para aumentar el rendimiento de vapor generado por unidad de masa combustionada y en consecuencia producir más energía eléctrica.

Trabajos referentes sobre el aprovechamiento de lodos residuales derivados de plantas procesadoras de aves a través de digestión anaeróbica puede sustituir el 3.8% de la energía que se consume en el

proceso (*Formentini, et al., 2011*), destacando los altos índices de consumo de agua para procesar los pollos de engorde (*Matsumura & Mierzwa, 2008*), estos estudios no hace referencia que el control del proceso permite reducir el consumo de agua por pollo procesado y mejoran las condiciones y características del residuo para aumentar su rendimiento energético.

Estudios de desempeño logístico de recolección de residuos agrícolas de cosecha (RAC) indican que la recolección mecanizada tiene una alta productividad y operaciones a bajo costo (*Spinelli, & Picchi, 2010*), pero carecen de una evaluación integral que determine su transformación energética y su potencial económico.

Las empresas agroindustriales deben estar orientadas a una nueva lógica de negocios que les permitan crear nuevas formas de valor (*Normann & Ramirez, 1993*), pero no existen metodologías de cadenas de valor claramente estructuradas para el aprovechamiento y utilización sustentable y energética de los residuos agroindustriales proveniente de diversas cadenas de valor (Pollinaza, Lodos Residuales, RAC y Bagazo).

Para elevar la competitividad de las cadenas de valor diverso estudios indican que las empresas deben asociarse y colaborar entre si a través de una red de valor, para mejorar los resultados tangibles de sus procesos, productos y servicios permitiendo elevar su nivel de eficiencia, competitividad e innovación (*Büchel & Raub, 2002*), sin embargo las metodologías propuestas de red de valor para lograrlo son limitadas y muy teóricas (*Peppard & Rylander, 2006*).

### **Aportación**

Al hacer uso de herramientas de inteligencia artificial (RNA y LD) se logra identificar el patrón de comportamiento del contenido de humedad en la pollinaza y el conjunto de prácticas agrícolas que permiten mejorar la calidad de la pollinaza para ser utilizada con fines energéticos.

Se logra determinar el rendimiento energético de los residuos agroindustriales en términos de poder calorífico liberado por unidad de masa, utilizando combustión para la pollinaza, RAC y Bagazo a distintos niveles de humedad, y utilizando digestión anaeróbica para los lodos residuales con alto contenido orgánico.

La aportación de este trabajo establece una metodología de evaluación de 7 etapas en las cadenas de valor, para mejorar la calidad de los residuos agroindustriales a partir del control del proceso para su aprovechamiento con fines energéticos.

El presente trabajo propone el desarrollo de una red de valor con base a intercambios de bioenergía procedente de las cadenas de valor que aprovechan los residuos agroindustriales a partir del establecimiento de una metodología de evaluación de 7 etapas, más robusta que la presentada por Peppard & Rylander (2006) en el Análisis de Red de Valor (ARV).

La red de valor propuesta permite crear estrategias para elevar la competitividad de las entidades y aumentar los ingresos económicos por la utilización y transformación de sus residuos en energía eléctrica útil para sus procesos de transformación y producción.

La red de valor también permite reducir los costos de producción de las empresas que forman la red y garantiza la permanencia de las empresas socias en el mercado en el que participan, permitiendo crear e innovar nuevos tipos de valor al evolucionar el concepto de negocio en una red de valor.

Es la primera red de valor documentada en el estado del arte que se desarrolla para gestionar bioenergía y biosólidos proveniente del aprovechamiento de residuos agroindustriales entre cadenas de valor, permitiendo desarrollar estrategias y modelos de negocios a partir de tecnologías energéticas innovadoras.

Esta investigación permite evaluar y optimizar a través de algoritmos genéticos una red de valor para medir la magnitud de generación de biomasa (lodos residuales, pollinaza y RAC), la magnitud de la energía a producir, y los intercambios entre las unidades productoras y consumidoras (UEN's) para demostrar la factibilidad y rentabilidad económica del uso de residuos.

Las aportaciones presentadas se validan a través de un caso de estudio en un grupo corporativo, los resultados logrados con la aplicación de la red de valor se miden en términos de la tasa interna de retorno (TIR) para determinar la factibilidad económica de la red de valor.

La red de valor tienen una tasa interna de retorno (TIR) ponderada 13.88%, un valor mínimo esperado es de 9.01% y un valor máximo esperado de 18.95%, con estos resultados podemos concluir que la red de valor es rentable por sí sola (TREMA=10%) con un mínimo riesgo, sin incluir los beneficios de los productos intrínsecos de la cadena de valor que se pueden lograr adicionalmente.

En resumen, las aportaciones de este trabajo de investigación al conocimiento son:

- Una metodología de evaluación bioenergética de cadena de valor de 7 etapas para el aprovechamiento de residuos agroindustriales.



La primera etapa permite analizar el sistema de producción de las cadenas de valor, la segunda etapa permite mejorar la calidad de la biomasa (residuo) para aumentar el potencial de generación de bioenergía, la tercera etapa permite estimar el volumen de producción de biomasa con distintos niveles de humedad (pollinaza, RAC y Bagazo) y contenido orgánico (Lodos residuales), la cuarta etapa permite estimar el rendimiento energético por unidad de masa – hora, la quinta etapa determina la producción de bioenergía y biosólidos anualmente, en la sexta etapa se realiza un análisis de riesgo y una proyección económica relacionados a la producción y comercialización de bioenergía y biosólidos, y finalmente en la séptima etapa se determina el impacto ambiental en relación a la reducción de gases efecto invernadero derivado de la producción de bioenergía.

- Una metodología de evaluación de red de valor de 7 etapas para optimizar el intercambio de bioenergía y biosólidos entre cadenas de valor para desarrollar estrategias de negocios.

La primera etapa de la metodología de la red de valor permite definir el objetivo de la red, en la segunda etapa se identifican los participantes de la red, en la tercera etapa se dimensiona el valor que aportan los socios de la red, en la cuarta etapa se definen los vínculos de valor (biomasa y bioenergía), en la quinta etapa se realiza el análisis y modelado de la red de valor integrando las cadenas de valor simultáneamente, en sexta etapa se realiza la optimización y sensibilidad de la red, y por último en la séptima etapa se evalúan diferentes escenarios y se desarrollan estrategias de negocios.

- Las metodologías de Cadena de Valor y el Análisis de Red de valor (ARV) utilizan herramientas sofisticadas de evaluación que incluyen, redes neuronales artificiales (RNA), lógica difusa (LD), algoritmos genéticos (AG), evaluación de incertidumbre y riesgo, simulación Montecarlo de tipo probabilístico en los procesos de transformación y de producción de bioenergía, y evaluaciones financieras y económicas para determinar la rentabilidad del negocio.
- Validación de las metodologías de cadena de valor y red de valor a través de un caso de estudio de manera real utilizando análisis sofisticados para estimar los intercambios de valor, dejando de lado a las redes de valor existentes que carecen de aplicaciones reales y que utilizan evaluaciones limitadas y muy teóricas.
- Aporta una nueva práctica sustentable en México para ser replicada por otras industrias interesadas, demostrando que el uso y aprovechamiento de los residuos agroindustriales son viables para producir energía renovable, con la tecnología energética correcta, con una alta rentabilidad económica.

Este trabajo de investigación es relevante en lo que se refiere a la aportación del conocimiento en el área de los negocios y la energía, pero también trasciende en lo que se refiere a la investigación aplicada, se logra 1) consolidar las cadenas de valor existentes de las dos divisiones de negocios, la avícola y la canero – azucarera, y con el desarrollo de la red de valor 2) se crea una tercera división de negocios dentro del mismo grupo corporativo llamada división de energía.

## PRODUCTIVIDAD

Los productos derivados del presente trabajo de investigación son resultado del conocimiento alcanzado durante el periodo del desarrollo e investigación de la evaluación de las cadenas de valor en estudio y de la red de valor propuesta con base a la gestión de bioenergía para determinar estrategias de negocios.

A continuación se presentan los productos académicos alcanzados:

- Presentación en el Doctoral Consortium del Congreso “The 12th Mexican International Conference on Artificial Intelligence” en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, con el trabajo “Development of a network value based on bioenergy management to determine business strategies”. México D.F. del 24 al 30 de Noviembre del 2013.
- Artículo “Predicción del contenido de humedad en la pollinaza para estimar la producción de bioenergía a través de una Red Neuronal Artificial” publicado en la Revista Mexicana de Ingeniería Química (RMIQ), Volumen 13 no. 3 (2014) Pp. 933-955 de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C. (AMIDIQ). ISSN electrónico: 2395 – 8472. Factor de Impacto 0.95 (JCR).

Artículos por enviar:

- Artículo “Bioenergy production from the combustion of poultry litter and prediction moisture content with fuzzy logic, through a methodology of 7 stages”, que será enviado al journal “Waste Management” ISSN: 0956-053X con Factor de Impacto: 2.372.
- Artículo “Developing a value network for managing the generation of bioenergy from agro-industrial waste”, que será enviado al journal “Energy Conversion and Management”. ISSN: 0196-8904, Factor de Impacto: 2.508 (JCR).
- Artículo “Process control of a slaughterhouse poultry to improve the quality of sewage sludge for obtaining bioenergy and biosolids”, que será enviado al journal “Waste Management &

Research”, Print ISSN: 0734-242X; Online ISSN: 1096-3669. 2013. Factor de Impacto : 1.114 (JCR).

A continuación se presentan las actividades realizadas durante la investigación Doctoral:

- Estancia técnica doctoral en diferentes periodos en diversas empresas del Grupo Corporativo Porres.

La primera estancia en Grupo Azucarero San Pedro S.A. de C.V del 15 de Diciembre de 2011 al 15 de Febrero de 2012 para realizar estudios de validación del comportamiento energético del bagazo y conocer los procesos energéticos de producción de vapor y energía eléctrica en los procesos azucareros.

La segunda en Ingenio de Huixtla S.A. de C.V. del 02 al 16 de abril de 2012, para realizar estudios de evaluación de cogeneración eléctrica utilizando bagazo.

La tercera estancia en Grupo Pecuario San Antonio SA de CV del 11 Junio del 2012 al 20 de Agosto del 2012 para realizar estudios y análisis relacionados con la implementación de la tecnología de Digestión anaeróbica termofílica con dualidad de operación para utilizar lodos residuales y evaluar el comportamiento del proceso de producción en el interior de la planta procesadora de aves.

La cuarta estancia se realizó en Excelencia Cañera S.P.R. de R.L. de C.V. del 07 al 25 de enero del 2013 para realizar estudios de logística y recolección de residuo agrícola de cosecha (RAC) de caña de azúcar y evaluar modelos de productividad y rendimiento de RAC. La quinta estancia en Grupo Pecuario San Antonio S.A. de C.V. del 17 de Junio al 12 de Agosto del 2013 para realizar estudios orientados a mejorar la calidad de la pollinaza en las granjas de pollo de engorde con herramientas de inteligencia artificial.

La sexta estancia en Grupo Pecuario San Antonio S.A. de C.V. del 07 Enero al 19 de Febrero del 2014 para realizar análisis y estudios relacionados con la combustión de pollinaza para generación de vapor y electricidad.

La séptima estancia en Grupo Porres del 16 de Junio al 18 de Agosto del 2014 en las oficinas corporativas para validar el desempeño de los modelos de simulación Montecarlo de la cadena de valor avícola y cañero – azucarera para integrarlas en una red de valor.

Es importante señalar que durante los periodos de análisis se tuvieron reuniones de una a dos veces por semana para entregar avances de las evaluaciones realizadas y validar información recolectada para el desarrollo de este trabajo de investigación, con los expertos del sistema de producción en las instalaciones del Grupo Corporativo.

- Visitas técnicas en la India en las ciudades de Mumbai, New Delhi, Bangalore, Hyderabad y Pune del 24 de Mayo al 06 de Junio del 2014. Visitas de investigación técnica a talleres de fabricación de calderas y turbogeneradores, reuniones de trabajo con fabricantes y diseñadores de plantas energía y combustión de biomasa, y reuniones de trabajo en centros de ingeniería y desarrollo tecnológico de aprovechamiento de biomasa, para validar la siguiente información obtenida del análisis de las cadenas de valor en estudio durante el desarrollo de la tesis: 1) la información y especificaciones técnicas de operación de los equipos de generación de vapor y energía eléctrica, y 2) los modelos de transformación de energía y optimización de combustión de paja, RAC y Bagazo. Es importante mencionar que el Grupo Corporativo Porres financio las visitas técnicas a las siguientes empresas: Praj-Matrix R&D Centre (innovation center), ISGEC Heavy Engineering Ltd, GE-Triveni turbines limited R&D center, J P Mukherji & Associates Private Limited, Suguna Foods Limited, Redan Infrastructure Private Limited (RIPL), Shravana Power Projects Pvt Ltd SPPPL y Ultra Power Projects Pvt Ltd.
- Proyecto aprobado CONACYT No. 182647 “Implementación de la tecnología de digestión anaerobia – térmica con dualidad de operación de residuos avícolas para la generación innovadora de bioenergéticos y biosólidos a escala industrial” en la convocatoria estímulos para la innovación 2012 implementado en Grupo Pecuario San Antonio S.A. de C.V.
- Proyecto aprobado CONACYT No. 180056 “Eficiencia energética y reutilización del agua para mitigar la contaminación ambiental aplicando tecnología térmica” en la convocatoria estímulos para la innovación 2012 implementado en Grupo Azucarero San Pedro S.A. de C.V.
- Propuesta CONACYT No. 180053 “Generación óptima de energía térmica y reducción de gases efecto invernadero, a partir del uso eficiente de combustibles renovables (biomasa)” en la convocatoria estímulos para la innovación 2012 implementado en Ingenio de Huixtla S.A. de C.V.
- Tercer Lugar en el Premio ADIAT 2012 (Asociación Mexicana de Directivos de la Investigación Aplicada y el Desarrollo Tecnológico) en la categoría empresa grande por la implementación del proyecto “Cogeneración de energía eléctrica a partir de biomasa” desarrollado en el Ingenio de Huixtla S.A. de C.V.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abelha, P., Gulyurtlu, I., Boavida, D., Seabra Barros, J., Cabrita, I., Leahy, J., Kelleher, B., Leahy, M., Henihan, A.M. (2003). Corrigendum to “Combustion of poultry litter in a fluidised bed combustor” *Fuel* 82 (2003) 687–692 and *Fuel* (2004), 83, 17–18, 2439
- Abdullah, Md. Pauzi., Waseem, Sadia., Bai V, Raman., Ijaz-ul-Mohsin (2008). Development of New Water Quality Model Using Fuzzy Logic System for Malaysia. *Open Environmental Sciences*, 2008 (2), 101-106
- Aguayo, P. 2011. La teoría de la abducción de Pierce: Lógica, metodología e instinto. *Ideas y Valores*, 60 (145), pp. 33-53
- Allee, V. (2000). Reconfiguring the value network. *Journal of Business strategy*, 21(4), 36-39.
- Allee, V., (2002). A Value Network Approach for Modeling and Measuring Intangibles. *Transparent Enterprise*. 1. pp.1-23
- Allee, V. (2003). *The future of knowledge: Increasing prosperity through value networks*. Routledge.
- Allee, V., (2008). Value network analysis and value conversion of tangible and intangible assets. *Journal of Intellectual Capital*, 9(1), pp. 5-24.
- Alvarado-García, A. (2013). Evaluación de alternativas para el aprovechamiento benéfico de los residuos sólidos agroindustriales pollinaza y residuos agrícolas de cosecha de caña (RAC). Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Orizaba, México.
- Angelidaki, I., Ellegaard, L., & Ahring, B. K. (2003). Applications of the anaerobic digestion process. In *Biomethanation II* (pp. 1-33). Springer Berlin Heidelberg.
- Ahring, B. K., Sandberg, M. and Angelidaki, I. 1995. Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digesters. *Applied Microbiological Biotechnology*. 43(3):559-565.
- Bagi, Z., Acs, N., Bálint, B., Horváth, L., Dobó, K., Perei, K. R., Rákhely, G. and Kovács, K. 2007. Biotechnological intensification of biogas production. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 76:473–482.

- Batayneh, Wafa., Al-Araidah, Omar., Bataineh, Khaled. (2010). Fuzzy logic approach to provide safe and comfortable indoor environment. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2 (7), pp. 65-72
- Büchel, B., & Raub, S. (2002). Building knowledge-creating value networks. *European Management Journal*, 20(6), 587-596.
- Cabirol, N., Rojas, O. M. and Noyola, A. 2002b. Fecal removal of helminth eggs and coliforms by anaerobic thermophilic sludge digestion. *Water Science and Technology*. 45(10): 264–274.
- Caldera, Y., Gutiérrez, E., Luengo, M., Chávez, J., & Ruesga, L. (2010). Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales de industria avícola. *Revista Científica*, 20(4), 409-416.
- Camarinha-Matos, L. M., & Afsarmanesh, H. (2005). Collaborative networks: a new scientific discipline. *Journal of intelligent manufacturing*, 16(4-5), 439-452.
- Carneiro, L.M., Cunha, P., Ferreira, P.S., Shamsuzzoha A. (2013) Conceptual Framework for Non-hierarchical Business Networks for Complex Products Design and Manufacturing. Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013. *Procedia CIRP*. Volume 7, 2013, Pages 61–66.
- Carr, L.E. (2002) “Personal Communication”, Instructor and extension specialist, Biological Resources Engineering, University of Maryland, USA.
- Casadesus-Masanell, R., & Ricart, J. E. (2010). From strategy to business models and onto tactics. *Long range planning*, 43(2), 195-215.
- Chang, P. L., & Chen, Y. C. (1994). A fuzzy multi-criteria decision making method for technology transfer strategy selection in biotechnology. *Fuzzy Sets and Systems*, 63(2), 131-139.
- Chase, R. B., Aquilano, N. J., & Jacobs, F. R. (2001). *Administración de producción y operaciones: manufactura y servicios*. McGraw-Hill Interamericana.
- Chegini G.R., Khazaei J., Ghobadian B., Goudarzi A.M. (2008). Prediction of process and product parameters in an orange juice spray dryer using artificial neural networks. *Iran Journal of Food Engineering* 84(4), 534–543.

- Chen, S. H., Jakeman, A. J. Norton, J. P. (2008). Artificial Intelligence techniques: An introduction to their use for modelling environmental systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, 78, (2–3), 379–400.
- Chynoweth, D.P. and Pullammanappallil, P. 1996. *Microbiology of solid waste*. A. C. Palmisano and M. A. Barlaz editors, Florida, U.S.A.
- Christensen, C. M. (2003). *The innovator's dilemma: the revolutionary book that will change the way you do business* (p. 320). New York, NY: HarperBusiness Essentials. (Collins Business Essentials)
- Christensen, C. M., & Raynor, M. E. (2003). *The innovator's solution*. Harvard Business Press.
- Cid-Chama, G. 2012. Optimización de la cantidad de bioenergía a través del control de variables de pollinaza (biomasa), de una empresa avícola aplicando técnicas de inteligencia artificial. Instituto Tecnológico de Orizaba, Div. Posgrado. Tesis de Grado.
- Collet, S. R. (2012) Nutrition and Wet litter problems in poultry. *Animal Feed Science and technology* 173, 65-7.
- Collins, E. (2009). Poultry Litter Management and Carcass Disposal. Fact Sheet No. 10 was developed, Biological Systems Engineering Department, Virginia Tech. Worksheet No. 10 was modified by Eldridge Collins, based on material from the Arkansas Farm\*A\*Syst package.
- Das, Tarun Kumar., Das, Yudhajit. (2013). Design of A Room Temperature And Humidity Controller Using Fuzzy Logic. *American Journal of Engineering Research (AJER)*. 2 (11), pp-86-97
- Dávalos, J.Z., Roux, M.V., Jiménez, P. (2002). Evaluation of poultry litter as a feasible fuel, *Thermochimica Acta*, 394 (1-2), 261-266. Institute of Physical Chemistry "Rocasolano". Madrid, Spain.
- Díaz-González, L., Hidalgo-Dávila, C.A., Santoyo, E., y Hermosillo-Valadez, J. (2013). Evaluación de técnicas de entrenamiento de redes neuronales para estudios geotermométricos de sistemas geotérmicos. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 12 (1), 105-120.
- Droste, R. L., Kennedy, K. J., Lu, J., & Lentz, M. (1998). Removal of chlorinated phenols in upflow anaerobic sludge blanket reactors. *Water science and technology*, 38(8), 359-367.

- Dumitraşcu, V., Dumitraşcu, R. A., & Turdean, M. S. (2014). Modern Approaches of the Business Networks. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 109, 125-129.
- Dumitraşcu, V., Dumitraşcu, R. A., & Turdean, M. S. (2014). Evaluation of Business Networks: A New Methodological Perspective. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 109, 120-124.
- E.P.R. (2012). *Proyectos Bioenergéticos Desarrollados*. Energy Power Resources.
- Faraoni, Valerio. (2006). *Exercises in environmental physics*. Springer. Book
- FAO, (2008). *Oferta y demanda de energía: tendencias y perspectivas. Bosques y energía: cuestiones clave*. Estudio FAO Montes, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), (154). Roma (Italia).
- Ferreira, Leandro., Yanagi, Tadayuki., Lacerda, Wilian Soares., Rabelo, Giovanni Francisco. (2012). A fuzzy system for cloacal temperature prediction of broiler chickens. *Ciência Rural, Santa María*, v.42, n.1, p.166-171
- Fjeldstad, Ø., & Becerra, M. (1999). Expansión del modelo de la cadena de valor: estudio de la conducta competitiva en el sector europeo de telefonía móvil. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la empresa*, 5(1), 61-78.
- FIRA (2010). *Producción Sostenible de la caña de azúcar*. Fideicomisos instituidos en relación con la agricultura. Boletín informativo. Nueva Época. No. 11, 1-66
- Formentini, D. F., Fracaro, G. P., Costanzi, R. N., Nelson Samuel Souza, M., & Marques, C. A. (2011). Electricity generation from biogas of poultry slaughterhouse biomass in Matelandia–Brazil. In *World Renewable Energy Congress, Linköping Sweden*.
- Galvis D. E. (2010). Los sistemas de corte mecanizado de caña de azúcar. Equipos de Cosecha. *Revista Tecnicaña*. No. 26. Diciembre 2010.
- Garson, G. D. (1991). Interpreting neural-network connection weights. *AI expert*, 6(4), 46-51.
- Gestal, M. (2009). *Introducción a las Redes Neuronales*. Universidad de Coruña. *Redes Neuronales*.
- G.E.I. (2013). *Factor de emisión eléctrico 2013 para México*. Programa Gases Efecto Invernadero (GEI), México. Comisión de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo sustentable (CESPEDES), en coordinación con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).



- Ghaffari, A., Abdollahi, H., Khoshayand, M. R., Bozchalooi, I. S., Dadgar, A., & Rafiee-Tehrani, M. (2006). Performance comparison of neural network training algorithms in modeling of bimodal drug delivery. *International journal of pharmaceutics*, 327(1), 126-138.
- Girovich, M. J. 1996. *Biosolids Treatment and Management*. Ed Marcel Decker, Inc . N. Y., E.U.A.
- Goldberg, D. E., & Holland, J. H. (1988). Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, 3(2), 95-99.
- González-Duque, M. E., Arroyave-Rojas, J. A., Mejía-Trujillo, J., Arias-Gómez, S. D. P., Osorio-Bermúdez, J. M., y Restrepo-Martínez, G. D. J. (2010). Degradación del colorante Rojo Punzó por medio de lodos anaerobios. *NOVA–Publicación Científica en Ciencias Biomédicas*, 8(14), 229-236
- Grimes, J.L., Carter T.A., Godwin J.L. (2006). Use of a litter material made from cotton waste, gypsum, and old newsprint for rearing broiler chickens. *Poultry Science* 85 (3), 563–568.
- Håkansson, H., & Snehota, I. (2006). No business is an island: The network concept of business strategy. *Scandinavian Journal of Management*, 22(3), 256-270.
- Hill, D. T., & Holmberg, R. D. (1988). Long chain volatile fatty acid relationships in anaerobic digestion of swine waste. *Biological wastes*, 23(3), 195-214.
- Hobson, P. N. 1990. The treatment of agricultural wastes, in anaerobic digestion: a waste treatment technology. Editado por Wheatley, A. *Critical reports on applied chemistry*. Elsevier applied science LTD., 31:93-138.
- Hugot E., (1986). *Handbook of cane sugar engineering*. 3rd ed. Elsevier (translated by G. H. Jenkins)
- Hussein, S. D. A., & Sawan, O. M. (2010). The utilization of agricultural waste as one of the environmental issues in Egypt (a case study). *Journal of Applied Sciences Research*, 6(8), 1116-1124.
- IPCC, (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). vol 2. chap. 2 Stationary Combustion, table 2.2. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)

- Iza, J. (1995). Control del proceso anaerobio. I curs d'enginyeria ambiental. Universitat de Lleida. Lleida.
- Jarimo, T. (2008). Innovation incentives and the design of value networks. Teknillinen korkeakoulu. Systems Analysis Laboratory Research Reports. Helsinki University of Technology.
- Jiang, Q., & Chen, C. H. (2005). A multi-dimensional fuzzy decision support strategy. *Decision support systems*, 38(4), 591-598.
- Jih-Gaw, L., Cheng-Nan, Ch. and Shou-Chung, Ch. (1997). Enhancement of anaerobic digestion of waste activate sludge by alkaline solubilisation. *Bioresource Technology.*, 62:85-90.
- Josephson, John R. 1998. Abduction-prediction model of scientific inference reflected in a prototype system for model based-diagnosis. *Philosophica*. 61 (1), pp. 9-17
- Karaj, Sh., Rehl, T., Leis, H., Müller, J. (2010). Analysis of biomass residues potential for electrical energy generation in Albania. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (1), 493–499
- Karanovic, G., Gjosevska B. (2012). Application of fuzzy logic in determining cost of capital for the capital budgeting process. *Emergeting markets queries in finance and business. Procedia Economics and Finance*. 3, 78-83.
- Kelleher, B.P., Leahya, J.J., Henihana, A.M, O'Dwyera, T.F., Suttonb, D., Leahyc, M.J. (2002). Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresource Technology* 83, 27–36.
- Koh, L. P., & Ghazoul, J. (2008). Biofuels, biodiversity, and people: understanding the conflicts and finding opportunities. *Biological conservation*, 141(10), 2450-2460.
- Kothandaraman, P., & Wilson, D. T. (2001). The future of competition: value-creating networks. *Industrial marketing management*, 30(4), 379-389.
- Koza, J. R. (1992). *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection* (Vol. 1). MIT press.
- La Rovere, E. L., Pereira, A. S., & Simões, A. F. (2011). Biofuels and sustainable energy development in Brazil. *World Development*, 39(6), 1026-1036.

- Lakhankar, T., Ghedira, H., & Khanbilvardi, R. Neural network and fuzzy logic for an improved soil moisture estimation. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) 2006 Annual Conference Reno, Nevada, May 1-5, 2006
- Law, A. M., & McComas, M. G. (1991, December). Secrets of successful simulation studies. In Proceedings of the 23rd conference on Winter simulation (pp. 21-27). IEEE Computer Society.
- Law, A. M., Kelton, W. D., & Kelton, W. D. (1991). Simulation modeling and analysis (Vol. 2). New York: McGraw-Hill.
- Leal-Hernández, M. C. Evaluación de la calidad de los lodos residuales fisicoquímicos, producidos durante el procesamiento de aves para su uso como generadores de Bioenergéticos. Instituto Tecnológico de Orizaba. Tesis.
- Lee, P. G. (2000). Process control and artificial intelligence software for aquaculture. *Aquacultural Engineering* 23, 13–36.
- López-Andrés, J. J. 2012. Optimización de la calidad y cantidad de lodo residual obtenido en una planta procesadora de aves a partir del control y simulación del proceso. Instituto Tecnológico de Orizaba. Tesis.
- Luna, H. R. G. y Guyot, P. J. (1990). Arranque de un reactor anaerobio con lodos adaptados como inóculo y un influente industrial de la industria agroalimenticia (ingenio azucarero). Reporte técnico realizado en el laboratorio de microbiología ambiental Depto. Biotecnología, UAM-I.
- Marchaim, U. 1992. Biogas processes for sustainable development. *Agricultural Services Bulletin* (FAO), no. 95, Rome, Italy
- Martin, J.H., Lefcort, M.D. (2002). An analysis of the feasibility of using broiler litter as a fuel. *Fuel and Energy Abstracts*. 43(4), 271
- Matsumura, E. M., & Mierzwa, J. C. (2008). Water conservation and reuse in poultry processing plant—A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(6), 835-842.
- McKendry, P. (2002-1). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology* 83(1), 37–46

- McKendry, P. (2002-2). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies”. *Bioresource Technology*, 83(1), 47–54.
- Méndez, J.M., Corte, J., Narvaez, I. E., Alvarado–Lassman, A. (2007). Improvement of sludge mesophilic anaerobic digestion via thermic inactivation of indicator and pathogen bacteria. *Proceedings of the 4th IWA Leading–Edge Conference and exhibition on water and wastewater technologies*. pp 1–8. Singapore.
- Méndez-Contreras, J. M., González, C., Alvarado-Lassman, A., Alvarado-Kinnell, G., & Martínez-Delgado, S. (2008). Supervivencia de bacterias fecales en lodos residuales deshidratados tratados con amoníaco fecal bacteria survival in ammonia-treated wastewater dewatered sludges. *Revista mexicana de ingeniería química*, 7(3), 229-235.
- Méndez–Contreras, J. M., Rendón–Sagardi, J. A., Ruiz–Espinoza, J. E., Alvarado–Lassman, A. y Martínez–Delgado, S. A. (2009). Behavior of the mesophilic and thermophilic anaerobic digestion in the stabilization of municipal wastewater sludge (part 1). *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 8 (3),283–290.
- Méndez-Contreras, J. M., Rico-Contreras J. O., Ruiz-Espinoza J. E., Atenodoro-Alonso J., López-Escobar L. A., Morales-Ramírez J. J. y Nieto-Martínez A. (2012). Implementación de la tecnología “digestión anaerobia-térmica con dualidad de operación” de residuos avícolas para la generación innovadora de bioenergéticos y biosólidos a escala industrial. Innovatec No. 182647. Programa Estímulos a la Innovación 2012. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). Grupo Pecuario San Antonio S.A. de C.V.
- Metcalf & Eddy, Inc. 1985. *Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*. Ed. Labor S.A. Barcelona.
- Mollazade, K., Ahmadi, H., Khorshidi, J., Rajabipour, A., & Mohtasebi, S. S. (2009). Moisture-dependent physical and mechanical properties of cumin (*Cuminum cyminum* L.) seed. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2(2), 49-56.
- Möller, K., & Rajala, A. (2007). Rise of strategic nets—New modes of value creation. *Industrial marketing management*, 36(7), 895-908.
- Moreira, J. R., & Goldemberg, J. (1999). The alcohol program. *Energy policy*, 27(4), 229-245.

- Neamtu, A. C., & Neamtu, L. (2014). Strategic Approaches for the Business Networks. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 109, 35-39.
- Normann, R., & Ramirez, R. (1993). Designing interactive strategy. *Harvard business review*, 71(4), 65-77.
- Noyola, A., and Tinajero, A. 2005. Effect of biological additives and micronutrients on the anaerobic digestion of physicochemical sludge. *Water Science and Technology*. 52(1-2):275–281.
- Oksanen, P., Hallikas, J., & Sissonen, H. (2010). The evolution of value networks. *International Journal of Networking and Virtual Organisations*, 7(4), 381-398.
- Osuna, R. V., & Tuokko, R. (2006, June). Modelling and simulation as a tool for decision making in adaptive value networks. In *International Conference of Concurrent Enterprising ICE*.
- Peltoniemi, M., 2004. Paper Presented at “Organizations, Innovation and Complexity: New Perspectives on the Knowledge Economy” conference, September 9-10(in Manchester, UK.), pp. 1-9.
- Peppard, J., & Rylander, A. (2006). From value chain to value network:: Insights for mobile operators. *European Management Journal*, 24(2), 128-141.
- Pil, F. K., & Holweg, M. (2006). Evolving from value chain to value grid. *MIT Sloan management review*, 47(4), 72-+.
- Porter, M. E., (1985). *Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance*. New York: The Free Press.
- Porter, Michael E. (1996). *What is Strategy?*. *Harvard Business Review*. 74 (6):61-78
- Porter, M. E. (1987). *From competitive advantage to corporate strategy (Vol. 59)*. Cambridge, MA: Harvard Business Review.
- Quiroga, G., Castrillón, L., Fernandez-Nava, y., Marañón, E. (2010). Physyco-chemical analysis and calorific values of poultry manure. *Waste Management* 30, 880-884.
- Rico-Contreras, J.O., Aguilar-Lasserre, A.A., Méndez-Contreras, J.M., Cid-Chama, G., Alor-Hernández, G. (2014). Moisture content prediction in poultry litter to estimate bioenergy

- production using an artificial neural network. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 14 (3), 000-000.
- Romero García, L. I., De la Rubia Romero, M. A., Pérez García, M., Sales Márquez, D. 2002. Digestión anaerobia termofílica de lodos de EDAR. *Revista técnica de Medio ambiente RETEMA*, 90, 8-22.
- Ross, T. (2009). *Manual de manejo de pollo de engorde Ross*. Publicación de Aviagen Incorporated, Estados Unidos.
- Ruiz-Espinoza, J. E., Méndez-Contreras, J. M., Alvarado-Lassman, A., & Martínez-Delgadillo, S. A. (2012). Effect of low temperature thermal pre-treatment on the solubilization of organic matter, pathogen inactivation and mesophilic anaerobic digestion of poultry sludge. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47(12), 1795-1802.
- Sablani, S. S., Rahman, M. S. (2003). Using neural networks to predict thermal conductivity of food as a function of moisture content, temperature and apparent porosity. *Food Research International*, 36 (6) 617–623.
- Sacramento-Rivero, J.C., Romero G., Cortés-Rodríguez, E., Pech, E. y Blanco-Rosete, S. (2010) Diagnóstico del desarrollo de biorrefinerías en México. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 9 (3) 261-283
- SAGARPA (2013). *Carne de Pollo Mexicana*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Folleto Técnico No. 26.
- Saidur, R., Abdelaziza, E.A., Demirbas, A., Hossaina, M.S., Mekhilef S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15(5), 2262–2289
- Salminen, E. A., & Rintala, J. A. (2002). Semi-continuous anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse waste: effect of hydraulic retention time and loading. *Water research*, 36(13), 3175-3182.
- Serment-Moreno, V., Mujica-Paz, H., Torres, J.A. and Welte-Chanes, J. (2012). Montecarlo simulation of orange juice pectinmethylesterase (PME) inactivation by combined processes of high hydrostatic Pressure (HHP) and temperature. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 11 (3) 363-372.

- Serio, M. A. (2003). Pyrolysis processing of animal manure to produce fuel gases. *Fuel and Energy Abstracts*, 44 (4), 232–233
- Schlegel, M., Brosig, G., Eckert, A., Engelke, K., Jung, M., Polt, A., ... & Vogt, C. (2006). Integration of discrete-event simulation and optimization for the design of value networks. *Computer Aided Chemical Engineering*, 21, 1955-1960.
- Shafer, S. M., Smith, H. J., & Linder, J. C. (2005). The power of business models. *Business horizons*, 48(3), 199-207.
- Sondreal, E.A. Benson, S.A. Hurley, J.P. Mann, M.D. Pavlish, J.H. Swanson, M.L. Weber, G.F., Zygarlicke, C.J., (2001). Review of Advances in combustión Technology and biomass cofiring. *Fuel Processing Technology* 71, 7-38.
- Spinelli, R., & Picchi, G. (2010). Industrial harvesting of olive tree pruning residue for energy biomass. *Bioresource technology*, 101(2), 730-735.
- Stabell, C. B., & Fjeldstad, Ø. D. (1998). Configuring value for competitive advantage: on chains, shops, and networks. *Strategic management journal*, 19(5), 413-437.
- Taylor, Gail. (2008). Bioenergy for heat and electricity in the UK: A research atlas and roadmap. *Energy Policy*, 36(12) 4383–4389
- Turki, S. (2012). SRI Value Network Analysis. *Journal of Financial Studies & Research*. IBIMA Publishing. Vol. 2012 (2012), Article ID 868722, 12 pages.
- UNFCCC. (2012). Clean development mechanism (CMD). United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).
- Valdés-Álvarez, A. C. (2013). Modelo reusable para la generación de bioenergía a partir de residuos agrícolas cañeros RAC. Instituto Tecnológico de Orizaba, Div. Posgrado. Tesis de Grado.
- Vásquez-Ramírez, L. Y. 2008. La abducción como alternativa al método científico en la educación superior. *Unipluriversidad*, 8 (2), pp. 1-12
- Wang B., Wang X., Wang J. (2012). Construction and empirical analysis of agricultural science and technology enterprises investment risk evaluation index system. 2012 international conference on future computer support education. *IERI Procedia*. 2, 485 – 491.

- Whitely, N., Ozao, R., Arriaga, R., C.Yan., Wei-Ping P.(2006). Multi-utilization of chicken litter as biomass source. Part 1: Combustion. *Energy & Fuels*, 20, 2660-2665
- Wiendahl, H. & Lutz, S., 2002. *Annals of the CIRP*, 51(1), pp. 1-14.
- Wright, L. (2006). Worldwide commercial development of bioenergy with a focus on energy crop-based projects. *Biomass and Bioenergy*, 30(8), 706-714.
- Wu, X., & Zhang, W. (2009). Business Model Innovations in China: From a Value Network Perspective. In The conference of “US-China Business Cooperation in the 21st Century: Opportunities and Challenges for Entrepreneurs,” Indiana University, USA.
- Zadeh, Lotfi A. (2008). Is there a need for fuzzy logic?. *Information Sciences*. 178 (2008) 2751–2779
- Zaheer, A., Gulati, R., & Nohria, N. (2000). Strategic networks. *Strategic management journal*, 21(3), 203.
- Zhang X. (2012). Venture capital investment selection decision-making base on fuzzy theory. 2012 international conference on solid state devices and materials science. *Physics Procedia*. 25, 1369 – 1375.
- Zhu S., S. Lee S., Hargrove S.K. y Chen G. (2007). Prediction of combustion efficiency of chicken litter using an artificial neural network approach. *Fuel* (86) 877–886



# ANEXOS

## ANEXO 1. GRUPO CORPORATIVO EMPRESARIAL.

Un grupo corporativo empresarial es un conjunto de empresas dedicadas a múltiples sectores de negocios, y la administración corporativa de las unidades industriales puede tener distintas divisiones de negocios. El presente trabajo de investigación evalúa solo dos divisiones de negocios: la Avícola y la Azucarera.

### **División Avícola.**

La empresa avícola dedicada a la producción y procesamiento de pollo de engorde, está compuesta por diferentes unidades estratégicas de negocios (UEN), estas son las granjas reproductoras, granjas de engorde, procesadora de aves, plantas de alimento, incubadoras y autotransporte.

### **División Azúcar (Cañero-Azucarera)**

En la división azúcar son tres ingenios azucareros considerados unidades estratégicas de negocios (UEN), son las unidades que están dedicadas a la producción de azúcar de caña, y están ubicadas en tres diferentes regiones del país, uno en Huixtla, Chiapas, otro en Ciudad Lerdo de Tejada, Veracruz y otro en Santa Clara de Valladares, municipio de Tocuambo, Michoacán.

Los ingenios azucareros a su vez cuentan cada uno, con una empresa abastecedora de caña para mejorar las operaciones de la cadena de suministro Cañero-Azucarera, estas unidades están dedicadas a la producción y cosecha de caña de azúcar.

Cada ingenio azucarero junto con la empresa agrícola correspondiente a su zona de influencia forman la cadena de suministro Cañero-Azucarera, lo mismo ocurre con la empresa Avícola que tiene integrada la cadena de suministro a través de sus unidades estratégicas de negocio.

### **1.1. Cadena de Valor Avícola.**

La empresa avícola está dedicada a la producción de pollo de engorde, esta cadena de valor está constituida por diferentes unidades estratégicas de negocio entre las que destacan las granjas reproductoras, las granjas de engorde donde se produce la pollinaza, la procesadora de aves donde se realiza el sacrificio de los pollos de engorde, las plantas de alimento, las incubadoras y el autotransporte.

### 1.1.1. Ciclo de producción de pollo de engorde.

La producción del pollo de engorde consta de varias etapas de desarrollo. La planta de incubación se encarga del manejo del huevo incubable y del nacimiento de los pollitos; la granja de engorde está a cargo del crecimiento del pollo; la planta de procesamiento se ocupa de los pollos terminados y de su carne en canal, ver Figura 31.

Entre cada una de estas etapas existe una fase de transición, la cual se debe manejar con un mínimo de estrés para las aves.

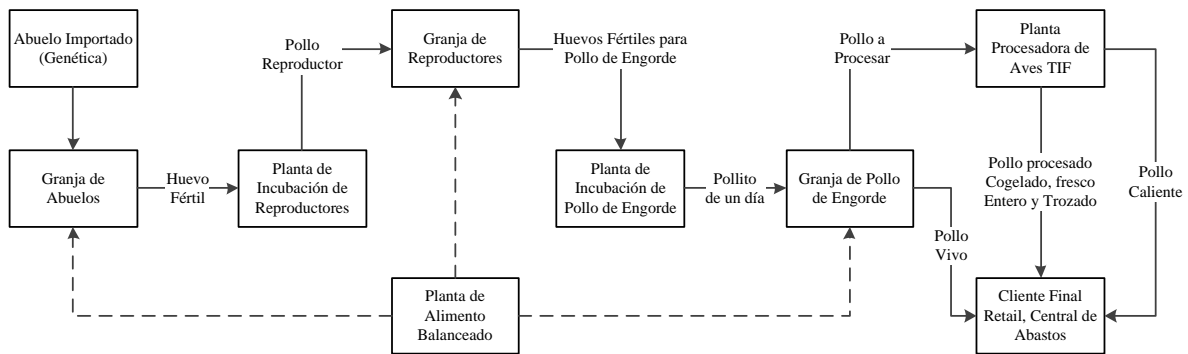
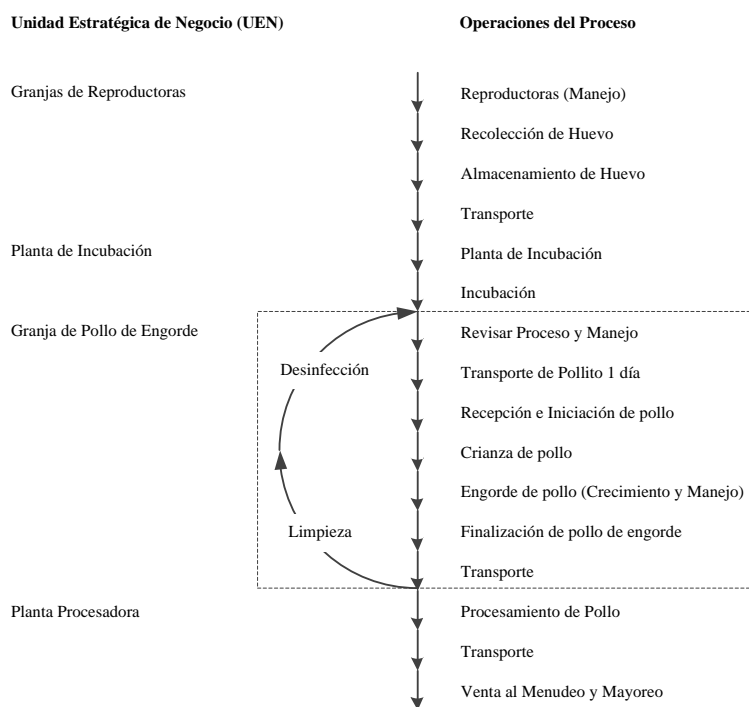


Figura 31. Ciclo de producción de pollo de engorde

El proceso total de producción de carne de pollo de engorde requiere de un proceso secuencial satisfactorio con el mejor rendimiento posible al menor costo, desde que se produce el huevo hasta que la carne de pollo llega al consumidor final, ver Figura 32.



**Figura 32. Proceso de producción de pollo de engorde**

El objetivo de manejo del pollo de engorde es alcanzar el rendimiento de la parvada en lo que se refiere a peso vivo, conversión alimenticia, uniformidad y rendimiento en carne. Las primeras dos semanas de vida de la parvada son críticas y requieren atención particular. El manejo del pollo durante la crianza y las primeras etapas de su desarrollo es la de mayor importancia. La producción de estas aves es un proceso en secuencial y, a la larga, el rendimiento depende del éxito al completar cada paso. Para lograr el máximo rendimiento, se deberá evaluar cada etapa aplicando para ello un juicio crítico y realizando mejoras siempre que se requieran.

### 1.1.2. Granjas de producción de pollo de engorde

La granja de producción avícola es una unidad agroindustrial que está integrada por múltiples casetas (también llamadas galpones) donde se cría y crece el pollo de engorde. Cada granja está diseñada para cada tipo de pollo que se desea producir para lograr mayor rendimiento de carne de ave por metro cuadrado o por cantidad de alimento suministrado.

El proceso consta de 6 etapas principalmente el manejo y preparación, la recepción e iniciación del pollo, la crianza del pollo de engorde, el engorde del pollo, la finalización del pollo y la limpieza con desinfección del área.

### **1) Manejo y preparación.**

La preparación de la granja se realiza bajo un protocolo de instrucciones que efectúa el responsable del manejo de la crianza del pollo, el cual debe estar capacitado o contar con experiencia en salud y producción de pollo de engorde para elevar el éxito y productividad de la granja.

La caseta debe estar habilitada con disponibilidad de agua fresca y limpia, así como garantizar el suministro de alimento, el aire en el interior de las casetas debe tener una temperatura de 30°C y la humedad relativa en el aire debe ser de 60 y 70%.

La cama del ave debe estar distribuida y mezclada de manera uniforme y homogéneamente a una profundidad de entre 8 y 10 cm (3 y 4") para aislar la temperatura del piso con el pollo, la cama debe tener una temperatura de entre 28° y 30°C, y es importante definir el diseño de la producción de pollos de engorde basados en su sexo.

La calidad de la cama afecta directamente la salud y rendimiento de las aves, pues los niveles bajos de humedad ayudan a reducir la cantidad de amoníaco en la atmósfera y en consecuencia reducir el estrés respiratorio, y la incidencia de quemaduras y dermatitis en patas, piernas y pechuga del ave.

### **2) Recepción e iniciación del pollo.**

El proceso inicia cuando la planta de incubación envía el pollito recién nacido (de un día) lo antes posible hacia las granjas de pollo de engorde, para administrarles alimento inmediatamente y que los pollitos se reciban con las condiciones de ambiente correcto y controlado para evitar su muerte.

Es importante que los pollitos sean sacados de las cajas de manera rápida y suavemente sobre la cama para evitar daños y traumas, y se deben ajustar correctamente los parámetros de control de los dispositivos para asegurar un ambiente uniforme en toda la caseta.

El alimento suministrado al pollito debe tener una textura en forma de migajas sin polvo o minipallets para facilitar que el pollito lo ingiera y digiera correctamente, una forma de verificarlo es que el pollito tenga el buche lleno, blando y redondeado por la mezcla de alimento y agua.

### **3) Crianza del pollo de engorde.**

El proceso de crianza inicia cuando el pollito se ha adaptado a su nuevo ambiente, durante los primeros 12 o 14 días de edad todavía son incapaces de regular su temperatura, y se requiere el uso de equipos de calefacción a gas y el uso de calefactores de aire forzado.

Primero se realiza la crianza por zonas delimitadas en interior de la granja haciendo grupos de pollitos y con forme el pollo crece la crianza se amplía a toda la granja de manera abierta. El propósito de la crianza es estimular el apetito y la actividad lo antes posible para que empiece a ganar peso, ver Imagen 1.



**Imagen 1. Crianza de pollitos por zonas y de manera abierta**

Con forme el pollito crece la zona de crianza limitada es insuficiente en espacio para que el pollito se desarrolle favorablemente haciendo necesario realizar la crianza abierta hacia toda la caseta.

#### **4) Engorde del Pollo (Crecimiento).**

En este periodo se mantienen los controles ambientales al interior de la caseta para garantizar el confort y crecimiento del pollo con alimento, agua, temperatura, humedad, ventilación y manejo, principalmente, este periodo determina el costo de producción y costo de conversión de alimento a carne de ave, ver Imagen 2.

Para obtener resultados óptimos de consumo de alimento, crecimiento y conversión alimenticia, es crítico proporcionar a las aves la cantidad correcta de nutrientes para garantizar su crecimiento y el logro de los parámetros de producción objetivo.



**Imagen 2. Engorde de pollos**

### **5) Finalización del pollo de engorde**

El periodo de finalización es 20 a 25 días antes de que el pollo haya alcanzado el peso adecuado para su venta o procesamiento, haya concluido el periodo de engorde, y/o se haya cumplido el programa de alimentación de acuerdo al costo de producción objetivo.

El consumo de alimento en este periodo representa el mayor volumen y el mayor costo, por lo que es importante diseñar estas dietas para elevar al máximo el retorno financiero con respecto al tipo de productos que se desee obtener.

Al término de este periodo se efectúa la captura de los pollos para introducirlos en las jaulas que serán transportadas sobre las planas en tractocamiones hacia la procesadora de aves o hacia las centrales de abato para su venta en pie (también llamado pollo caliente). La realización de esta actividad debe ser realizada por personal competente y bien entrenado para evitar causarle estrés, magulladuras, moretones, rasguños y otras lesiones al pollo que afectan su comercialización.

### **6) Limpieza y desinfección.**

Cuando los pollos de engorde son desalojados de la granja, se debe limpiar y desinfectar a fondo las casetas, instalaciones y equipos utilizados antes de que llegue el material de cama nueva y los pollos recién nacidos del siguiente periodo. Esta actividad es para garantizar la salud en el ave y evitar o eliminar el posible contagio de patógenos o virus existentes.

Este proceso es para cumplir con los criterios de bioseguridad que permiten reducir el riesgo de exposición de agentes infecciosos, reducir la probabilidad de contaminación y para garantizar un ambiente de confort lo más limpio posible para que los pollos desarrollen todo su potencial genético para obtener mejores resultados productivos, ver Imagen 3.



**Imagen 3. Limpieza y desinfección de caseta de producción de pollo**

### 1.1.3. Procesamiento de pollo de engorde.

La planta procesadora de aves se encuentra ubicada en el municipio de Fortín, Veracruz, estas instalaciones le permiten a Grupo Pecuario San Antonio procesar el pollo de engorde para dar un valor agregado a los productos en la cadena de valor, ver Imagen 4.



**Imagen 4. Planta procesadora de aves**

En la planta procesadora de aves se elaboran 4 tipos de pollo procesado: el pollo 1) Seco Natural es el pollo que no se hidrata y no se le agrega colorante, el pollo 2) Hidratado natural es el pollo procesado que ha sufrido una pérdida en peso y pasa por los chillers para hidratarse y recuperar su peso original y no se le agrega colorante, el pollo 3) Hidratado pintado también pasa por los chillers para hidratar la carne en canal y recuperar su peso y se le agrega colorante para pintarlo y el pollo 4) Kosher requiere de un sacrificio especial a través de un ritual para su venta a la comunidad judía.



El procesamiento inicia desde que llega el pollo de engorde vivo a los andenes de descarga en la planta procesadora hasta que se logran obtener las piezas del pollo listas para ser enviadas al mercado de consumo en los principales mercados de abasto.

Este proceso comprende una serie de pasos que deben vigilarse para mantener la calidad de pollo procesado y asegurar una óptima calidad de la carne o producto final. (SAGARPA, 2013)

El procesamiento de pollo de engorda se realiza a través de tres áreas y/o etapas en el interior de la planta procesadora: 1) recepción y matanza, 2) eviscerado, y finalmente 3) empaques y cortes, ver Figura 33.

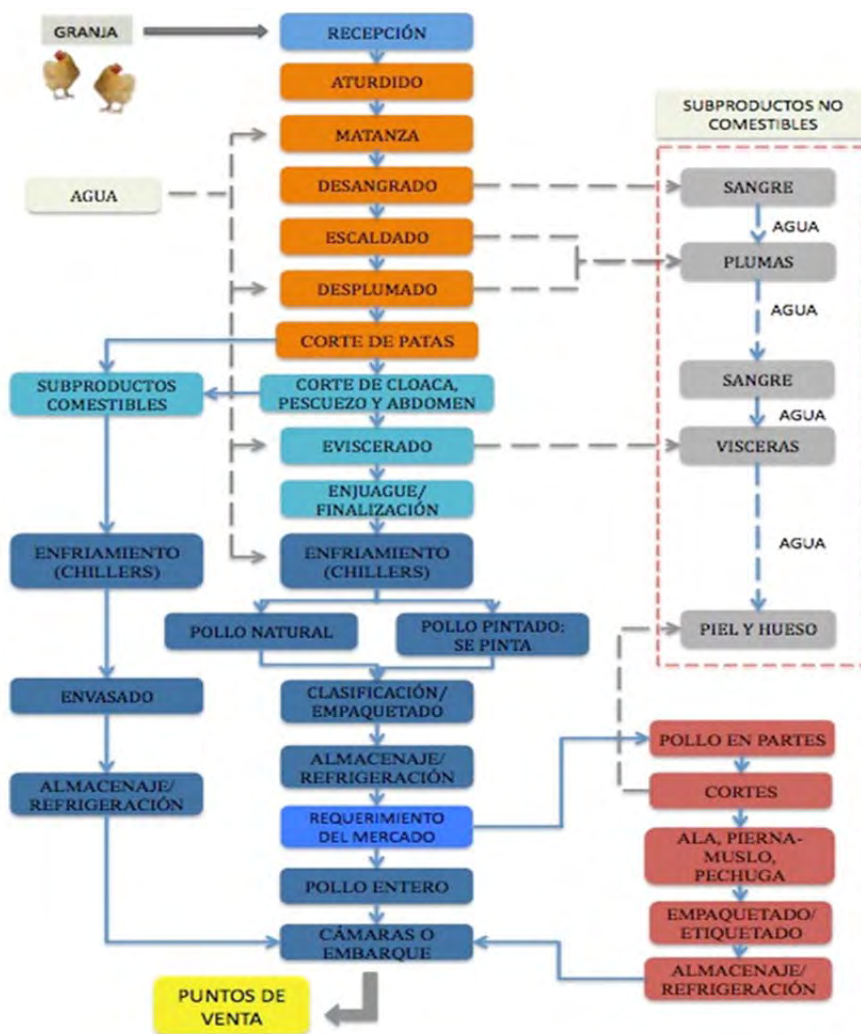


Figura 33. Etapas del procesamiento de pollo de engorde

### 1) Área de recepción y matanza.

Al terminar el ciclo de crecimiento el pollo de engorde es transportado desde las granjas hacia la planta procesadora de aves en jaulas especiales para facilitar la logística de enjaule, carga y descarga del pollo, ver Imagen 5.



**Imagen 5. Transporte de pollo de engorde hacia la planta procesadora**

Existe un tiempo de espera al momento de llegar los pollos de engorde al andén de descarga en la planta procesadora de aves, que es utilizado para preparar el área, equipos y personal que son requeridos para realizar la descarga, ver Imagen 6.



**Imagen 6. Andenes de descarga de pollo de engorde**

Los pollos de engorde que son descargados ingresan a la planta procesadora través de una banda transportadora, un operador los toma por las patas al pollo y los cuelga en un gancho especial quedando boca abajo el ave que recorre la primera área, básicamente es para facilitar las operaciones del procesamiento posteriores.

Una vez que el pollo de engorde se encuentra colgado ingresa al aturdidor donde a través de un shock eléctrico ocasiona que el pollo se desmaye para insensibilizarla produciéndole un estado de inconsciencia durante 60 ó 90 segundos y lograr una muerte libre de dolor, algunos de ellos en ese momento mueren debido a que no soportan la carga eléctrica suministrada.

Posteriormente un operador realiza la matanza o degüello de los pollos, e inmediatamente se produce un desangrado que le provoca al pollo anoxia cerebral, que es la ausencia de aporte sanguíneo a los tejidos, y motivo por el cual las aves mueren, ver Imagen 7.



**Imagen 7. Ganchos para colgar pollo de engorde**

En el proceso de escaldado se sumergen los pollos de engorde en agua caliente a 53°C durante 120 segundos con el objeto de debilitar los folículos de las plumas y así facilitar la extracción de las plumas, ver Imagen 8.



**Imagen 8. Escaldado de pollo de engorde**

El proceso de remoción de plumas (desplumado) consiste en retirar las plumas de las aves a través de máquinas que tienen instalados dedos de hule flexibles que giran en diferentes ángulos y direcciones, ver Imagen 9.



**Imagen 9. Desplumado de pollo de engorde**

Y finalmente se realiza el corte de patas, dejando caer el pollo de engorde en las mesas de recepción de pollo del proceso de eviscerado. Las patas aun colgadas en los ganchos se dirigen hacia las cestas de patas para su selección, limpieza y almacenaje.

## 2) Área de eviscerado.

Los pollos de engorde sin patas son tomados de las mesas de recepción de pollo por un operador y son colgados nuevamente en otra línea de ganchos que recorren la sección de eviscerado.

En este proceso se realizan los cortes de cloaca, pulmones, pescuezo y abdomen, para facilitar la extracción de las vísceras comerciables para su consumo. Los cortes y extracción de estas vísceras deben efectuarse limpiamente para evitar la posible ruptura de buches o intestinos que puedan contaminar la carne en canal y causar alguna enfermedad al consumidor final, ver Imagen 10 e Imagen 11.



**Imagen 10. Eviscerado de pollo de engorde**

Las vísceras son expuestas en la parte exterior del pollo, para ser cortadas por los operadores que seleccionan el hígado, molleja, etc. que son comercializados posteriormente. En este proceso el pollo de engorda está libre de vísceras para ser enviado hacia los chillers.





**Imagen 11. Selección de vísceras y cortes de piezas de pollo de engorde**

### **3) Área de empaque y cortes.**

El Pollo de engorde libre de vísceras pasa a través de un pre-chiller y un chiller para ser lavado, desinfectado y enfriado, esta etapa del proceso evita se genere el crecimiento de microorganismos patógenos en el pollo procesado y se produzca la eliminación de bacterias patógenas, ver Imagen 12.



**Imagen 12. Enfriamiento y desinfección de pollo procesado en chiller's**

La cloración del pollo en los chiller's se efectúa con dosis de 50 ppm, en esta etapa el pollo absorbe una cantidad mínima de agua durante su enfriamiento, ya que al ingresar a los chiller's se encuentra parcialmente caliente y deshidratado.

En esta etapa del proceso se define si es almacenado el pollo entero o si se aplica el corte de piezas de pollo, esta decisión está basada en el requerimiento de los lotes de producción por tipo de pollo a procesar, los pedidos de compra y requerimiento de embarque.

El corte de piezas para obtener piezas de pollo como son alas, piernas, muslos, pechugas, etc. se hace de manera automática, y dependiendo de la capacidad instalada de las máquinas de corte se puede complementar de manera manual para atender el pedido de compra y embarque. Las piezas de pollo son seleccionadas y clasificadas por los operadores para su posterior almacenamiento en cámaras de enfriamiento o para su embarque, ver Imagen 13.



**Imagen 13. Corte de piezas de pollo de engorde**

El corte de piezas del pollo de engorde debe ser lo más homogéneo e inocuo posible para garantizar la menor merma o pérdida de pollo por cortes defectuosos y daño de piezas con el mayor rendimiento de pollo procesado. Los productos obtenidos en esta etapa deben enjuagarse para ser enviadas al área de clasificación para su almacenamiento.

#### **Subproductos no comestibles.**

A lo largo del procesamiento del pollo, incluidas las tres etapas, se hace uso de agua de pozo para el lavado de equipos, enjuague del pollo por sangre, cloro y colorante, arrastre de plumas, vísceras y mermas, para el enfriamiento del pollo y limpieza de todas las áreas, ver Figura 34.

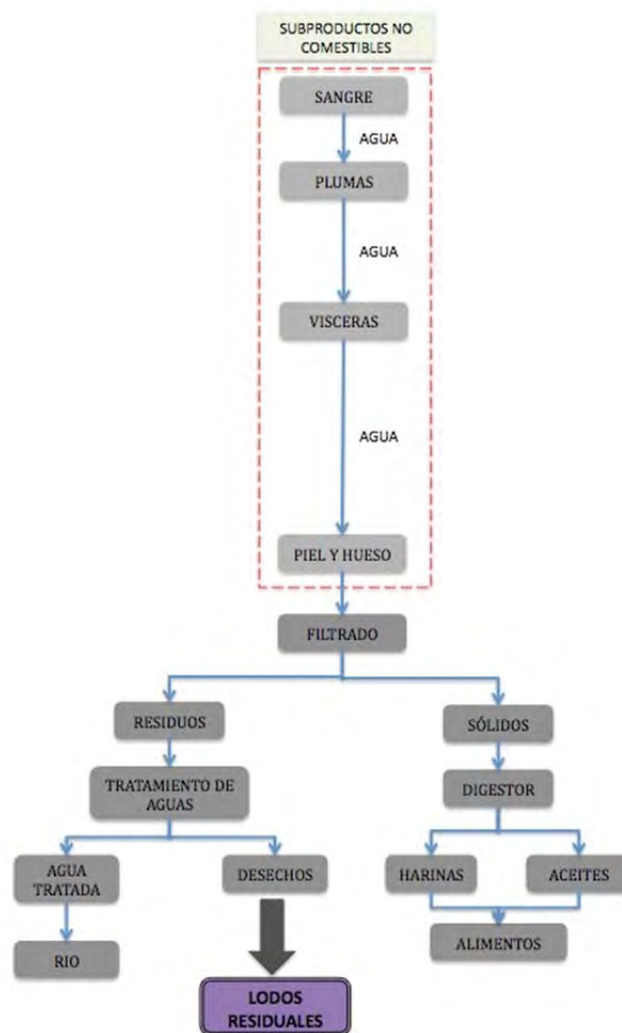


Figura 34. Diagrama de los residuos en la planta procesadora de aves (PPA)

El agua que se encuentra mezclada con todos los elementos resultantes del proceso se le llama Efluente y es separada en la rejilla de recuperación de mermas, los sólidos se envían a la planta de rendimiento en donde tratan industrialmente los residuos sólidos del proceso para elaborar aceite y harinas que es vendido al mercado de aditivos para alimentos de rumiantes.

Los efluentes que no fueron retenidos continúan su recorrido hacia la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), en donde se le aplica un tratamiento físico-químico a los efluentes para separar el agua y la carga orgánica.

El agua tratada en la PTAR es vertida hacia el río y los sólidos resultantes del tratamiento son separados hacia un tanque de confinamiento, a estos residuos con alto contenido de carga orgánica se le llaman Lodos Residuales.



## 1.2. Cadena de Valor Cañero – Azucarera (Ingenios Azucareros).

La división Azúcar cuenta con tres unidades industriales de procesamiento de caña de azúcar para obtener azúcar, miel final (melaza), bagazo, cachaza, etanol hidratado, etanol anhidro y residuos agrícolas de cosecha (RAC), este trabajo de investigación incluye estudios y análisis de cogeneración de bioenergía, para el desarrollo de una red de valor.

El desarrollo tecnológico y la innovación de sus procesos industriales relacionados con la producción de azúcar, y con el cultivo y cosecha de la caña de azúcar hacen estar al grupo corporativo dentro de los mejores grupos cañero – azucareros del país.

El proceso de elaboración de azúcar consta de dos etapas, la del cultivo y cosecha de la caña de azúcar en el Campo y la industrialización de la caña en la Fábrica para cristalizar el jugo de caña y producir azúcar.

### 1.2.1. Campo

Las prácticas agrícolas de producción de caña de azúcar se caracterizan por las actividades relacionadas al cultivo, cosecha y transporte de la caña de azúcar.

Existen tecnologías desarrolladas y disponibles para implementar sistemas de producción sostenible de caña de azúcar (FIRA, 2010), a continuación se presentan las etapas del proceso de producción de caña de azúcar.

Las actividades de campo constan de 6 procesos que inician con la preparación del terreno, la siembra, el cultivo, la cosecha y termina con el alce y acarreo de la caña para entregarla al ingenio.

#### 1) Preparación del Terreno.

Existen diferentes labores para la preparación del suelo que son realizadas con implementos acoplados al tractor.

Primero se realiza la nivelación del terreno para emparejar y darle un gradiente de pendiente al terreno para drenar los excesos de agua en periodo de lluvias, se utilizan sistemas satelitales de posicionamiento georeferenciado (GPS) y nivelador con pendiente variable, ver Imagen 14.



**Imagen 14. Nivelación GPS con pendiente variable**

Posteriormente se efectúa el subsuelo para romper el terreno compacto de la última cosecha y dejarlo en condiciones para que la nueva planta de caña se desarrolle normalmente. El barbecho se aplica para limpiar y quitar los residuos de raíces, de hierba, de malezas, de plantas para dejar lista la superficie en condiciones de una siembra nueva.

El rastreo es para romper los terrones de tierra y pulverizarla a través de diferentes tipos de rastras mecánicas que formarán los surcos, ver Imagen 15.



**Imagen 15. Subsuelo y rastra mecánica para la preparación del terreno**

La excavación de drenes son los canales de drenaje del terreno y sirven para drenar los excesos de agua en zonas de riego o con altas precipitaciones para evitar inundaciones que afecten al cultivo.

## **2) La siembra de caña.**

Esta etapa consiste cosechar caña en su ciclo planta para obtener trozos de tres yemas de largo (de 27 a 30 cm) que sirven para obtener la semilla, que será sembrada en la tierra preparada previamente. En esta etapa se selecciona la variedad de caña que será sembrada dependiendo de las condiciones climáticas, el tipo de suelo y edad de cosecha de la variedad, entre otros.

La siembra de la semilla de caña se puede efectuar manual de manera tradicional o también puede ser mecánicamente, para ello se utiliza maquinaria e implementos mecánicos que efectúan primera la cosecha de la semilla de la caña a partir de caña en ciclo planta, y posteriormente se siembra mecánicamente y fertiliza al momento que se siembra, ver Imagen 16 e Imagen 17.



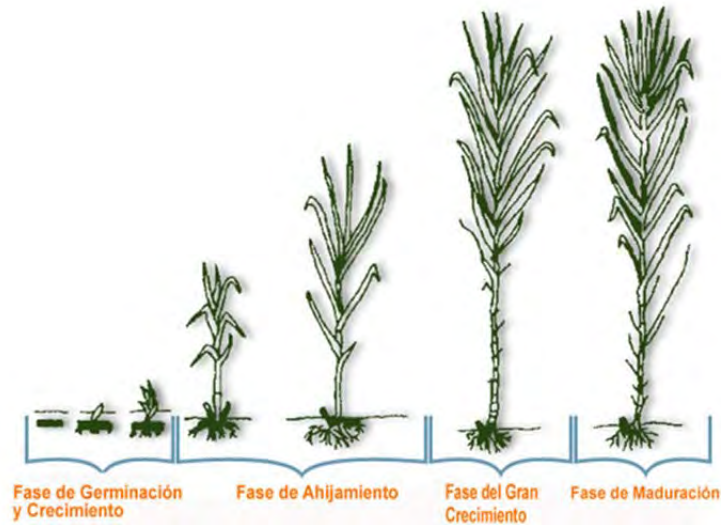
**Imagen 16. Cosechadora de semilla de caña y sembradora mecánica de semilla de caña**



**Imagen 17. Siembra manual de caña (sistema tradicional)**

### **3) Cultivo de caña.**

En este periodo se desarrollan cuatro fases fenológicas del desarrollo de la caña. La fase de germinación produce el primer brote pequeño del tallo y hojas. La fase de amacollamiento es el brote de varios tallos en la base de caña para formar la cepa. La fase de crecimiento es la formación y alargamiento de la caña produciendo grandes volúmenes de materia seca y área foliar, en esta fase se aplican riegos con agua y fertilizantes para favorecer su crecimiento. En la fase de maduración de la caña se efectúa la síntesis y concentración de sacarosa en los tallos, ver Imagen 18.



**Imagen 18. Fases de crecimiento de caña de azúcar**

Cada periodo en el que corta la caña para ser cosechada se le nombra diferente, al primer periodo Planta, al segundo Soca, y a partir del tercero en adelante Resoca 1, Resoca 2, Resoca 3 y así sucesivamente como forme pasen los periodos de cosecha hasta que se siembre una nueva planta de caña, ver Imagen 19.



**Imagen 19. Cultivo de caña de azúcar**

Durante el periodo de cultivo existen factores que influyen en el crecimiento de la caña, como son: la temperatura, las horas luz por irradiación solar y la precipitación pluvial.

La caña de azúcar requiere altas temperaturas durante el período de crecimiento y bajas temperaturas durante el período de maduración. Mientras más grande sea la diferencia entre las

temperaturas máximas y mínimas durante la maduración mayor serán las posibilidades de obtener jugos de alta pureza y un mayor rendimiento de azúcar.

Las temperaturas óptimas para diferentes etapas del desarrollo de este cultivo son: para la germinación entre 32°C y 38°C, para el amacollamiento 32°C y para el crecimiento 27°C.

La precipitación anual adecuada para este cultivo es de 1.500 mm bien distribuida durante el período de crecimiento (nueve meses). La caña necesita la mayor disponibilidad de agua en la etapa de crecimiento y desarrollo, durante el período de maduración esta cantidad debe reducirse, para restringir el crecimiento y lograr la acumulación de sacarosa.

La luz es uno de los factores básicos para la producción de azúcares por lo que su intensidad es muy importante. En condiciones normales de humedad, la radiación solar tiene gran influencia en el crecimiento, así como en la formación de los azúcares y en su pureza.

En general puede decirse que la época de más baja precipitación pluvial corresponde a los meses de más baja temperatura y de mayor brillo solar. Los meses de enero, febrero, marzo y abril, constituyen el período favorable para la maduración de la caña de azúcar en nuestro país y es la mejor época para la zafra.

La precipitación anual promedio para las zonas cañeras del país varía desde 700 mm hasta 3,500 mm; la temperatura media varía entre 22.5 y 28°C y el promedio anual de horas luz oscila entre 1,500 y más de 2,550 horas.

Es importante mencionar que en esta etapa también se aplican fertilizantes a base de nitrógeno, fosforo y potasio que sirven como suministro de nutrientes que favorecen su crecimiento y producción. La dosificación de los fertilizantes se realiza de acuerdo a la edad y etapa de desarrollo de la caña.

Los biofertilizantes son una alternativa de menor costo y sin impacto al medio ambiente que pueden ser aplicados a la caña de azúcar permitiendo mejorar la fertilidad de los suelos, incorporación de materia orgánica y lograr la nutrición que requiere la planta.



#### 4) Cosecha de la caña.

Cuando la caña de azúcar llega a su nivel máximo de concentración de sacarosa indica que está madura para ser cosechada, en este punto se utiliza equipo mecánico y tecnológico de última generación para ser cortada, recolectada y transportada hacia el ingenio, quien procesa la caña para transformarla en azúcar.

Durante las operaciones de cosecha de la caña larga efectuada por la cosechadora mecánica la caña es limpiada, cortada y picada generando así trozos de caña que son enviados a los autovolteos de alta flotación con capacidad de entre 8 y 10 toneladas que van a un lado de la cosechadora recorriendo juntos la superficie del terreno con caña, ver Imagen 20.



**Imagen 20. Cosechadora de caña de azúcar**

Los autovolteos están sincronizados para realizar recorridos en circuito desde la cosechadora hacia la jaula de alta capacidad de 30 toneladas estacionada a un lado de la parcela con cultivo de caña, esperando a recibir la caña picada que será transportada hacia el ingenio, ver Imagen 21.



**Imagen 21. Sincronización de operaciones agrícolas de cosecha mecanizada de caña**

Durante la operación de limpieza de la caña en el interior de la cosechadora mecánica, se producen los residuos agrícolas de cosecha (RAC) de caña de azúcar y que son expulsados hacia el campo cañero.

Actualmente estos residuos no utilizados para otros usos o fines generando un costo de oportunidad y desperdicio de tipo energético. Al iniciar la siembra de semilla de la caña muchos productores queman los residuos para facilitar las operaciones y cuando son periodos de soca y/o resocas solo se quema parcialmente para reintegrar materia orgánica al terreno del cultivo.

En países con mayor desarrollo tecnológico estos residuos agrícolas de cosecha son recolectados y utilizados como biocombustible para distintos fines energéticos, entre los que destacan la generación de energía térmica y eléctrica.

La cosecha de la caña de azúcar se realiza por diversos métodos, su uso depende de factores como topografía, condiciones del terreno, nivel tecnológico, capacidad operativa de los equipos, disponibilidad económica y aspectos sociales.

La cosecha puede dividirse en dos tipos y dos subtipos de cosecha. La cosecha Manual y Mecanizada, a su vez cada una de ellas se dividen en caña cosechada en verde o quemada, ver Tabla 28.

➤ **La caña cosecha mecanizada de caña en verde**

La cosecha en verde representa retos tecnológicos de manejo, y es una alternativa viable para lograr mitigar los impactos negativos sobre el ambiente, reducir los costos de cosecha y maximizar el rendimiento de caña por hectárea. El corte mecanizado de caña en verde es la solución tecnológica que ha resuelto la falta de disponibilidad cortadores de caña para la cosecha.

La cosecha mecanizada en verde produce residuos agrícolas de cosecha (RAC) de caña de azúcar que quedan en la superficie del terreno, para ser utilizados en procesos de combustión para generación de energía térmica en el interior de los ingenios azucareros, ver Imagen 22.



**Imagen 22. Cosecha mecanizada de caña en verde**

➤ **La cosecha mecanizada de caña quemada**

La cosecha de caña quemada previa a la cosecha se genera una serie de impactos ambientales negativos que inciden directamente sobre la atmósfera, el suelo, el ser humano y en la caña como materia prima, y eleva los costos de cosecha, ver Imagen 23.



**Imagen 23. Cosecha mecanizada de caña quemada**

Con la cosecha mecanizada de caña quemada no se producen residuos agrícolas de cosecha (RAC) que sean económicamente atractivos recolectarlos para otros usos y aprovechamiento industrial, de manera que durante su quema en el campo se desperdicia energía útil para procesos industriales.

➤ **La cosecha manual de caña quemada**

La quema de la caña facilita el corte manual de la caña, para ser recolectada por equipo especializado, sin embargo deteriora el contenido de sacarosa en la caña. El corte manual de caña quemada es más común que el corte manual de caña en verde, ver Imagen 24.





**Imagen 24. Cosecha manual de caña quemada**

➤ **La cosecha manual de caña verde**

La cosecha en verde de la caña es muy poco frecuente porque el cortador se expone a animales, alimañas y reptiles durante el corte, aunado que la velocidad y el rendimiento de toneladas de caña cortada en verde es menor con respecto a la quemada, ver Imagen 25



**Imagen 25. Cosecha manual de caña en verde**

**Tabla 28. Comparación entre cosecha de caña Manual vs. Mecanizada. (Galvis, 2010)**

Variable	Sistema de Cosecha manual	Sistema de Cosecha mecanizada
<b>Materia extraña</b>	En caña verde: 2 - 4% En caña quemada: 1.5 - 2%.	En caña verde: 10 -12%. En caña quemada: 8-10%.
<b>Corte en verde</b>	Mayor dificultad para el corte en verde.	Menor dificultad para corte en verde.
<b>Manejo de residuos</b>	Difícil manejo de residuos del corte en verde.	Fácil manejo de los residuos del corte verde y quemado.
<b>Tiempo de permanencia</b>	Alto tiempo de permanencia: 25h – 40h.	Bajo tiempo de permanencia: 4h – 10h.
<b>Despeje</b>	Requiere celeridad en el despaje para no afectar el rebrote de la cepa.	Requiere prontitud en el despaje para la labor del repique.

<b>Eficiencia</b>	Rendimiento del cortero: Caña semi-limpia 2 - 4 t/hombre/día. Caña quemada 5 - 7 t/h/día.	Rendimiento de la cosechadora: Caña semi-limpia 24 - 25 ton/h. Caña quemada 26 - 28 ton/h.
<b>Manejo de información</b>	Manejo complejo de la información por cada cortero (calidad, rendimiento, pago nómina).	Menor complejidad en el manejo de información,
<b>Otros</b>	Requiere supervisión para evitar accidentes y garantizar la calidad. Alto costo de la labor. Residuos de caña seca pueden llegar a la fábrica en el siguiente corte.	Requiere supervisión para garantizar la calidad de corte (materia extraña y rendimiento). Mayor flexibilidad de la cosecha. Mayor eficiencia en el transporte al incrementar el 30% del peso por viaje. Exige mejor descompactación de los suelos. Exige adecuación de los campos. Exige variedades apropiadas. Menor costo. No se puede almacenar la caña por períodos largos. Los residuos se recolectan y transportan junto con la caña cosechada, apagando ventiladores

## 5) Alce y Acarreo

El alce mecánico de la caña utiliza alzadoras autopropulsadas. Dichas maquinas cuentan con un brazo mecánico con pinzas que toma los montones de caña y los coloca en los vehículos, jaulas o carretas.

El acarreo o transporte de la caña cosechada manual o mecánicamente hacia el ingenio utiliza tractocamiones y jaulas de carga de alta capacidad de 30 toneladas cada una, estos equipos se utilizan para transportar la mayor cantidad de caña por viaje en el menor tiempo posible, para reducir costos y reducir el deterioro de la caña después de la cosecha.

El alce de la caña es utilizado cuando la cosecha ha sido realizada manualmente, por este motivo la alzadora la tiene que recoger de la superficie hasta ponerla en el interior del contenedor del transporte, ver Imagen 26



**Imagen 26. Alce de cosecha de caña quemada a camiones rabones (tortons) y jaulas cañeras**

Las unidades de acarreo y transporte de caña son de diversos diseños y capacidades, siempre buscando reducir los costos de cosecha, alce y acarreo, ver Imagen 27.



**Imagen 27. Alce de la cosecha de caña quemada a jaulas de alta capacidad**

El acarreo de la caña más rentable es aquel que transporta el mayor número de jaulas de alta capacidad usando un solo tractocamión desde la zona de cosecha hasta el ingenio. La distancia tradicional sugerida es cultivar y cosechar caña a un radio del ingenio de entre 40 y 45km.

Nuevas alternativas de cosecha y acarreo de caña ofrecen sistemas logísticos más eficientes, de mayor capacidad y velocidad que permiten reducir los costos de producción, hacer más competitiva la cosecha y extender la zona de cultivo y cosecha de caña a un radio de entre 110 y 120 km a la redonda del ingenio, ver Imagen 28.





**Imagen 28. Transporte de cosecha mecanizada de caña (Acarreo)**

Los sistemas modernos de transporte multimodal de cosecha de caña mecanizada que ofrecen las cosechadoras, los autovolteos de alta flotación y las jaulas de alta capacidad permiten al ingenio reducir los tiempos de entrega de caña para ser procesada y aumentar el rendimiento de sacarosa al evitar su deterioro después de su corte mecanizado, ver Imagen 29.



**Imagen 29. Descarga de cosecha mecanizada de caña en el ingenio azucarero**

Para la descarga de caña se utilizan mesas de recepción de caña de limpieza en seco (sin uso de agua) y hacen uso de dos tipos de volcadores para verter la caña. Para los camiones rabones que transportan entre 18 y 20 toneladas y es fijo su contenedor se utiliza un volcador de cola y para las jaulas de alta capacidad de 30 toneladas por jaula se utiliza el volcador de hilos (lateral).

## **6) Recolección de residuo agrícola de cosecha**

Los residuos de cosecha en caña cortada con cosechadora quedan distribuidos homogéneamente en la totalidad de la superficie. Los volúmenes de residuos de cosecha por unidad de superficie se ven influenciados por el hábito de crecimiento del cultivo, por el tipo de cosecha en verde o quemado, y si el corte es manual o con cosechadora (corte mecanizado), ver Imagen 30.



**Imagen 30. Residuos de agrícolas de cosecha de caña (RAC) en el campo**

Después de realizar las operaciones de cosecha mecanizada en verde se realizan las operaciones de hilerar o alinear el RAC que está disponible en el campo cañero, solo la mitad de los residuos son recolectados el resto se deja en el campo para que no pierda propiedades orgánicas para el siguiente ciclo del cultivo, y evitar una completa erosión del campo, ver Imagen 31.



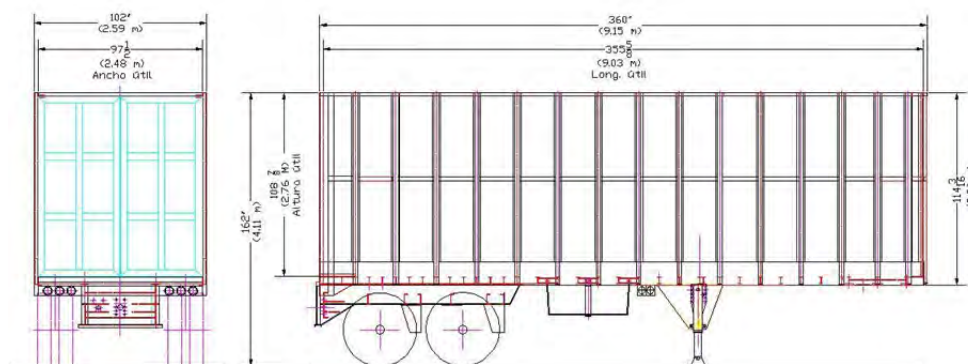
**Imagen 31. Operaciones de hilerado y/o alineado**

Cuando la hilera de RAC está preparada se realizan las operaciones de enfardado, la recolección puede realizarse a diferentes tamaños según el diámetro del fardo y su relación con el peso, ver Imagen 32.



**Imagen 32. Operaciones de enfardado del RAC**

Para su acarreo y transporte se utilizan jaulas especiales de bajo peso para reducir el costo de transporte y elevar la productividad de carga desplazada por kilómetro recorrido desde el punto de recolección hasta el ingenio, ver Imagen 33.



**Imagen 33. Jaulas para el acarreo de RAC hacia el ingenio**

Para alce de los fardos hacia las jaulas se utilizan alzadoras mecánicas que realizan esa operación y facilitan la logística del acarreo, al momento de estar listas las jaulas el tractocamión jala dos jaulas en full para reducir el costo de transporte por viaje, ver Imagen 34.



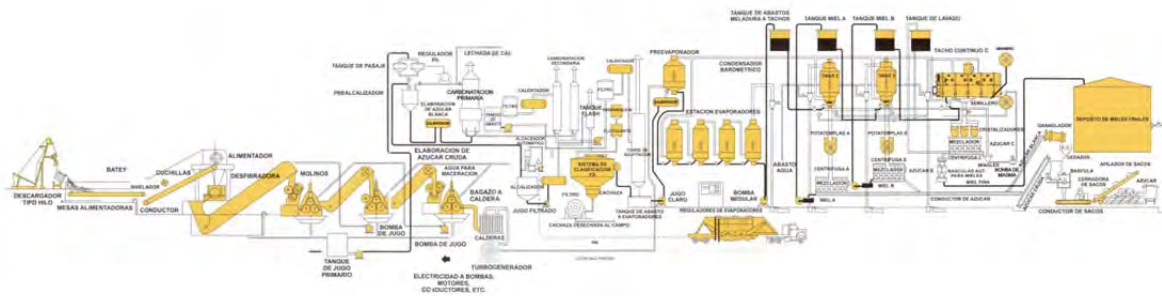


**Imagen 34. Alce y Acarreo del RAC en Jaulas y/o plataformas**

### 1.2.2. Fábrica

El proceso industrial de elaboración de azúcar implica la aplicación de diferentes procesos para extraer el jugo de la caña y convertirlos en cristales de azúcar libres de impurezas.

El proceso de fábrica consta de 7 procesos directos para producir azúcar y 2 procesos complementarios para producir energía. El proceso inicia con la recepción de la caña, se realiza la extracción del jugo, posteriormente el jugo pasa a clarificación, se realiza la evaporación para eliminar la mayor cantidad de agua en el jugo, en seguida pasa al proceso de cristalización donde se forma el cristal, a continuación la meladura pasa al proceso de centrifugación obtener azúcar húmeda y concluye con el secado y envase del azúcar seca para su almacenamiento y entrega al cliente final, ver Figura 35.



**Figura 35. Proceso de elaboración de azúcar de caña**

El proceso complementario se realiza en las calderas al combustionar el bagazo para producir vapor y en la Planta de Fuerza se recibe el vapor para transformarlo y producir energía eléctrica, a continuación se desarrollan cada uno de los procesos.

### **1) Recepción**

Las unidades cargadas con caña cosechada llegan al batey del ingenio para ser pesadas por las básculas cañeras, en esta etapa del proceso se determina la calidad de la materia prima a través de muestras que se analizan continuamente en el laboratorio de control de calidad.

La caña que llega a la fábrica de azúcar se descarga de las jaulas de alta capacidad sobre las mesas de alimentación utilizando volcadores de caña con capacidad de 30 toneladas métricas de caña por jaula, regularmente cada tractocamión transporta la carga en full (2 jaulas), ver Imagen 35.



**Imagen 35. Recepción de caña (Batey)**

Las mesas de caña están habilitadas con un proceso de limpieza en seco para evitar utilizar agua para su lavado, este proceso sirve para eliminar el exceso de tierra, sólidos y materia extraña que adhiere y llega con la caña cosechada desde el campo durante las operaciones cosecha y alce de caña.

### **2) Extracción (o Molienda)**

La caña ingresa al conductor principal para tener un proceso de preparación que consiste en trozar y desfibrar la caña por medio de troceadoras, picadoras y desfibradoras con velocidad variable, para que la caña esté en condiciones de molienda y facilitar la extracción del jugo en el tándem de molinos.



Este es un proceso continuo que actualmente se realiza en seis molinos con cuatro mazas que forman el tándem. El Jugo extraído va hacia el proceso de elaboración y los jugos pobres de los molinos posteriores se regresan nuevamente al proceso de extracción (comúnmente llamado proceso de maceración) y en el último molino se aplica agua caliente para aumentar la extracción, ver Imagen 36.



**Imagen 36. Extracción de jugo de caña y obtención de bagazo**

El bagazo (biomasa) que se obtiene de la caña y se separa durante la extracción del jugo es un subproducto o residuo industrial que se transporta hacia el sistema de calderas para usarlo como combustible. El sobrante de bagazo se reserva para cubrir paros de emergencia o arranques del ingenio, también es utilizado para generación térmica y eléctrica fuera de zafra.

### **3) Clarificación**

El jugo proveniente de los molinos pasa por calentadores para elevar su temperatura. Luego pasa por la torre de sulfatación para bajar el PH del jugo para producir azúcar estándar únicamente. En esta etapa se utiliza azufre como agente decolorante; luego mediante la lechada de cal para neutralizar el jugo. El calentamiento del jugo se realiza en tres etapas; la primera por vapor vegetal; la segunda por vapor con mayor temperatura y la última con vapor de mayor presión para rectificación del jugo en forma automática.

Con el proceso anterior se logra que el jugo, al ser liberado a presión atmosférica, sufra una pequeña evaporación en el tanque flash evitando que los flóculos floten o decanten con lentitud por la presencia de burbujas atrapadas en el interior.

El jugo es alimentado a los clarificadores a baja velocidad para permitir la concentración de lodos y que pueden ser extraídos por gravedad en un clarificador, y posteriormente se utilizan coladores vibratorios con malla para atrapar y eliminar el bagacillo y evitar que llegue al producto final.

Los filtros de cachaza son parte indispensable del proceso, pues sin ellos, la pérdida de sacarosa en la cachaza sería significativa. La cachaza es otro subproducto o residuo industrial que se obtiene del proceso de elaboración de azúcar.

#### 4) Evaporación.

La operación del sistema de evaporación en la planta es cuádruple efecto para la línea de crudo. La operación es relativamente sencilla debido a que se fijan las condiciones de entrada, salida, nivel de cada evaporador y extracción de vapores vegetales hacia el exterior, ver Imagen 37.



Imagen 37. Evaporación de azúcar (Vasos evaporadores)

La evaporación se realiza en evaporadores en los cuales el vapor y el jugo se encuentran en cámaras separadas que fluyen en el mismo sentido, en este proceso se elimina el contenido de agua en el jugo, posteriormente el jugo pasa de un evaporador a otro con bombas denominadas “de transferencia”. El control global de un evaporador se logra con la estabilización de cinco factores:

- La concentración del producto final
- La presión absoluta en el último cuerpo
- La alimentación de vapor y jugo al primer evaporador
- Remoción de condensados y gases incondensables
- El control de incrustación en cada evaporador

## 5) Cristalización

La cristalización o crecimiento de la sacarosa que contiene el jarabe se lleva a cabo en tachos al vacío es aquí donde se forma el grano de cristal de azúcar. Estos cocimientos, según su pureza producirán azúcar de diferentes calidades. Este es un proceso demorado que industrialmente se acelera introduciendo al tacho unos granos microscópicos de azúcar, denominados semillas, ver Imagen 38.



**Imagen 38. Cristalización de Azúcar (Tachos)**

La experiencia del personal operativo debe juzgar el punto exacto del cocimiento, para la obtención de un buen producto.

## 6) Centrifugación (o Separación)

Los cristales del azúcar se separan de la miel líquida e incristalizable de tipo residual que es resultado de la separación en la centrifugas. Estos equipos son cilíndricos que giran a gran velocidad. La miel pasa a través de las telas de metal, los cristales quedan atrapados dentro de las centrifugas y luego se lavan con agua.

Las mieles vuelven a los tachos para agotar la posibilidad de recuperar cristales de azúcar contenidos en la miel final incristalizable o bien la miel final se vende para ser utilizada como materia prima para la producción de alcohol hidratado (potable) o anhidro (etanol carburante) en las destilerías. Es en las centrifugas donde el azúcar toma su nombre para pasar al proceso de secado y enfriado, ver Imagen 39.



**Imagen 39. Centrifugas de Azúcar**

La miel final es otro subproducto o residuo industrial que se obtiene del proceso de elaboración de azúcar

#### **7) Secado**

En el proceso de centrifugado se utiliza agua de condensado para lavar el azúcar, lo cual da como resultado humedades entre 0.3 % y 0.6%, por lo que es necesario pasarla por un proceso de secado para alcanzar niveles entre 0.2% en el azúcar.

#### **8) Envase y envase**

El azúcar estándar producida en el ingenio para el mercado nacional tiene dos formas de envase, la del mercado mayorista en presentaciones de 50 kg por saco y para el mercado minorista en presentaciones de 0.5, 1 y 2 kilos, una vez envasada se almacena para su posterior venta.

La venta de azúcar para el mercado de exportación requiere de un envasado especial en presentaciones de 1,500 kilos por súpersaco. En las bodegas o directamente de la línea de envase se carga en tractocamiones con caja seca, en plana o en contenedores, según la presentación del envase de azúcar para dirigirse al cliente final, mercado de abastos o puerto de embarque.

#### **9) Calderas**

El bagazo que es subproducto del proceso de extracción del jugo, se envía al área de calderas donde se quema en los hornos de las calderas acuotubulares de alta presión con lecho fluidizado, para calentar el agua que fluye dentro de las tuberías de la caldera y así producir vapor de alta presión

para ser enviado a todas las turbinas que mueven las picadoras, las turbinas de los molinos, los ventiladores de las calderas y los turbogeneradores para generación de energía eléctrica en la planta eléctrica, ver Imagen 40.



**Imagen 40. Calderas de vapor de alta presión**

El vapor de alta presión después de que hace su trabajo en las turbinas se vuelve vapor de baja presión y se emplea en los procesos de calentamiento, evaporación, cristalización y cocimiento para producir azúcar y alcohol. Con la combustión del bagazo se produce energía térmica en forma de vapor de alta presión.

### **10) Planta Eléctrica**

En los turbogeneradores instalados en la planta eléctrica se utiliza el vapor de alta presión producido por las calderas acuatubulares para mover los alabes de las turbinas de vapor de contrapresión o condensación con extracción mínima, y que a su vez mueven los generadores eléctricos que producen la energía eléctrica. Esta energía eléctrica producida es con la que trabaja todo el complejo industrial, motores, maquinaria, administración, bombas del río y la zona habitacional del ingenio durante la Zafra. El vapor proveniente de las calderas sirve para producir energía eléctrica en los turbogeneradores eléctricos, ver Imagen 41.





**Imagen 41. Planta eléctrica (Turbogeneradores de vapor para producir energía eléctrica)**

El vapor y la energía eléctrica también son subproductos que se obtienen del proceso de elaboración de azúcar

### 1.2.3. Empresas Agrícolas.

La función principal de las empresas agrícolas es otorgar suministro de caña a las unidades industriales de procesamiento que producen el azúcar, para mejorar el desempeño de la cadena de suministro, y su función principal es desarrollar las operaciones de Campo en su totalidad.

El objetivo de estas empresas agrícolas es aumentar la competitividad y rentabilidad en la cadena de valor de producción de azúcar. Cuentan con más de 730 colaboradores directos en 3 empresas agrícolas durante la zafra y su operación se refiere a cultivar, cosechar y transportar caña de azúcar como materia prima al ingenio de su localidad.

Existen tres empresas agrícolas en el grupo corporativo, Fomento Azucarero S.P.R. de R.L. de C.V. ubicada en Chiapas relacionada con el cultivo, cosecha y transporte de caña de azúcar, cuya finalidad es el suministro de caña de azúcar al ingenio de Huixtla para garantizar y complementar su abastecimiento, Cañaverales Mexicanos S.P.R. de R.L. de C.V. ubicada en Michoacán para suministrar caña al Ingenio Santa Clara y Excelencia Cañera S.P.R. de R.L. de C.V. ubicada en Veracruz para garantizar el suministro al Ingenio San Pedro.

La mecanización agrícola de alta eficiencia para cultivo y cosecha de caña de azúcar, permiten reducir costos de producción y aumentan la rentabilidad de la unidad estratégica de negocio.

Las operaciones agrícolas de cosecha mecanizada de las tres empresas suman más de 374,000 toneladas de caña, con un rendimiento promedio superior a 105 toneladas de caña de azúcar por hectárea cosechada, es decir 40.9 toneladas sobre la Media Nacional que es de 64.1 Toneladas.

La mecanización agrícola de alta eficiencia es un sistema de organización económica con un alto grado de administración de recursos que está orientado a reducir costos por el aumento y aprovechamiento de la capacidad instalada de cultivo y cosecha de caña.

## ANEXO 2. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LOS PROCESOS DE TRANSFORMACION DE BIOENERGÍA

### 2.1. Modelación de las distribuciones de probabilidad de las variables de entrada.

En esta sección se encuentran el comportamiento de las distribuciones de probabilidad utilizadas en el modelo de riesgo donde intervienen variables entrada y variables con eventos inciertos, a lo largo de las siete etapas de la metodología de las cadenas de valor del Capítulo 5.

Para la modelación de la incertidumbre de los parámetros en eventos inciertos se usa el simulador de riesgo @Risk a partir del conocimiento del experto o de conjuntos de datos históricos.

Para aquellas funciones que no hayan sido de tipo triangular se validaron con el módulo “Distribution Fitting” utilizando pruebas de bondad de ajuste con el estadístico de Chi-Cuadrada a partir de conjuntos de datos históricos, y se verificaron con la pruebas Anderson-Darling y Kolgomorov-Smirnov.

#### 2.1.1. Pollinaza para Combustión

Se utiliza la combustión porque es la tecnología que es más rentable para la empresa se decide combustionar toda la producción de pollinaza, para ello existen otras variables de análisis.

Las distribuciones utilizadas en las variables de entrada del modelo de simulación Montecarlo como son producción de pollos y de pollinaza, así como el comportamiento de la humedad a distintos niveles, estos se encuentran en la Tabla 29 y Tabla 30. En la sección 2.2.2 las ecuaciones matemáticas donde se aplican estas distribuciones de probabilidad.

**Tabla 29. Producción de pollinaza y pollo de engorde**

<b>Variable</b>	<b>Distribución</b>	<b>Unidad</b>
Pollos de engorde en el ciclo	Normal(12141471.0410959,100)	Pollos/ciclo
Rendimiento de pollinaza por pollo de engorde	Normal(1.550,0.001)	Kilos pollinaza/pollo



**Tabla 30. Poder calorífico y contenido de humedad de la pollinaza**

<b>Variable</b>	<b>Distribución</b>	<b>Unidad</b>
Poder calorífico de pollinaza base seca (8% de contenido humedad) P.C.S.	Triang (3274.3, 3281.5, 3295.6)	kcal/kg
40% humedad en pollinaza	Triang (0.38, 0.4, 0.41)	% contenido humedad
35% humedad en pollinaza	Triang (0.33, 0.35, 0.36)	% contenido humedad
30% humedad en pollinaza	Triang (0.28, 0.30, 0.31)	% contenido humedad
25% humedad en pollinaza	Triang (0.23, 0.25, 0.26)	% contenido humedad

La variable que afecta el comportamiento de la calidad en la pollinaza es el contenido de humedad en la pollinaza modificando la producción de vapor en las calderas, al estar más seca la pollinaza se utiliza menos pollinaza para producir la misma cantidad de vapor o se utiliza la misma pollinaza para producir más vapor, ver Tabla 31.

**Tabla 31. Producción de vapor en calderas y consumo de vapor del turbogenerador**

<b>Variable</b>	<b>Distribución</b>	<b>Unidad</b>
Producción de vapor en caldera al 40% hum.	Triang (1.800, 1.897, 1.999)	kg vapor / kg pollinaza
Producción de vapor en caldera al 35% hum.	Triang (2.000, 2.113, 2.199)	kg vapor / kg pollinaza
Producción de vapor en caldera al 30% hum.	Triang (2.150, 2.329, 2.399)	kg vapor / kg pollinaza
Producción de vapor en caldera al 25% hum.	Triang (2.350, 2.546, 2.699)	kg vapor / kg pollinaza
Consumo de vapor en turbogenerador	Triang (3.900, 4.199, 4.399)	kg vapor / kWh

Los equipos de generación de energía tienen diferentes eficiencias de operación que están relacionadas a las pérdidas o mermas de energía, ver Tabla 32.

**Tabla 32. Eficiencia en los equipos de generación**

<b>Variable</b>	<b>Distribución</b>	<b>Unidad</b>
Eficiencia de generación de caldera	Triang (0.82, 0.83, 0.84)	% eficiencia
Eficiencia de generación del turbogenerador	Triang (0.900, 0.920, 0.95)	% eficiencia
Tiempo perdido por mantenimiento	Triang (0.0800, 0.0822, 0.0899)	% tiempo perdido
Energía excedente para venta	Triang (0.89, 0.90, 0.91)	% de Energía para venta
Producción de cenizas	Triang (0.130, 0.159, 0.184)	% de cenizas/t pollinaza

Para evaluar el flujo de efectivo del sistema de generación puesto en marcha se consideran los gastos de operación, los costos de la materia prima y los precios de venta de la energía, ver Tabla 33.

**Tabla 33. Precios y costos derivados de la combustión de pollinaza**

<b>Variable</b>	<b>Distribución</b>	<b>Unidad</b>
Precio kWh	Triang (1.35, 1.380, 1.410)	pesos/kWh
Precio MWh	Triang (1350, 1380, 1410)	pesos/MWh
Costo de porteo	Triang (33.5, 34.03, 35)	pesos/MWh
Costo de administración y conexos	Triang (109000, 110000, 111000)	pesos/mes
Precio tonelada de cenizas	Triang (1700, 1750, 1800)	pesos/t ceniza
Precio del flete por tonelada pollinaza	Triang (90, 100, 110)	pesos/km-t pollinaza
Tipo de cambio del dólar	Triang(13.25, 13.4, 13.5)	Pesos/dólar
Precio tonelada de pollinaza sin flete (L.A.B.)	Normal (348.96, 1.923)	pesos/t pollinaza

\* L.A.B. Libre a bordo

En la Figura 36 se presenta el comportamiento promedio del tipo cambio del dólar a pesos mexicanos de los ultimo 22 meses, en él se parecía que va en ascenso. Este variable es importante medirla porque afecta directamente el precio de comercialización de la energía eléctrica y el precio de la tonelada de pollinaza.

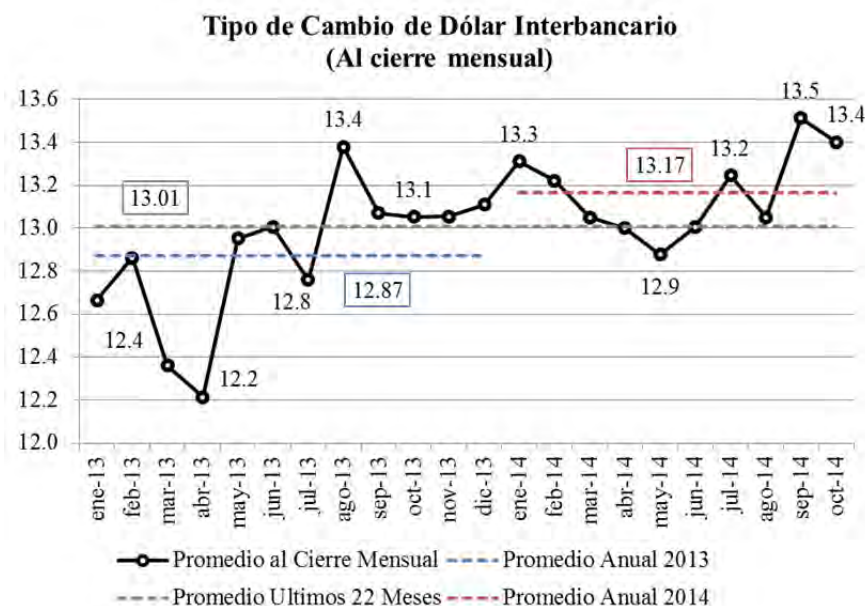


Figura 36. Tipo de cambio de dólar americano a pesos mexicanos

En la Figura 37 se muestra el comportamiento del precio del kilowatt-hora de los últimos 24 meses en dicha gráfica se aprecian el precio de la tarifa intermedia y el precio CTCP.

El precio de la tarifa intermedia por kWh es la línea más horizontal y es precio de venta al que estaríamos considerando vender la energía entre las empresas que forman la red de valor este precio no incluye el costo por penalizaciones llamado demanda facturable y la línea con el comportamiento más atípico en la que se muestra un descenso en el precio de venta es el precio al que nos compraría la comisión federal de electricidad (CFE) este costo se llama costo total a corto plazo (CTCP) el cual es el costo de generación eléctrica que tiene CFE entre las plantas de todos los tipos que estar interconectadas al sistema de transmisión y generación de energía en México.

La tendencia de la Reforma Energética 2014 en México está orientada a disminuir el costo del kilowatt – hora en el mediano plazo para ubicarse entre los 70 y 80 centavos de dólar para su comercialización a nivel industrial, este valor está afectado por el tipo de cambio del dólar americano.

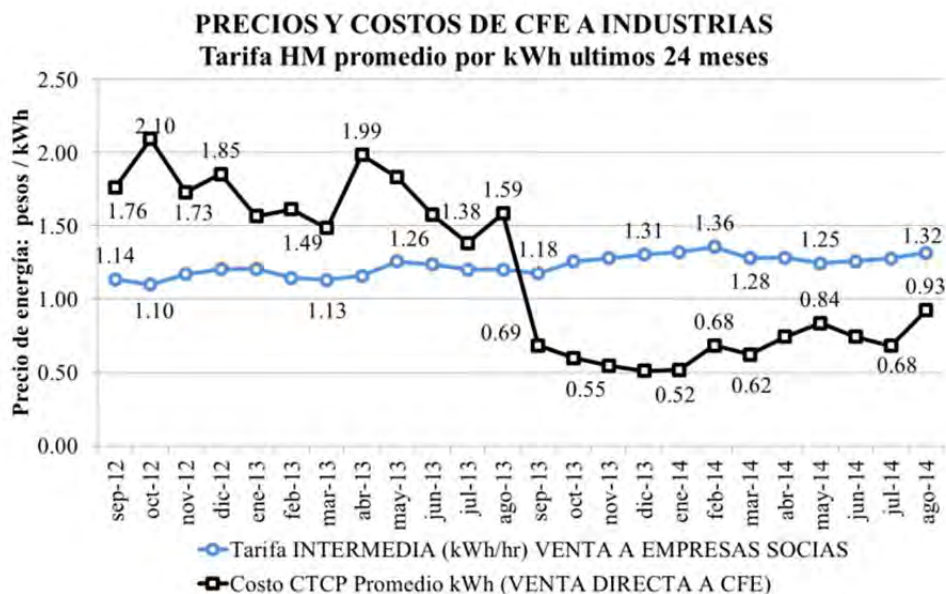


Figura 37. Precios y costos de energía eléctrica a industrias

En la Figura 38 se muestra el comportamiento del precio de venta del kilowatt – hora de los últimos 10 años considerando las tarifas en baja, intermedia, punta, demanda facturable y CTCP en el que tuvo tres años precios atractivos para ser vendido a la CFE, ahora los precios son muy bajos.

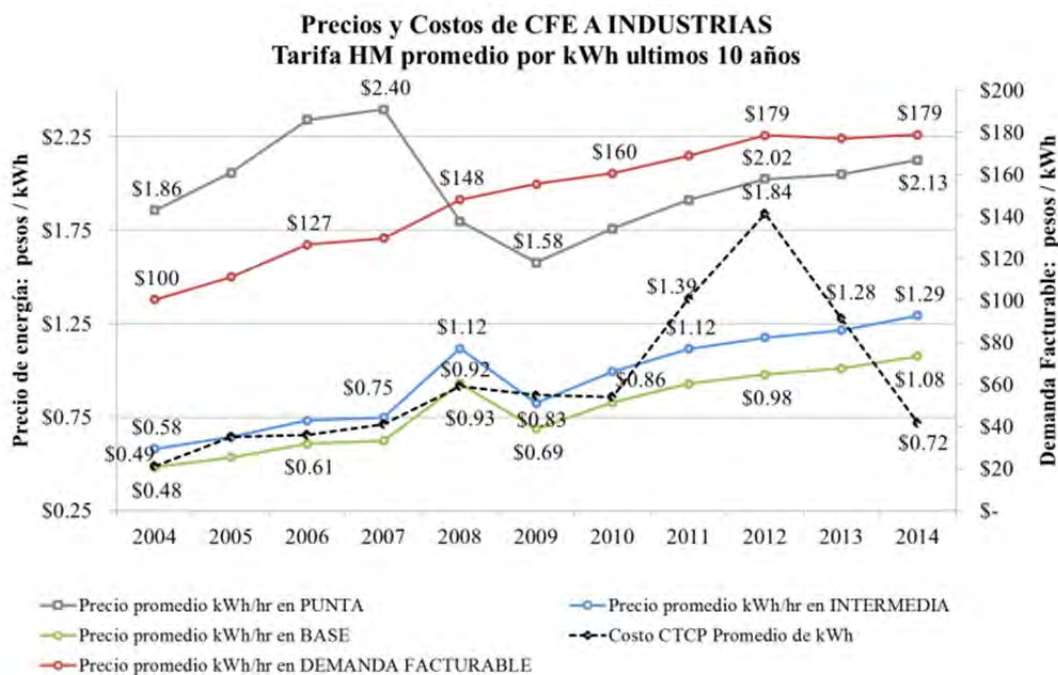


Figura 38. Evolución del precio y costo de la energía eléctrica

### 2.1.1.1. Alternativas energéticas para el uso de la pollinaza

Antes de la decisión de utilizar la pollinaza para ser combustionada se realizó un análisis de diversas tecnologías energéticas para determinar cuál es más rentable utilizar, para ese análisis se utilizan las producciones de pollinaza por tipo, ver Tabla 34. En la sección 2.2.2.1 las ecuaciones matemáticas donde se aplican estas distribuciones de probabilidad.

**Tabla 34. Producción de pollinaza por tipo**

Variable	Forma	Unidad
Pollinaza seca disponible	Gamma(6.33, 3514.8)	Toneladas/año
Pollinaza semi-húmeda	Pearson5(83.34, 6835323)	Toneladas/año
Pollinaza húmeda	Gamma(14.7, 2176.3)	Toneladas/año
% de mejora de calidad de Semi-húmeda a Seca	Triang(0.4, 0.5, 0.6)	% de Mejora
% de mejora de calidad de húmeda a Semi-húmeda	Triang(0.15, 0.2, 0.25)	% de Mejora

Se deben determinar los precios de venta de los diferentes tipos de pollinaza, y el precio por del combustóleo para realizar una comparación de costos por unidades energéticas, ver Tabla 35.

**Tabla 35. Precio de la pollinaza por tipo**

Variable	Forma	Unidad
Precio de pollinaza seca	Logistic(659.24, 21.84)	Pesos/tonelada
Precio de pollinaza semi-húmeda	Loglogistic(-338.07, 826.35, 25.30)	Pesos/tonelada
Precio de pollinaza húmeda	BetaGeneral(5.36, 8.09, 157.82, 417.02)	Pesos/tonelada
Precio del Combustóleo	Normal(9.26, 1.1)	Pesos/litro
Tipo de cambio del dólar	Normal(12.75, 0.86)	Pesos/dólar
Tasa de inflación anual	Normal(0.0356, 0.0034)	% de inflación anual

Se estima los gastos de operación relacionados a cada tecnología, ver Tabla 36, que impactan en el costo de producción.

**Tabla 36. Gastos de operación de pollinaza**

<b>Variable</b>	<b>Forma</b>	<b>Unidad</b>
Gastos de combustión de pollinaza seca	Triang(76.5, 194.7, 261)	Pesos/tonelada
Gastos de digestión de pollinaza húmeda	Triang(22.2, 25.72, 34,4)	Pesos/tonelada
Gastos de co-digestión de pollinaza húmeda con lodos residuales	Triang(22.2, 25.72, 34,4)	Pesos/tonelada

Se estiman los índices de rendimiento energético de biogás considerando una producción industrial, ver Tabla 37.

**Tabla 37. Rendimiento energético de Biogás.**

<b>Variable</b>	<b>Forma</b>	<b>Unidad</b>
Rendimiento de biogás a partir de lodo residual	Triang(0.95, 1.1, 1.5)	m <sup>3</sup> por kg de STV <sub>rem</sub>
eficiencia de remoción del digestor	Triang(0.55, 0.57, 0.60)	% de Eficiencia de remoción
Rendimiento de biogás a partir de pollinaza húmeda	Triang(0.4, 0.45, 0.5)	m <sup>3</sup> por kg de STV <sub>rem</sub>
rendimiento eléctrico por tonelada de pollinaza seca combustionada	Triang(620, 700, 780).	kWh/tonelada pollinaza seca

### 2.1.2. Lodos residuales para Digestión anaeróbica.

La cadena de valor avícola en la unidad estratégica de negocio “planta procesadora de aves” tiene un proceso automatizado y otras secciones semi-automatizadas con una velocidad de procesamiento que puede resultar complicado evaluar por la diversidad de tipos de pollos procesados.

En la Tabla 38 se presenta el comportamiento de las variables que afectan al lote de producción diaria, y el rendimiento de carne en canal de pollo procesado. En la sección 2.2.3 las ecuaciones matemáticas donde se aplican estas distribuciones de probabilidad.

**Tabla 38. Incertidumbre de la cantidad y tipo de proceso de pollo de engorde**

Variable	Distribución de probabilidad	Descripción
Rango de producción 1 (pequeño)	Triang (7593,7731,7868))	Pollos al día
Rango de producción 2 (Grande)	Logistic (73330.2,6033.3,Truncate(42362,94614))	Pollos al día
Asignación de la Decisión	Discrete (tipo_de_proceso,Valor_de_Asignación)	Tipo de proceso
Peso de pollo seco natural	Logistic (3.086,0.089,Truncate(2.256,3.414))	Kilogramos por pollo
Peso de pollo hidratado natural	Loglogistic(1.496,0.975,12.48,Truncate(2.0447,3.161))	Kilogramos por pollo
Peso de pollo hidratado pintado	Loglogistic(1.659,0.274,5.389,Truncate(1.742,2.374))	Kilogramos por pollo
Peso de pollo kosher	Loglogistic(2.744,0.323,4.639,Truncate(2.374,3.514))	Kilogramos por pollo

Las mermas de pollo de engorde antes del procesamiento, se utilizan para estimar adecuadamente los residuos que se obtienen del procesamiento y que no entran al proceso, ver Tabla 39.

**Tabla 39. Mermas de pollo de engorde**

Variable	Distribución de probabilidad	Descripción
Merma ahogado seco natural	Invgauss(0.00639,0.0362,Shift(-0.002),Truncate(0.002,0.0152))	Pollos/día
Merma ahogado hidratado natural	Loglogistic(-0.001,0.0038,3.6,Truncate(0,0.0147))	Pollos/día

Merma ahogado hidratado pintado	Loglogistic(-0.000558,0.008,3.66,Truncate(0.0005,0.06))	Pollos/día
Merma ahogado kosher	Logistic(0.013,0.0026,Truncate(0.0028,0.017))	Pollos/día
Merma de pollo remolacho seco natural	Loglogistic(-0.00029,0.0069,2.04,Truncate(0,0.25))	Pollos/día
Merma de pollo remolacho hidratado natural	Loglogistic(-0.0016,0.006,3.45,Truncate(0,0.02))	Pollos/día
Merma de pollo remolacho hidratado pintado	Loglogistic(-0.0002,0.0589,3.49,Truncate(0.0066,0.35))	Pollos/día
Merma de pollo remolacho kosher	Normal(0.0358,0.017,Truncate(0.011,0.0645))	pollos/día

La velocidad de los ganchos marca el ritmo del procesamiento de aves, y la efectividad del proceso, esta variable es fundamental para estimar los índices de producción en la PPA, ver Tabla 40.

**Tabla 40. Velocidad de ganchos vacíos**

Variable	Distribución de probabilidad	Descripción
Seco natural	Normal(1885.321,11.716)	Velocidad Ganchos vacíos por hora
Hidratado natural	Gamma(17.39,7.14,Shift(68.01),TruncateP(0.025,0.975))	Velocidad Ganchos vacíos por hora
Hidratado pintado	Pearson5(91.42,24150,Shift(-62.68),TruncateP(0.025,0.975))	Velocidad Ganchos vacíos por hora
Kosher	Weibull(4.281,95.7,Shift(1046.39))	Velocidad Ganchos vacíos por hora

El comportamiento de operación de la planta de digestión marca el rendimiento de producción de biogás para ser utilizado para su combustión y generar energía eléctrica, ver Tabla 41.



**Tabla 41. Rendimiento de energético de lodos residuales**

<b>Variable</b>	<b>Forma</b>	<b>Unidad</b>
Contenido orgánico en lodos residuales	Triang(0.15, 0.175, 0.20)	% Residuo orgánico
Rendimiento de biogás	Triang(1, 1.2, 1.56)	litro biogás/g STV Rem
Rendimiento de biogás	Triang(1, 1.2, 1.56)	m3 biogás/kg STV Rem
Solidos totales	Triang(2.4%,2.5%,2.6%)	% ST
Solidos totales volátiles	Triang(75%,80%,85%)	% STV
Eficiencia de remoción	Triang(55%,57.5%,60%)	% eficiencia de remoción
Concentración de metano en biogás	Triang (70%,75%,80%)	% CH <sub>4</sub> /biogás
Presencia de Cloro	Triang (15,20,30))	ppm
Inhibidor Cloro	Triang(0.5%,1%,1.5%)	%/litro
Inhibidor Colorante	Triang(25%,30%,35%)	%/litro

El poder calorífico del biogás producido está relacionado con el rendimiento eléctrico del motogenerador, ver Tabla 42.

**Tabla 42. Poder calorífico del biogás**

<b>Variable</b>	<b>Forma</b>	<b>Unidad</b>
Poder calorífico del biogás	Triang(27500,27589.4,27700)	BTU/m <sup>3</sup> biogás al 75% de CH <sub>4</sub>
Rendimiento de biofertilizante liquido	Triang(98.5%,99%,99.5%)	% de biosólido/lodo residual
Poder calorífico del combustóleo	Triang(40550,40600,40650)	BTU/kg de combustóleo
Poder calorífico de biogás al 75% de CH <sub>4</sub>	Triang(17000,17188.5001946,17400)	BTU/kg de biogás al 75% de CH <sub>4</sub>
Generación de Biogás	Triang(70%,75%,80%)	% de metano en biogás
Capacidad de generación eléctrica del motogenerador	Triang(28,30,31)	kW por hora

Consumo de biogás del motogenerador	Triang(15,16,16.5)	m <sup>3</sup> biogás/hora
-------------------------------------	--------------------	----------------------------

Se estiman los costos de los insumos, los precios de los combustibles, de la energía del biogás y del biofertilizantes para realizar las corridas financieras del proyecto, ver Tabla 43.

**Tabla 43. Precios de recursos utilizados y producidos en la planta procesadora**

<b>Variable</b>	<b>Forma</b>	<b>Unidad</b>
Precio de combustóleo pesado (8 ene 2013)	Triang(7700,7895.23,8100)	Pesos/m <sup>3</sup> de combustóleo
Precio M3 de biofertilizante liquido	Triang(90,100,120)	Pesos/m <sup>3</sup> de biofertilizante
Costo del m <sup>3</sup> de agua industrial	Triang(1.5,1.55,1.6)	Pesos/m <sup>3</sup> de agua
Precio del kWh	Triang(1.35,1.38,1.41)	Pesos/kWh
Tipo de cambio del dólar	Triang(13.25,13.4,13.5)	Pesos/dólar

### 2.1.3. Residuos agrícolas de cosecha y bagazo para combustión

El peso de los fardos de RAC recolectados en campo depende del diámetro de RAC y de la efectividad de formación de la enfardadora, por este motivo se utilizan los pesos registrados de las muestras se reportan en la Tabla 44. En la sección 2.2.4 las ecuaciones matemáticas donde se aplican estas distribuciones de probabilidad.

**Tabla 44. Peso del fardo del RAC y disponibilidad**

<b>Variable</b>	<b>Forma</b>	<b>Unidad</b>
Peso del fardo de 1m diam.	Triang(145,150,155)	kg/fardo de 1m
Peso del fardo de 1.25m diam.	Triang(198,200,202)	kg/fardo de 1.25m
Peso del fardo de 1.5m diam.	Triang(295,300,305)	kg/fardo de 1.5m
Residuos de caña	Triang(25%,28%,30%)	% residuos de la caña

En la Tabla 45 se reporta el porcentaje de recolección respecto al volumen de caña cosechada para cada una de las cadenas de valor cañero – azucarera.

**Tabla 45. Porciento de residuos agrícolas de cosecha en campo**

<b>Variable</b>	<b>Forma</b>	<b>Unidad</b>
Residuos RAC que se quedan en campo en Huixtla	Triang(12%,13.352%,14.7%)	% residuos disponibles en campo
Residuos RAC que se quedan en campo en San Pedro	Triang(11%,11.55%,12.12%)	% residuos disponibles en campo
Residuos RAC que se quedan en campo en Santa Clara	Triang(10%,11.55%,13%)	% residuos disponibles en campo
Residuos RAC que llegan al ingenio con la caña cosechada en Huixtla, San Pedro y Santa Clara	Triang(4%,5%,6%)	% residuos que llega al ingenio
Residuos RAC que son recolectados en Huixtla	Triang(9%,10.10%,11.2%)	% residuos Recolectados
Residuos RAC que son recolectados en San Pedro	Triang(9%,10.10%,11.21%)	% residuos Recolectados
Residuos RAC que son recolectados en Santa Clara	Triang(8%,8.59%,9.18%)	% residuos Recolectados

A continuación se muestran en la Tabla 46 los porcentajes de eficiencia de operación de los equipos de generación de vapor y de generación eléctrica, así como los porcentajes de humedad registrada para el bagazo y el RAC.

**Tabla 46. Porcentaje de eficiencia de los equipos de generación y humedad en la biomasa**

<b>Variable</b>	<b>Forma</b>	<b>Unidad</b>
Poder calorífico medio del RAC a 8% de humedad	Triang(3936.4, 3967.4, 4020.8)	kcal/kg
50% humedad del bagazo	Triang(0.495,0.508,0.52)	% contenido humedad
20% humedad del RAC	Triang(0.15,0.2,0.25)	% contenido humedad
Eficiencia de caldera acuotubular de alta presión	Triang(82.5%,83%,83.5%)	% Eficiencia
Índice de seguridad de operación de la caldera	Triang(34%,35%,36%)	% de seguridad
Eficiencia de turbogenerador de condensación con extracción	Triang(90%, 92%, 95%)	% Eficiencia
% de Extracción del turbo en Zafra	Triang(75%, 80%, 85%)	% de Extracción del turbo condensante

Se presenta el escenario más probable de producción y cosecha de caña para cada de valor al momento de implementarse el sistema de cogeneración, ver la Tabla 47

**Tabla 47. Producción de toneladas de caña más probable**

<b>Variable</b>	<b>Forma</b>	<b>Unidad</b>
Producción de caña más probable para el proyecto en Huixtla	Triang(1450000,1500000,1550000)	Toneladas de caña por zafra
Producción de caña más probable para el proyecto en San Pedro	Triang(1550000,1600000,1650000)	Toneladas de caña por zafra
Producción de caña más probable para el proyecto en Santa Clara	Triang(740000,750000,760000)	Toneladas de caña por zafra

En la Tabla 48 se muestran el periodo más probable de cogeneración y generación de vapor y energía eléctrica usando bagazo y residuos agrícolas de cosecha en zafra y fuera de zafra.

**Tabla 48. Días de operación de cogeneración en zafra y no zafra**

<b>Variable</b>	<b>Forma</b>	<b>Unidad</b>
Días de operación en zafra con Bagazo en Huixtla, San Pedro y Santa Clara	Triang(155,160,165)	Días de zafra (con bagazo)
Días de operación en No zafra con Bagazo en Huixtla	Triang(27,29.82,32)	Días No zafra (con bagazo)
Días de operación en No zafra con RAC en Huixtla	Triang(43,45.99,48)	Días No zafra (con RAC)
Días de operación en No zafra con Bagazo en San Pedro	Triang(30,32.82,35.65)	Días No zafra (con bagazo)
Días de operación en No zafra con RAC en San Pedro	Triang(40,45.69,50.8)	Días No zafra (con RAC)
Días de operación en No zafra con Bagazo en Santa Clara	Triang(30,32.82,35.65)	Días No zafra (con bagazo)
Días de operación en No zafra con RAC en Santa Clara	Triang(60,70.77,80)	Días No zafra (con RAC)

La cantidad de bagazo que se obtiene de la caña está condicionado por la calidad de la caña, el tiempo de deterioro después de haberse cosechado la caña, de la variedad de la caña y por la eficiencia de la extracción de fibra en los molinos, ver Tabla 49.

**Tabla 49. Utilización de biomasa en zafra**

<b>Variable</b>	<b>Forma</b>	<b>Unidad</b>
Tiempo perdido de operación del sistema de cogeneración	Triang(8%,8.22%,9%)	% tiempo perdido
Bagazo en caña en Huixtla	Triang(26%,26.8%,27.5%)	% de bagazo en Caña
Bagazo en caña en San Pedro	Triang(28.5%,29.3%,30.5%)	% de bagazo en Caña
Bagazo en caña en Santa Clara	Triang(29.3%,29.8%,30.5%)	% de bagazo en Caña

El bagazo obtenido en los molinos durante la extracción del jugo de caña se utiliza para dos propósitos, para genera el vapor que sirve para las turbinas de los molinos y para generar el vapor que utilizan los turbogeneradores eléctricos para producir electricidad, ver Tabla 51.

**Tabla 50. Consumo de biomasa en calderas para producción de vapor**

Variable	Forma	Unidad
Bagazo para generar vapor y utilizarlo en turbogeneradores	Triang(52%,52.42%,52.848%)	% de bagazo
Bagazo para generar vapor y utilizarlo en molinos	100%-Triang(52%,52.42%,52.848%)	% de bagazo
Bagazo sobrante (excedente) para ser utilizado en no zafra	Triang(7%,7.33%,7.68%)	% de Bagazo

Los índices del balance de vapor en la planta de cogeneración dependen en gran medida de la calidad de generación de vapor y eficiencia en la caldera así como de turbogeneradores de bajo consumo de vapor, este balance se muestra en la Tabla 51.

**Tabla 51. Índices de rendimiento de producción y consumo de vapor**

Variable	Forma	Unidad
Producción de vapor en zafra con Bagazo	Triang(2.1,2.2,2.3)	kg de vapor/kg de bagazo
Producción de vapor en no zafra con Bagazo	Triang(1.8,1.9,2)	kg de vapor/kg de bagazo
Producción de vapor en no zafra con RAC	Triang(3.5,3.8,4.1)	kg de vapor/kg de RAC
Consumo de vapor en Zafra con Bagazo	Triang(5.5,6.0,6.5)	kg de vapor/kg de Bagazo
Consumo de vapor en No zafra con Bagazo y RAC	Triang(3.8,4.0,4.2)	kg de vapor/kg de Bagazo y RAC

El balance entre el consumo eléctrico y el sobrante de energía para su venta como excedentes eléctricos depende en gran medida del vapor utilizado en el proceso y el porcentaje de autoconsumo eléctrico utilizado para mover los equipos eléctricos al interior de la planta, ver Tabla 52.

**Tabla 52. Autoconsumo y excedentes eléctricos en zafra y no zafra.**

<b>Variable</b>	<b>Forma</b>	<b>Unidad</b>
Perdida de Vapor	Triang(0.0%,2.018%,4.05%)	% perdida de vapor
Autoconsumo eléctrico en Zafra	Triang(45%,46.51%,48.03%)	% de Autoconsumo en Zafra
Excedentes eléctricos en zafra	100%-Triang(45%,46.51%,48.03%)	% de Excedentes para venta en Zafra
Autoconsumo eléctrico en No Zafra	Triang(9.75%,10%,10.25%)	% de Autoconsumo en No Zafra
Excedentes eléctricos en No Zafra	100%-Triang(9.75%,10%,10.25%)	% de Excedentes para venta en No Zafra

Para determinar el flujo económico del modelo de negocio de la cogeneración en cada cadena de valor es fijar los precios de venta de la energía eléctrica excedente que se comercializará en la red y los costos y gastos relacionados a la operación del sistema de cogeneración, en la Tabla 53 se presentan estos valores.

**Tabla 53. Precios y costos de los recursos relacionados con la cogeneración.**

<b>Variable</b>	<b>Forma</b>	<b>Unidad</b>
Precio de kWh	Triang(1350,1380,1410)	Pesos/MWh
Costo Porteo de Energía Renov.	Triang(33.5,34.03,35)	Pesos/MWh
Costo Serv. Conexos de Energía	Triang(109000,110000,111000)	Pesos/Mes
Precio de Cenizas	Triang(10,15,20)	Pesos/Ton
Costo de RAC	Triang(468.13,505.00,591.11)	Pesos/ton
% medio de cenizas residuales	Triang(7%,7.56%,8.12%)	% de Cenizas
Inversión en dólares por MW instalado	Triang(1900000,2000000,2100000)	Inversión por MW
Tipo de cambio del dólar	Triang(13.25,13.4,13.5)	Pesos/dólar

## 2.2. Modelos matemáticos de las cadenas de valor.

Los modelos de simulación de las cadenas de valor se representan matemáticamente con la finalidad de entender la integración de las operaciones de los procesos de producción de residuos agroindustriales y los procesos de transformación energética que se efectúan en las siete etapas de la metodología de las cadenas de valor del Capítulo 5.

### 2.2.1. Calculo del poder calorífico de la biomasa

Para desarrollar el balance de materia y energía se utilizan las ecuaciones de Mollier y de Regnault para determinar los valores más probables de la entalpía del vapor y de calor latente de vaporización aplicando el poder calorífico resultante de las muestras biomasa, ya sea pollinaza o de residuos agrícolas de cosecha (RAC).

El poder calorífico (P.C.) de la biomasa para combustión es la cantidad de calor que se libera de la combustión de la unidad de peso de la biomasa (Hugot, 1986). Es importante hacer la distinción de dos valores calóricos para este estudio.

Poder calorífico superior (P.C.S.), o valor calorífico bruto es el calor liberado por la combustión de un kg (o lb.) de combustible, tomado a 0°C (32°F) debajo de 760 mm (29.92 in.) de mercurio. El agua presente en el combustible y el agua formada por la combustión del hidrogeno presente en su composición en consecuencia son condensados.

Poder calorífico Inferior (P.C.I.), o poder calorífico neto asume por el contrario que el agua formada por la combustión y el agua que es parte de la constitución del combustible, permanece en estado de vapor.

El P.C.S. es una buena medida teórica de calor disponible del combustible, pero en la práctica industrial el P.C.I. da un índice más preciso del calor prácticamente obtenible, para la evaluación de proyectos energéticos en un escenario conservador se utiliza el P.C.I.

A continuación se determina el poder calorífico inferior de la biomasa a diferentes contenidos de humedad, ya sea pollinaza, residuos agrícolas de cosecha, o bagazo se utiliza la ecuación de calor latente del vapor de Regnault (Faraoni, 2006), ver Ecuación 12.



**Ecuación 12. Calor latente de vaporización de Regnault**

$$h_g = \left[ 606.95 - \left( 0.695 * \left( \frac{T}{1^\circ C} \right) \right) \right] * \left( \frac{1kcal}{kg} \right)$$

La ecuación se aplica restando al P.C.S. el peso del hidrogeno contenido en 1 kg de biomasa, multiplicado por el coeficiente del calor latente de vaporización para una temperatura de 10°C, por ser el calor mínimo que se requiere para evaporar agua, ver Ecuación 13 y Ecuación 14.

**Ecuación 13. Calor latente de vaporización de Regnault a 10 °C**

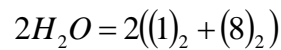
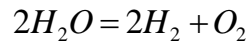
$$h_g = \left[ 606.95 - \left( 0.695 * \left( \frac{10^\circ C}{1^\circ C} \right) \right) \right] * \left( \frac{1kcal}{kg} \right)$$

**Ecuación 14. Coeficiente de calor latente de vaporización a 10 °C**

$$h_g = 600 \frac{kcal}{kg}$$

El valor E es el peso del vapor de agua presente en los gases producidos por la combustión de 1 kg de biomasa (pollinaza, RAC o Bagazo). El peso del agua contenida en el combustible seco es igual a 9 veces el peso del hidrogeno, ver Ecuación 15.

**Ecuación 15. Peso del hidrogeno durante la reacción de combustión**



$$36 = 4 + 32$$

$$\frac{36}{4} = 9H$$

$$E = 9H$$

Para determinar el P.C.I. de la pollinaza que se encuentran en base seca, se aplica la Ecuación 16 en donde el valor de P.C.S. utilizado proviene de las distribución de probabilidad de la Tabla 30, y es utilizado para desarrollar el modelo de simulación Montecarlo para evaluar la rentabilidad de la biomasa utilizada, ya sea pollinaza para combustión con sus cuatro escenario de humedad o residuo agrícola de cosecha de caña en mezcla con bagazo para combustión.

**Ecuación 16. Poder calorífico inferior de la biomasa (kcal/kg)**

$$P.C.I. = P.C.S. - \left[ h_g \left( \frac{9H}{100} + \frac{M}{100} \right) \right]$$

Para determinar el P.C.I. de la biomasa que contiene humedad es necesario tomar en consideración la cantidad de agua presente en ella. Aplicando la Ecuación 17 se logra determinar los diferentes niveles de poder calorífico inferior para diferentes contenidos de humedad en la biomasa utilizando el índice de Regnault.

**Ecuación 17. Poder Calorífico inferior (kcal/kg) de la biomasa con diferente porcentaje (%) de humedad**

$$P.C.I. = \left( P.C.S. * \left( \frac{100-M}{100} \right) \right) - \left[ h_g \left( \left( \left( \frac{9H}{100} \right) \left( \frac{100-M}{100} \right) \right) + \frac{M}{100} \right) \right]$$

H se define como el contenido de hidrogeno presente en la biomasa, y O el oxígeno presente en la biomasa, M es el contenido de humedad, ambos en 1 kg de biomasa, T es la temperatura de vaporización y hg es el coeficiente del calor latente de vaporización del agua expresado en kcal por kg.

La entalpia de vaporización es la energía necesaria para que una unidad de masa del agua se encuentre en equilibrio con su propio vapor a una presión de una atmosfera, para pasar del estado líquido al estado gaseoso.

Para determinar el potencial de energía térmica que puede ser liberada combustionando la biomasa, se requiere determinar la entalpía del vapor generado en la caldera ( $H_{Final}$ ) una presión de 63.3 kg/cm<sup>2</sup> (900 lb/in<sup>2</sup>) con una temperatura de 445°C y la entalpía del agua de alimentación a la caldera ( $H_{Inicial}$ ) a una presión de 75 kg/cm<sup>2</sup> (1,067 lb/in<sup>2</sup>) con una temperatura de 85°C. Ver Ecuación 18.

**Ecuación 18. Salto de entalpía entre el vapor y el agua de alimentación considerando presión y temperatura**

$$\Delta H_{vap} = H_{Final} - H_{Inicial}$$

$$\Delta H_{vap} = \left( 784.9 \frac{kcal}{cm^2} - 86.39 \frac{kcal}{cm^2} \right)$$

Los valores de las entalpías de entrada y de salida fueron obtenidas del diagrama o tabla de vaporización del agua de Mollier.

**Tabla 54. Declaración de variables de las ecuaciones de poder calorífico de biomasa**

Variable	Descripción
$h_g$	Calor latente de vaporización del agua.
$T$	Temperatura
$^{\circ}C$	Grados Celsius
$kcal$	Kilocalorías
kg	Kilogramos
H	Hidrogeno
O	Oxigeno
P.C.I.	Poder calorífico inferior, expresado en kcal/kg de biomasa
P.C.S.	Poder calorífico superior, expresado en kcal/kg de biomasa
M	Por ciento (%) de contenido de humedad en la biomasa
$\Delta H_{vap}$	Salto de entalpía entre el agua de entrada y el vapor de salida, en kcal/kg
$H_{Final}$	Entalpía del vapor a una presión de 63.3kg/cm <sup>2</sup> y una temperatura de 445°C, en kcal/kg. Obtenido del diagrama o tabla de vaporización del agua de Mollier.
$H_{Inicial}$	Entalpía del agua de alimentación a una presión de 75kg/cm <sup>2</sup> y una temperatura de 85°C, en kcal/kg. Obtenido del diagrama o tabla de vaporización del agua de Mollier.

### 2.2.2. Pollinaza para combustión.

La pollinaza disponible para ser utilizada en el sistema de generación determina el tamaño de los equipos a utilizar y el volumen de energía producir, para estimar el volumen de pollinaza se aplica Ecuación 19, que involucra la producción de aves en el ciclo y el rendimiento de producción de pollinaza por pollo de engorde.

**Ecuación 19. Producción de toneladas de pollinaza al año**

$$tP = \frac{\left[ \left( \frac{d}{dc} \right) * (pe_{ciclo}) * (kgP_{rend}) \right]}{1000}$$

Es importante considerar el porcentaje de la tasa media de crecimiento anual de producción de pollinaza del 3.5% a partir de los planes de crecimiento en la producción de pollos de engorde y el volumen de compra adicional del 25% proveniente de productores locales de la zona ver Ecuación 20, y se establece un periodo a 7 años para llegar a la capacidad instalada de operación.

**Ecuación 20. Capacidad de combustión de toneladas de pollinaza al año**

$$CtP = (tP * (100\% + \% compra)) * (100\% + \% tmca)^{n_{cap}}$$

El estimado de producción anual de toneladas de pollinaza al año que pueden ser combustionadas de manera directa debe ser dividido entre las horas efectivas de operación al año. Para la operación del sistema de generación se ha determinado por los expertos energéticos un porcentaje (%) de tiempo perdido por mantenimiento sobre los 365 días de operación total, para determinar las horas efectivas de operación al año, Ecuación 21.

**Ecuación 21. Horas efectivas de operación al año**

$$h_{efect} = (365 * 24) * (100\% - \% tm)$$

La demanda de toneladas de pollinaza por hora combustionada en la caldera sirve para determinar el flujo de generación de vapor por hora que será suministrado al turbogenerador que produce la electricidad, aplicando la Ecuación 22.

**Ecuación 22. Combustión de pollinaza por hora**

$$cP_h = \frac{CtP}{h_{efect}}$$

Se aplica la Ecuación 23 para estimar la energía por hora contenida en la pollinaza considerando el contenido de humedad al cual está siendo combustionada la pollinaza.

**Ecuación 23. Energía por hora, contenida en la pollinaza (kcal)**

$$E_h = cP_h * (P.C.I. * 1000)$$

Para determinar el flujo de vapor por hora de la pollinaza, se calcula con la Ecuación 24 y para obtener el rendimiento de vapor por tipo de pollinaza se utiliza la Ecuación 25.

**Ecuación 24. Generación de toneladas de vapor por hora, en la caldera**

$$tV_h = \frac{E_h \left( \frac{\% \text{efic}_{caldera}}{\Delta H_{vap}} \right)}{1000}$$

**Ecuación 25. Rendimiento de producción de toneladas de vapor por tonelada de pollinaza**

$$RtV_h = \frac{tV_h}{cP_h}$$

El índice de consumo de vapor de un turbogenerador moderno es de 4.17 toneladas de vapor para producir un megawatt-hora y se presenta en la Ecuación 26.

**Ecuación 26. Consumo de toneladas de vapor en el turbogenerador por cada MW producido en una hora**

$$CtV_h = 4.17 \frac{tV_h}{MW_h}$$

Se aplica la Ecuación 27 y Ecuación 28 para determinar la producción de energía eléctrica que es capaz de producir un turbogenerador moderno por hora, concluyendo que la pollinaza de 40% de contenido de humedad presenta viabilidad para ser usada energéticamente, y durante un año considerando solo horas efectivas para determinar la producción de energía a generar, un 10% se utiliza energía para autoconsumo y un 90% de la energía producida es excedente se vende hacia la red nacional. Los porcentajes de autoconsumo y excedente son distintos para cada tipo de sistema de generación (pollinaza) o cogeneración (RAC). El autoconsumo de vapor es cero para la generación con pollinaza.

**Ecuación 27. Generación de energía eléctrica en el turbogenerador, expresados en MW por hora**

$$pMW_h = \frac{tV_h - (\% \text{ autoconsumo } tV_h)}{CtV_h}$$

**Ecuación 28. Venta de Excedentes de energía eléctrica en el turbogenerador, expresados en MW por hora**

$$ExMW_h = pMW_h - (\% \text{ Autoconsumo } pMW_h)$$

Para el diseño de la capacidad instalada de los equipos de generación de vapor (Caldera acuotubular de alta presión de lecho fluidizado) y del equipo de generación de energía eléctrica (turbogenerador a condensación) se aplican las Ecuación 29 y Ecuación 30, que sirven para estimar el valor de inversión inicial aproximada del sistema de generación.

**Ecuación 29. Capacidad instalada de la caldera para pollinaza**

$$CI_{Caldera} = tV_h * (100\% + 35\%_{Hologura})$$

**Ecuación 30. Capacidad instalada del turbogenerador del sistema de pollinaza**

$$CI_{Turbogenerador} = \frac{pMW_h}{\% \text{ } \text{efic}_{Turbogenerador}}$$

La bioenergía generada se divide en autoconsumo y excedente. La de autoconsumo se utiliza para mover los equipos eléctricos y equipos que requieren vapor en la planta de generación, y la energía excedente es la energía sobrante que será suministrada y vendida a la red para ser utilizada por otras empresas como sustituto de combustibles fósiles.

Las variables utilizadas para las ecuaciones utilizadas en el modelo de energía se declaran en la Tabla 55.

**Tabla 55. Declaración de variables de las ecuaciones de pollinaza**

Variable	Descripción
d	Días de operación al año
dc	Días del ciclo de producción de pollos de engorde
pe <sub>ciclo</sub>	Pollos de engorde en el ciclo de producción.
kgP <sub>rend</sub>	Rendimiento de kilos de pollinaza producidos por cada pollo de engorda
tP	Toneladas de pollinaza disponible al año

1000	Conversión de kilos de pollinaza a toneladas de pollinaza
CtP	Capacidad de combustión de toneladas de pollinaza al año
% compra	Porciento (%) de compra de toneladas de pollinaza adicional a las producidas
%tmca	Porciento (%) de la tasa media de crecimiento anual de pollinaza
n <sub>cap</sub>	Número de años (7) en que la planta estará a plena capacidad instalada.
365	Días al año
24	Horas al día
%tm	porciento (%) de tiempo perdido por mantenimiento a los equipos.
h <sub>efect</sub>	Horas efectivas de operación del sistema de combustión.
cP <sub>h</sub>	Combustión de pollinaza disponible por hora
E <sub>h</sub>	Energía que está disponible en la pollinaza por hora, expresada en kilocalorías
tV <sub>h</sub>	Toneladas de vapor disponible por hora con una temperatura de 445°C y una presión de 63.3kg/cm <sup>2</sup>
%efic <sub>Caldera</sub>	Porciento (%) de eficiencia de generación de vapor en una caldera moderna de alta presión.
RtV <sub>h</sub>	Rendimiento en la generación de toneladas de vapor por cada tonelada de pollinaza combustionada.
CtV <sub>h</sub>	Consumo de vapor por hora por cada MWh que produce el turbogenerador, este valor está dado por una distribución de probabilidad de consumo.
MW <sub>h</sub>	megawatts - hora
pMW <sub>h</sub>	Producción de energía eléctrica en Megawatts-hora en el turbogenerador
CI <sub>Caldera</sub>	Capacidad instalada en caldera a comprar.
35% <sub>Holgura</sub>	holgura de flujo de vapor al recibir biomasa de mejor calidad y/o menor humedad y que pueda soportar los picos de generación de vapor
CI <sub>Turbogenerador</sub>	Capacidad instalada de turbogenerador a comprar.
%efic <sub>Turbogenerador</sub>	Porciento (%) de eficiencia de un turbogenerador moderno que utiliza vapor de alta presión.

### 2.2.2.1. Selección de tecnología energética para utilizar la pollinaza

Para tomar la decisión de utilizar la combustión como la tecnología energética con mayor rendimiento se diseñaron diversas ecuaciones que evaluaron diferentes escenarios para utilizar la pollinaza como materia prima para producir bioenergía.

Se evalúan dos tipos de tecnologías la digestión anaeróbica y la combustión antes de decidir que tecnología le conviene a la pollinaza, para ambos casos se puede utilizar pollinaza sola o en mezcla con lodos residuales con diferentes proporciones.

Las proporciones utilizadas de pollinaza para evaluar los escenarios requieren de la participación del experto para incluir todos los aspectos posibles que influyen en el proceso de decisión de la tecnología energética de mayor rentabilidad usando pollinaza.

El tipo de energía a utilizar e implementar está sujeta a su contenido de humedad y el rendimiento de energía obtenido.

Escenario 1. Es la situación actual, actualmente se vende la pollinaza a granel en 3 tipos: seca, semi-húmeda (agrícola de primera) y húmeda (agrícola de segunda), su precio de venta depende de la temporada. El ingreso económico anual está definido por la Ecuación 31.

**Ecuación 31. Escenario 1, situación actual (venta de pollinaza)**

$$IngresoAnual(\$) = \{[(tP_s * \$P_s) + (tP_1 * \$P_1) + (tP_2 * \$P_2)] - (\$GOp)\} * [(1 + \%TMCA)^{n-1} * (1 + \%inf)^{n-1}]$$

Escenario 2. Generación de bioenergía a partir de la combustión de pollinaza seca, vender la pollinaza semi-húmeda y húmeda. El ingreso económico anual está definido por la Ecuación 32.

**Ecuación 32. Escenario 2, combustión pollinaza seca y venta.**

$$IngresoAnual(\$) = \left\{ \left[ \left( \left( (tP_s * (PCP * \%E)) * \left( \frac{\$Cm^3}{PCCm^3} \right) \right) \right) + (tP_1 * \$P_1) + (tP_2 * \$P_2) \right] - (\$GOp + Dep) \right\} * [(1 + \%TMCA)^{n-1} * (1 + \%inf)^{n-1}]$$



Escenario 3. Mejorar la calidad de pollinaza húmeda en semi-húmeda, la semi-húmeda en seca, para combustionar la pollinaza seca y vender la pollinaza semi-húmeda y húmeda restante. El ingreso económico anual está definido por la Ecuación 33.

**Ecuación 33. Escenario 3, mejora de pollinaza seca para combustión y venta.**

$$IngresoAnual(\$) = \left\{ \left[ \left( (tP_s + (tP_1 * \%MP_1)) * (PCP * \%E) \right) * \left( \frac{\$Cm^3}{PCCm^3} \right) \right] + \left[ \left( (tP_1 * (1 - \%MP_1)) + (tP_2 * \%MP_2) \right) * \$P_1 \right] + \left[ (tP_2 * (1 - \%MP_2)) * \$P_2 \right] \right] - (\$GOp + Dep) \right\} * \left[ (1 + \%TMCA)^{n-1} * (1 + \%inf)^{n-1} \right]$$

Escenario 4. Generación de biogás a partir de co-digestión anaerobia con pollinaza húmeda (30%) y lodos residuales (70%), y vender la pollinaza seca, semi-húmeda y los biosólidos resultantes de la digestión. El ingreso económico anual está definido por la Ecuación 34.

**Ecuación 34. Escenario 4, co-digestión de pollinaza húmeda con lodos residuales y venta.**

$$IngresoAnual(\$) = \left\{ \left[ \left( (tP_s * \$P_s) + (tP_1 * \$P_1) + \left( (Rm^3_{COD} * CAP_{REAC} * 365) * PCB \right) * \left( \frac{\$Cm^3}{PCCm^3} \right) \right) \right] - (\$GOp + Dep) \right\} * \left[ (1 + \%TMCA)^{n-1} * (1 + \%inf)^{n-1} \right]$$

Escenario 5. Generación de biogás a partir de digestión anaeróbica con la totalidad de pollinaza húmeda y vender la pollinaza semi-húmeda y seca. El ingreso económico anual está definido por la Ecuación 35.

**Ecuación 35. Escenario 5, solo digestión de pollinaza húmeda y venta**

$$IngresoAnual(\$) = \left\{ \left[ \left( (tP_s * \$P_s) + (tP_1 * \$P_1) + \left( tP_2 * PCB * \left( m^3_{Biogás} * \left( \frac{tP_2}{1t} \right) \right) * \left( \frac{\$Cm^3}{PCCm^3} \right) \right) \right) \right] - (\$GOp + \$A + Dep) \right\} * \left[ (1 + \%TMCA)^{n-1} * (1 + \%inf)^{n-1} \right]$$

Escenario 6. Mejorar la calidad de la pollinaza semi-húmeda en seca para combustión, mejorar la pollinaza húmeda en semi-húmeda para su venta, vender la mayor proporción de pollinaza húmeda restante y la menor proporción usar co-digestión con lodos residuales. El ingreso económico anual está definido por la Ecuación 36.

**Ecuación 36. Escenario 6, mejora de pollinaza seca para combustión, co-digestión y venta**

$$IngresoAnual(\$) = \left\{ \left[ \left( \left( (tP_s + (tP_1 * \%MP_1)) * (PCP * \%E) \right) * \left( \frac{\$Cm^3}{PCCm^3} \right) \right) \right] + \left( (tP_1 * (1 - \%MP_1)) + (tP_2 * \%MP_2) \right) * \$P_1 + \left( (Rm^3_{COD} * CAP_{REAC} * 365) * PCB \right) * \left( \frac{\$Cm^3}{PCCm^3} \right) \right] - (\$GOp + Dep) \right\} * \left[ (1 + \%TMCA)^{n-1} * (1 + \%inf)^{n-1} \right]$$

Escenario 7. Mejorar la calidad de la pollinaza semi-húmeda en seca para combustión, mejorar la pollinaza húmeda en semi-húmeda para su venta, producir biogás con digestión anaeróbica usando pollinaza húmeda. El ingreso económico anual está definido por la Ecuación 37.

**Ecuación 37. Escenario 7, mejora de pollinaza seca para combustión, solo digestión y venta**

$$IngresoAnual(\$) = \left\{ \left[ \left( (tP_s * ((tP_1 * \%MP_1) * (PCP * \%E))) * \left( \frac{\$Cm^3}{PCCm^3} \right) \right) \right] + \left( (tP_1 * (1 - \%MP_1)) + (tP_2 * \%MP_2) \right) * \$P_1 + \left( tP_2 * PCB * \left( m^3_{Biogás} * \left( \frac{tP_2}{1t} \right) \right) * \left( \frac{\$Cm^3}{PCCm^3} \right) \right) \right] - (\$GOp + \$A + Dep) \right\} * \left[ (1 + \%TMCA)^{n-1} * (1 + \%inf)^{n-1} \right]$$

La bioenergía generada se utiliza para autoconsumo, como sustituto del combustible fósil, en caso producir energía excedente, es decir por arriba de las necesidades de la planta se vende a empresas socias.

Las variables de las ecuaciones anteriores se declaran en la Tabla 56.

**Tabla 56. Declaración de variables de las ecuaciones de pollinaza**

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
$tP_s$	Toneladas de pollinaza seca
$tP_1$	Toneladas de pollinaza semi-húmeda
$tP_2$	Toneladas de pollinaza húmeda
$\%MP_1$	Porcentaje de mejora de pollinaza seca
$\%MP_2$	Porcentaje de mejora de pollinaza semi-húmeda
$\%MP_3$	Porcentaje de mejora de pollinaza húmeda
$\$P_s$	Precio de pollinaza seca
$\$P_1$	Precio de pollinaza semi-húmeda
$\$P_2$	Precio de pollinaza húmeda
$\% TMCA$	Tasa media de crecimiento anual
$\% inf$	Inflación anual
$PCP$	Poder calorífico por tipo de pollinaza
$\$PCP$	Precio de poder calorífico de pollinaza
$\%E$	Porcentaje de eficiencia de conversión de bioenergía
$PCCm^3$	Poder calorífico en 1 m <sup>3</sup> combustóleo
$\$Cm^3$	Costo de 1 m <sup>3</sup> combustóleo
$m^3_{Biogás}$	Rendimiento de m <sup>3</sup> de biogás de digestión pollinaza húmeda
$PCB$	poder calorífico de biogás
$Rm^3_{COD}$	Rendimiento m <sup>3</sup> de biogás de co-digestión de pollinaza húmeda y lodos residuales
$CAP_{REAC}$	capacidad de digestión del reactor de digestión anaeróbica
365	Días del año
$\$GOP$	Gastos de Operación
$\$A$	Costo de Agua
$Dep$	Costo de Depreciación

### 2.2.3. Lodos Residuales para digestión anaeróbica

La utilización de lodos residuales para la producción de biogás para generar energía eléctrica, requiere del diseño de ecuaciones matemáticas que permitan controlar el procesamiento de pollo de engorde para mejorar la calidad de los lodos residuales.

#### **Producción de pollo procesado.**

**Ecuación 38. Producción de pollo procesado en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$PPP = (PS * (1 - \% MPS)) + (PN * (1 - \% MPN)) + (PP * (1 - \% MPP)) + (PK * (1 - \% MPK))$$

Esta cantidad de PPP (Producción de Pollo Procesado) se comporta conforme a una distribución estadística conocida, la cual fue obtenida de un ajuste de distribución de datos históricos de 6 meses de producción, ver en la sección de anexos 2.1.2 Lodos residuales para Digestión anaeróbica.

#### **Lodos residuales para Digestión anaeróbica.**

Cada una de las cantidades de los tipos de aves tiene una proporción con respecto al total, estas son: Pollo Seco (PS): 34.86%, Pollo Natural (PN): 17.46%, Pollo Pintado (PP): 47.67%, Pollo Kosher (PK): 0.0% (Se realiza en el 12% de los días de producción).

Capacidad de Producción Diaria (CPD):

**Ecuación 39. Capacidad de producción diaria en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$CPD = PPP * (\text{turno } 8\text{hrs} - \text{tiempo perdido})$$

Los tiempos perdidos consideran tiempos de comida, preparación entre procesos y limpieza final.

Producción Anual de Aves (PAA):

**Ecuación 40. Producción anual de aves en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$PAA = CPD * [365 - (\text{días de descanso} * 52 \text{ Semanas})]$$

Consumo de Agua por Ave (CAA) en el procesamiento:

**Ecuación 41. Consumo de agua por ave en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$CAA = \frac{CAUI - CAO}{CPD}$$

Consumo de Agua por Etapa (CAE) en el procesamiento:

**Ecuación 42. Consumo de Agua por etapa en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$CAE = (AA_1E_1 + AA_1E_2 + AA_1E_3 + AA_1E_4) \\ + (AA_2E_1 + AA_2E_2 + AA_2E_3 + AA_2E_4 + AA_2E_5 + AA_2E_6 + AA_2E_7 + AA_2E_8 + AA_2E_9) \\ + (AA_3E_1 + AA_3E_2 + AA_3E_3 + AA_3E_4 + AA_3E_5)$$

**Mermas orgánicas del procesamiento de aves por etapa**

Mermas por Áreas y Etapas del Proceso:

Área 1.

**Ecuación 43. Mermas por área 1 y etapa 1 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_1E_1 = M_{111} + M_{112} + M_{113} + M_{114} + M_{115} + M_{116}$$

**Ecuación 44. Mermas por área 1 y etapa 2 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_1E_2 = M_{121} + M_{122} + M_{123} + M_{124} + M_{125} + M_{126}$$

**Ecuación 45. Mermas por área 1 y etapa 3 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_1E_3 = M_{131} + M_{132} + M_{133} + M_{134} + M_{135} + M_{136}$$

**Ecuación 46. Mermas por área 1 y etapa 4 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_1E_4 = M_{141} + M_{142} + M_{143} + M_{144} + M_{145} + M_{146}$$

Área 2.

**Ecuación 47. Mermas por área 2 y etapa 1 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_2E_1 = M_{211} + M_{212} + M_{213} + M_{214} + M_{215} + M_{216}$$

**Ecuación 48. Mermas por área 2 y etapa 2 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_2E_2 = M_{221} + M_{222} + M_{223} + M_{224} + M_{225} + M_{226}$$

**Ecuación 49. Mermas por área 2 y etapa 3 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_2E_3 = M_{231} + M_{232} + M_{233} + M_{234} + M_{235} + M_{236}$$

**Ecuación 50. Mermas por área 2 y etapa 4 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_2E_4 = M_{241} + M_{242} + M_{243} + M_{244} + M_{245} + M_{246}$$

**Ecuación 51. Mermas por área 2 y etapa 5 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_2E_5 = M_{251} + M_{252} + M_{253} + M_{254} + M_{255} + M_{256}$$

**Ecuación 52. Mermas por área 2 y etapa 6 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_2E_6 = M_{261} + M_{262} + M_{263} + M_{264} + M_{265} + M_{266}$$

**Ecuación 53. Mermas por área 2 y etapa 7 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_2E_7 = M_{271} + M_{272} + M_{273} + M_{274} + M_{275} + M_{276}$$

**Ecuación 54. Mermas por área 2 y etapa 8 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_2E_8 = M_{281} + M_{282} + M_{283} + M_{284} + M_{285} + M_{286}$$

**Ecuación 55. Mermas por área 2 y etapa 9 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_2E_9 = M_{291} + M_{292} + M_{293} + M_{294} + M_{295} + M_{296}$$

Área 3.

**Ecuación 56. Mermas por área 3 y etapa 1 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_3E_1 = M_{311} + M_{312} + M_{313} + M_{314} + M_{315} + M_{316}$$

**Ecuación 57. Mermas por área 3 y etapa 2 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_3E_2 = M_{321} + M_{322} + M_{323} + M_{324} + M_{325} + M_{326}$$

**Ecuación 58. Mermas por área 3 y etapa 3 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_3E_3 = M_{331} + M_{332} + M_{333} + M_{334} + M_{335} + M_{336}$$

**Ecuación 59. Mermas por área 3 y etapa 4 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_3E_4 = M_{341} + M_{342} + M_{343} + M_{344} + M_{345} + M_{346}$$

**Ecuación 60. Merms por área 3 y etapa 5 del proceso en planta procesadora de aves (Lodos residuales)**

$$MA_3E_5 = M_{351} + M_{352} + M_{353} + M_{354} + M_{355} + M_{356}$$

**Ecuación 61. Suma de Merms totales en planta procesadora de aves (lodos residuales)**

$$MT = \sum MA_n E_m$$

Efluentes (Ef):

**Ecuación 62. Producción de Efluentes en planta procesadora de aves (lodos residuales)**

$$EF = (MT - SR) + CAE$$

**Producción de lodos residuales.**

Índice de Residuos Orgánicos en Lodos (IROL) = 0.17, obtenido de estudios de caracterización de lodos residuales.

Lodos Residuales Totales (LRT):

**Ecuación 63. Lodos residuales totales en planta procesadora de aves**

$$LRT = \frac{(Ef - CAE)}{IROL}$$

Lodos Residuales para Bioenergía (LRB):

**Ecuación 64. Lodos residuales para bioenergía en planta procesadora de aves**

$$LRB = LRT - LRC$$

Los Lodos Residuales Confinados (LRC) no se procesan al no existir capacidad en la PTLR.

Volumen de Sólidos Totales en lodos por Kg (VST):

**Ecuación 65. Volumen de solidos totales en lodos residuales en Kg**

$$VST = LRB * \%ST$$

Volumen de Sólidos Volátiles por Kg (VSTV):

**Ecuación 66. Volumen de solidos totales volátiles en kg**

$$VSTV = VST * \%STV$$

Volumen de Sólidos Volátiles Removidos por Kg (VSTVR):

**Ecuación 67. Volumen de solidos volátiles removidos en kg**

$$VSTVR = VSTV * \%ER$$

### **Rendimiento de Biogás**

Rendimiento de Biogás al día (RB):

**Ecuación 68. Rendimiento de biogás al día en planta procesadora de aves (lodos residuales)**

$$RB = VSTV * RBenKgdeSTVR$$

Rendimiento de Biogás de Lodos Residuales para Bioenergía al día (RBLR):

**Ecuación 69. Rendimiento de biogás de lodos residuales para bioenergía al día en planta procesadora de aves**

$$RBLR = LRB * RB$$

Índice de Poder Calorífico de M3 de Biogás al 75% de Metano (IPCB) = 6,957.1 Kcal/M3

Energía contenida en Biogás al día (EB):

**Ecuación 70. Energía producida en Biogás al día en planta procesadora de aves (lodos residuales)**

$$EB = (RBLR * IPCB)$$

Rendimiento Económico de Bioenergía (REB):

**Ecuación 71. Rendimiento económico de bioenergía en planta procesadora de aves (lodos residuales)**

$$REB = (RBLR * IPCB) * \left( \frac{\$Cm^3}{PCCm^3} \right)$$



Rendimiento Económico de Bioenergía por Año (REBA):

**Ecuación 72. Rendimiento económico de bioenergía por año en planta procesadora de aves (lodos residuales)**

$$REBA = REB * [365 - (1DíadeDescanso * 52Semanas )]$$

Rendimiento Económico de Biofertilizantes por Año (REBFA):

**Ecuación 73. Rendimiento económico de biofertilizante por año en planta procesadora de aves (lodos residuales)**

$$REBFA = (LRB * IBFLR * \$m^3 BF) * [365 - (1DíadeDescanso * 52semanas )]$$

Ingreso de Bioenergéticos a 'n' Periodos (IB<sub>n</sub>P):

**Ecuación 74. Ingreso de Bioenergéticos a "n" periodos en planta procesadora de aves (lodos residuales)**

$$IB_n P = \left[ REBA * \left[ (1 + TMCA)^{n-1} * (1 + \% Inf)^{n-1} \right] \right] + \left[ REBFA * \left[ (1 + TMCA)^{n-1} * (1 + \% Inf)^{n-1} \right] \right]$$

**Tabla 57. Nomenclatura para Modelos matemáticos de Lodos residuales**

Variable	Descripción
PPP	Producción de pollo procesado.
PS	Pollo seco
PN	Pollo natural
PP	Pollo pintado
PK	Pollo kosher
MPS	Merma pollo seco
MPN	Merma pollo natural
MPP	Merma pollo pintado
MPK	Merma pollo kosher
CPD	Capacidad de producción diaria
PAA	Producción anual de aves
CAA	Consumo de agua por ave
CAUI	Consumo de agua por unidad industrial
CAOA	Consumo de agua de otras áreas
CAE	Consumo de agua por ave

---

$AA_nE_m$	Agua en el área 'n' en la etapa 'm'
$MA_nE_m$	Merma en áreas 'n' en la etapa 'm'
$M_{nm}$	Merma en el área 'n' en la etapa 'm' del tipo 'x'
MT	Mermas totales
EF	Efluentes
SR	Sólidos recuperados
IROL	Índice de lodos residuales en lodos
LRT	Lodos residuales totales
LRB	Lodos residuales para bioenergía
LRC	Lodos residuales para confinamiento
VST	Volumen de sólidos totales en lodo
ST	Sólidos totales
STV	Sólidos totales volátiles
VSTV	Volumen de sólidos volátiles por kg
VSTVR	Volumen de sólidos totales volátiles removidos
ER	Eficiencia de remoción
RB	Rendimiento de biogás
STVR	Sólido total volátil removido
RBLR	Rendimiento de biogás de lodos residuales para bioenergía al día
IPCB	Índice de poder calorífico de m <sup>3</sup> de biogás al 75% de metano
EB	Energía de biogás al día
REB	Rendimiento económico de bioenergía
$\$Cm^3$	Costo del metro cúbico de combustóleo
$PCCm^3$	Poder calorífico del metro cúbico de combustóleo
REBA	Rendimiento económico de bioenergía por año
REBFA	Rendimiento económico de biofertilizantes por año
IBFLR	Índice de biofertilizantes en lodos residuales
$m^3BF$	Metros cúbicos de biofertilizantes
$IB_nP$	Ingreso de bioenergía a 'n' periodos
TMCA	Tasa media de crecimiento anual
%Inf	Tasa de inflación

---

#### 2.2.4. Bagazo de Caña y RAC para Combustión

El bagazo y el residuo agrícola de cosecha de caña (RAC) disponible para ser utilizados en el sistema de generación determina el tamaño de los equipos a utilizar y el volumen de energía producir y los periodos para ser utilizados en cada cadena de valor, se aplica Ecuación 75 para determinar la producción de RAC por Zafra, la Ecuación 76 para estimar la producción de bagazo por zafra y la Ecuación 77 para determinar el volumen total de Biomasa por zafra.

**Ecuación 75. Producción de toneladas de RAC por zafra para cada cadena de valor**

$$tRAC = \left( \frac{RdRAC}{Ha} \right) * (HasCMV)$$

**Ecuación 76. Producción de toneladas de Bagazo por zafra**

$$tBagazo = (\% BagazoCaña * tCaña)$$

**Ecuación 77. Capacidad de combustión de toneladas de Biomasa por zafra (RAC y Bagazo)**

$$CtBiomasa = (tRAC + tBagazo)$$

El estimado de producción anual de toneladas de biomasa por zafra que pueden ser combustionadas.

Para la operación del sistema de generación se ha determinado por los expertos energéticos un porcentaje (%) de tiempo perdido total sobre los 160 días de operación total, para determinar las horas efectivas de operación al año, ver Ecuación 78.

**Ecuación 78. Horas efectivas de operación por zafra para cada cadena de valor**

$$h_{efect} = (160 * 24) * (100\% - \%tp_{total})$$

La demanda de toneladas de Bagazo y RAC por hora combustionada en la caldera sirve para determinar el flujo de generación de vapor por hora que será suministrado al turbogenerador que produce la electricidad, aplicando la.

**Ecuación 79. Combustión de Bagazo por hora, por cadena de valor**

$$c_h Bagazo = \frac{CtBagazo}{h_{efect}}$$

**Ecuación 80. Combustión de RAC por hora, por cadena de valor**

$$c_h RAC = \frac{CtRAC}{h_{efect}}$$

Se aplica la Ecuación 81 y Ecuación 82 para estimar la energía por hora contenida en el RAC y el Bagazo considerando el contenido de humedad al cual está siendo combustionada cada tipo de biomasa.

**Ecuación 81. Energía por hora, contenida en el RAC (kcal) con % de humedad**

$$E_h RAC = c_h RAC * (P.C.I._{RAC} * 1000)$$

**Ecuación 82. Energía por hora, contenida en el Bagazo (kcal) con % de humedad**

$$E_h Bagazo = c_h Bagazo * (P.C.I._{Bagazo} * 1000)$$

Para determinar el flujo de vapor por hora del bagazo y del RAC, se calcula con la Ecuación 83 y Ecuación 84, para obtener el rendimiento de producción de vapor por tipo Biomasa se utiliza la Ecuación 85 y Ecuación 86.

**Ecuación 83. Generación de toneladas de vapor por hora utilizando Bagazo en la caldera**

$$tV_h Bagazo = \frac{E_h Bagazo \left( \frac{\% \text{efic}_{caldera}}{\Delta H_{vap}} \right)}{1000}$$

**Ecuación 84. Generación de toneladas de vapor por hora utilizando RAC en la caldera**

$$tV_h RAC = \frac{E_h RAC \left( \frac{\% \text{efic}_{caldera}}{\Delta H_{vap}} \right)}{1000}$$

**Ecuación 85. Rendimiento de producción de toneladas de vapor por tonelada de Bagazo**

$$RtV_h Bagazo = \frac{tV_h Bagazo}{c_h Bagazo}$$

**Ecuación 86. Rendimiento de producción de toneladas de vapor por tonelada de RAC**

$$RtV_h RAC = \frac{tV_h RAC}{c_h RAC}$$

El índice de consumo de vapor de un turbogenerador moderno es de 4.0 toneladas de vapor para producir un megawatt-hora y se presenta en la Ecuación 87 y Ecuación 88.

**Ecuación 87. Consumo de toneladas de vapor por cada MWh con bagazo en zafra**

$$CtV_h Bagazo = 6.0 \frac{tV_h Bagazo}{MW_h}$$

**Ecuación 88. Consumo de toneladas de vapor por cada MWh con RAC en no zafra**

$$CtV_h RAC = 4.0 \frac{tV_h RAC}{MW_h}$$

Se aplica la Ecuación 89y Ecuación 90 para determinar la producción de energía eléctrica que es capaz de producir un turbogenerador moderno por hora, concluyendo que la pollinaza de 40% de contenido de humedad presenta viabilidad para ser usada energéticamente, y durante un año considerando solo horas efectivas para determinar la producción de energía a generar.

En temporada de zafra el 46.5% de la energía producida se utiliza para autoconsumo y un 53.5% de la energía producida es excedente que se vende hacia la red nacional, en temporada de no zafra al no haber demanda de vapor para otros procesos el 10% de la energía producida se utiliza para autoconsumo y un 90% de la energía producida es excedente que se vende hacia la red nacional.

Los porcentajes de autoconsumo y excedente de Cogeneración con RAC o Bagazo son distintos a los autoconsumos y excedentes al de Generación con Pollinaza, porque el requerimiento de vapor y el balance de energía tienen arreglos distintos.

En la generación con Pollinaza el vapor es solo para generar energía eléctrica a través de un turbogenerador condensante sin extracción, y en el sistema de cogeneración con RAC y Bagazo son dos tipos de turbogeneradores en zafra opera uno de contrapresión con extracción de vapor y otro de condensación con máxima extracción de vapor y en periodo de no zafra solo opera el turbogenerador de condensación con mínima extracción de vapor.

La diferencia consiste en la extracción de vapor del turbogenerador, la extracción se requiere para obtener vapor de alta presión para los procesos de extracción del jugo de caña en los molinos, para el proceso de elaboración y cocimiento del azúcar estándar utilizando Bagazo y RAC, y en el caso de la pollinaza el vapor producido no tiene otro uso el vapor, solo generar energía eléctrica.

En la Sección de anexos 3.3.4 se encuentra una gráfica que explica el consumo de vapor por tipo de turbogenerador.

**Ecuación 89. Generación de energía eléctrica en MW por hora con bagazo**

$$pMW_h Bagazo = \frac{tV_h Bagazo Total - (\% Autoconsumo * tV_h Bagazo)}{CtV_h Bagazo}$$

**Ecuación 90. Generación de energía eléctrica en MW por hora con RAC**

$$pMW_h RAC = \frac{tV_h RAC Total - (\% Autoconsumo * tV_h RAC)}{CtV_h RAC}$$

Existen dos tipos de autoconsumos en porcentajes distintos para el caso de la cogeneración usando RAC y Bagazo, el autoconsumo de vapor, ver Ecuación 89 y Ecuación 90, y el autoconsumo eléctrico ver Ecuación 91 y Ecuación 92.

**Ecuación 91. Venta de Excedentes de energía eléctrica en MW por hora con Bagazo**

$$ExMW_h Bagazo = pMW_h Bagazo - (\% autoconsumo pMW_h Bagazo)$$

**Ecuación 92. Venta de Excedentes de energía eléctrica en MW por hora con RAC**

$$ExMW_h RAC = pMW_h RAC - (\% autoconsumo pMW_h RAC)$$

Para el diseño de la capacidad instalada de los equipos de generación de vapor (Caldera acuotubular de alta presión de lecho fluidizado) y del equipo de cogeneración de energía eléctrica (un turbogenerador a condensación con máxima extracción en zafra y mínima extracción en no zafra y un segundo turbogenerador de contrapresión con extracción en zafra) se aplican las Ecuación 93 y Ecuación 94, que sirven para estimar el valor de inversión inicial aproximada del sistema de generación utilizando solo la disponibilidad de bagazo.

Para el diseño de la caldera solo se debe considerar el bagazo ya que es el combustible principal del proceso azucarero y durante el tiempo necesario que dura la zafra, con el RAC se garantiza

cogenerar energía eléctrica durante más tiempo, es decir seguir operando después de haber terminado la zafra.

No es recomendable diseñar la caldera y el turbogenerador sumando el consumo de los dos tipos de biomasa por hora porque corremos el riesgo de diseñar equipos más grandes, de más inversión y de una posible falta de biomasa, es mejor que sobre biomasa y se vaya acumulando para ocuparla cuando se tiene déficit para seguir operando las calderas durante la zafra y después de zafra.

**Ecuación 93. Capacidad instalada de la caldera para bagazo**

$$CI_{Caldera} = tV_h Bagazo * (100\% + 35\%_{Holgura})$$

**Ecuación 94. Capacidad instalada del turbogenerador del sistema utilizando bagazo**

$$CI_{Turbogenerador} = \frac{pMW_h Bagazo}{\%efic_{Turbogenerador}}$$

Índice de Conversión de Bagazo al 50% de Humedad a Vapor (BAGVAP):

**Ecuación 95. Índice de conversión de bagazo al 50% de humedad a vapor**

$$BAGVAP = \frac{tV_h BagazoTotal - (\% Autoconsumo * tV_h Bagazo)}{tBagazo}$$

Nomenclatura de las variables del poder calorífico del RAC y del Bagazo:

Poder Calorífico del RAC al 8% de Humedad: (PCRAC)

Poder Calorífico del Bagazo al 50% de Humedad: (PCBAG)

Índice de Conversión de RAC a Bagazo: (RACBAG)

**Ecuación 96. Índice de Conversión de residuo agrícola de cosecha a bagazo**

$$RACBAG = \frac{PCRAC}{PCBAG}$$

Índice de Conversión de vapor a Energía Eléctrica (VAPEE):

**Ecuación 97. Índice de conversión de vapor con bagazo a energía eléctrica**

$$VAPEE_{Bagazo} = \frac{pMW_h Bagazo}{tV_h Bagazo}$$

**Ecuación 98. Índice de conversión de vapor con RAC a energía eléctrica**

$$VAPEE_{RAC} = \frac{pMW_h RAC}{tV_h RAC}$$

Índice de Conversión de kWh a RAC (kWhRAC):

**Ecuación 99. Índice de Conversión de kWh a residuo agrícola de cosecha**

$$kWhRAC = \frac{VAPEE_{RAC}}{\left( \left( \frac{1}{BAGVAP} \right) \right) \left( \frac{1}{RACBAG} \right)}$$

Producción de Bioenergía a Partir de RAC (PBIOE):

**Ecuación 100. Producción de bioenergía a partir de residuo agrícola de cosecha**

$$PBIOE = kWhRAC * PRAC \quad \text{ó} \quad PBIOE = kWhRAC * tRAC$$

Rendimiento Económico de Bioenergía (REBIOE):

**Ecuación 101. Rendimiento económico de bioenergía del residuo agrícola de cosecha**

$$REBIOE = PBIOE * \$kWh$$

Ingreso de Bioenergía a 'n' Periodos (IB<sub>n</sub>P):

**Ecuación 102. Ingreso de bioenergía a "n" periodos con residuos agrícolas de cosecha**

$$IB_n P = REBIOE * \left[ (1 + \%TMCA)^{n-1} * (1 + \%inf)^{n-1} \right]$$



**Tabla 58. Nomenclatura para Modelos matemáticos de combustión de RAC y Bagazo**

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
PRAC	Producción de RAC por Zafra
GVC	Generación de Vapor por Hora en Calderas
EG	Eficiencia de Generación
VCn	Vapor de la Caldera 'n'
PVC	Producción de Vapor en Calderas
PB	Producción de Bagazo
BAGVAP	Índice de Conversión de Bagazo Vapor al 50% de Humedad
PBAG	Producción de Bagazo
PCRAC	Poder Calorífico del RAC al 8% de Humedad
PCBAG	Poder Calorífico del Bagazo al 50% de Humedad
RACBAG	Índice de Conversión de RAC a Bagazo
VEE	Vapor Utilizado para Energía Eléctrica
CVF	Consumo de Vapor en Fábrica
VAPEE	Índice de Vapor Conversión a Energía Eléctrica
PEE	Producción de Energía Eléctrica
kWhRAC	Índice de Conversión de kWh a RAC
PBIOE	Producción de Bioenergía a Partir de RAC
REBIOE	Rendimiento Económico de Bioenergía
kWh	Kilowatts-hora
IBnP	Ingreso de Bioenergía a 'n' Periodos
TMCA	Tasa Media de Crecimiento Anual
Inf	Inflación

### 2.2.5. Sustentabilidad ambiental con reducción de emisiones de CO2

Se aplica el factor de emisión eléctrico utilizado para estimar las emisiones de gases efecto invernadero que se mitigarían por la venta de la energía excedente que es generada por la combustión de la biomasa (pollinaza, residuo agrícola de cosecha y bagazo) y que es entregada a la red nacional.

El cálculo del factor de emisión eléctrico es el promedio del sistema eléctrico nacional que se basa en el consumo total de combustible y la generación de electricidad neta entregada a la red (TOOL07, methodological tool: tool to calculate the emission factor for an electricity system, version 0.4.0, average OM method, option B). Este método está aprobado por la junta ejecutiva del mecanismo para un desarrollo limpio de la convención sobre el cambio climático (por sus siglas en inglés UNFCCC) (IPCC, 2006).

El margen operativo promedio (MO promedio) es el factor de emisión promedio de todas las plantas, incluyendo las de menor costo de operación y las más utilizadas; generalmente se consideran las hidroeléctricas, geotérmicas, eólicas, nuclear, solar y de biomasa con bajo costo (GEI, 2013).

**Ecuación 103. Factor de emisión de gases efecto invernadero (GEI) de electricidad de todas las plantas en México**

$$FEE_{Todas} = \frac{\sum Emisiones_{Todas} [tCO_2eq]}{\sum Generación_{Neta} [MWh]}$$

**Ecuación 104. Toneladas de dióxido de carbono equivalente mitigado (GEI).**

$$tCO_2eq = (ExMW_h Bagazo + ExMW_h RAC) * (FEE_{Todas})$$

## 2.2.6. Logística de recolección de Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC) de caña de azúcar

A continuación se muestran las ecuaciones relacionadas con el sistema logístico de recolección de RAC.

### **Hilerado/Alineado.**

Muestras de Velocidad de Hilerador/Alineador: MVH

Metros de Hileras por Ha.: mH

Tiempos de Hilerado (tH):

**Ecuación 105. Tiempo de hilerado en residuo agrícola de cosecha**

$$tH = \frac{mH}{MVH}$$

Capacidad de Trabajo de Hileradora (CTH):

**Ecuación 106. Capacidad de trabajo en hileradora en residuo agrícola de cosecha**

$$CTH = \frac{MVH}{mH}$$

Tiempo Efectivo de Trabajo de Hileradora (tETH):

**Ecuación 107. Tiempo efectivo de trabajo de hileradora**

$$tETH = (\text{Turno } 8hrs - \text{Tiempo Perdido}) * (NT * NHT)$$

NT = Distribución discreta con asignaciones de probabilidad definidas por el experto.

Capacidad de Trabajo de Hectáreas por Turno Efectivo de Hileradora (CTHxT):

**Ecuación 108. Capacidad de trabajo por hectárea por turno efectivo de hileradora en residuo agrícola de cosecha**

$$CTHxT = CTH * tETH$$

**Enfardado.**

Muestras de Velocidad de Enfardador: MVE

Metros de Enfardado por Ha.: mE

Tiempo de Enfardado (tE):

**Ecuación 109. Tiempo de enfardado en residuo agrícola de cosecha**

$$tE = \frac{mE}{MVE}$$

Capacidad de Trabajo de Enfardado (CTE):

**Ecuación 110. Capacidad de trabajo de enfardado en residuo agrícola de cosecha**

$$CTE = \frac{MVE}{mE}$$

Tiempo Efectivo de Trabajo de Enfardado (tETE):

**Ecuación 111. Tiempo efectivo de trabajo en enfardado en residuo agrícola de cosecha**

$$tETE = (Turno8hrs - TiempoPerdido) * (NT * NET)$$

Capacidad de Trabajo de Hectáreas por Turno Efectivo de Enfardadora (CTExT):

**Ecuación 112. Capacidad de trabajo por hectárea por turno efectivo en enfardadora en residuo agrícola de cosecha**

$$CTExT = (CTE * tETE)$$

**Alzado (también llamado Alce).**

Muestras de Velocidad de Alzado: MVA

Metros entre alzado por Ha.: mA

Para determinar el Tiempo de alzado (tA):

**Ecuación 113. Tiempo de alzado en residuo agrícola de cosecha**

$$tE = \frac{mA}{MVA}$$

Capacidad de Trabajo de Alzado (CTA):

**Ecuación 114. Capacidad de Alzado en residuo agrícola de cosecha**

$$CTA = \frac{MVA}{mA}$$

Tiempo Efectivo de Trabajo de Alzado (tETA):

**Ecuación 115. Tiempo efectivo de trabajo de alzado en residuo agrícola de cosecha**

$$tETA = (Turno8hrs - TiempoPerdido) * (NT * NAT)$$

Capacidad de Trabajo de Hectáreas por Turno Efectivo de Alzado (CTAxT):

**Ecuación 116. Capacidad de trabajo en hectáreas por turno efectivo de alzado en residuo agrícola de cosecha**

$$CTAxT = (CTA * tETA)$$

### **Programación Logística.**

Condición de trabajo que se debe adecuar a la operación del equipo de menor capacidad.

$$Si: CTE_{xT} < CTH_{xT} \therefore \rightarrow CTE_{xT}$$

Condición para determinar la programación, sincronización y operación logística para utilizar la mayor capacidad instalada de operación de los equipos.

Programación de Operación Logística (POL):

**Ecuación 117. Programación de operación logística en residuo agrícola de cosecha**

$$POL = \sum CTE_{xT} \leq CTH_{xT}$$

Precipitación Pluvial por Día ( $PPD_n$ )

Parámetro de decisión si se detiene operación por Precipitación Pluvial ( $PPP$ ) = 7.6 mm, considerando el estadístico de los últimos 10 años por día.

Condición de Decisión de Programación.

$$PPD_n \leq PPP \therefore 0 \quad \text{Sin lluvia}$$

$$PPD_n > PPP \therefore 1 \quad \text{Con lluvia}$$

Días Perdidos por Lluvias:

**Ecuación 118. Días perdidos por lluvia en residuo agrícola de cosecha**

$$DP_{xLL} = \sum (PPD_n > PPP)$$

Días Efectivos del Ciclo de Zafra (DEZ):

**Ecuación 119. Días efectivos del ciclo de zafra en residuo agrícola de cosecha**

$$DEZ = DZ * (1 - DP_{xLL})$$

Producción de RAC por Zafra (PRAC):

**Ecuación 120. Producción de RAC por zafra en residuo agrícola de cosecha**

$$PRAC = \sum [(CTExT) * DEZ]$$

**Tabla 59. Nomenclatura para Modelos matemáticos de sistema logístico de recolección de RAC**

Variable	Descripción
MVH	Muestras de Velocidad de Hilerador/Alineador
mH	Metros de Hileras por Ha.
tH	Tiempos de Hilerado
CTH	Capacidad de Trabajo de Hileradora
tETH	Tiempo Efectivo de Trabajo de Hileradora
NT	Número de Turnos

---

NHT	Número de Hileradoras Trabajando
CTHxT	Capacidad de Trabajo de Hileradora por Turno
MVE	Muestras de Velocidad de Enfardadora
mE	Metros de Enfardado por Ha.
tE	Tiempos de Enfardado
CTE	Capacidad de Trabajo de Enfardado
tETE	Tiempo Efectivo de Trabajo de Enfardado
NET	Número de Enfardadoras Trabajando
CTExT	Capacidad de Trabajo de Enfardadora por Turno
MVA	Muestras de Velocidad de Alzadora
mA	Metros de Alzado por Ha.
tA	Tiempos de Alzado
CTA	Capacidad de Trabajo de Alzadora
tETA	Tiempo Efectivo de Trabajo de Alzadora
NAT	Número de Alzadoras Trabajando
CTAxT	Capacidad de Trabajo de Alzadoras por Turno
POL	Programación de Operación Logística
PPDn	Precipitación Pluvial por Día
PPP	Parámetro de decisión si se detiene operación por Precipitación Pluvial
DPxLL	Días Perdidos por Lluvias
DEZ	Días Efectivos de Zafra
DZ	Días de Zafra
DPxLL	Días Perdidos por Lluvia
PRAC	Producción de RAC por Zafra

---

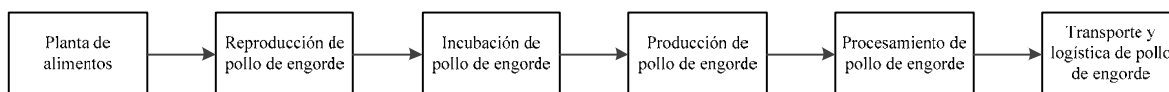
## ANEXO 3. CADENAS DE VALOR AGROINDUSTRIAL

El costo de oportunidad en el sub-aprovechamiento de la energía contenida en esta biomasa, da origen a diversas estrategias de negocio en el grupo corporativo, permitiendo que se logren reducir los costos en diferentes áreas relacionadas con la energía térmica, energía eléctrica, biomasa y reducción de emisiones de dióxido de carbono entre las cadenas de valor que forman la red, al generar o aumentar un retorno de utilidad sobre el escenario actual.

A continuación se presenta el detalle de evaluación de las cadenas de valor basados en la metodología de siete etapas utilizando los cuatro tipos de residuos (pollinaza, lodos residuales, RAC y bagazo) que se presentan en el Capítulo 5.

### 3.1. Cadena de valor avícola utilizando pollinaza

El proceso de la cadena de valor avícola tiene seis eslabones, entre los que destacan la producción y procesamiento de aves debido a que en ellos se generan los residuos que se evalúan para generar bioenergía, en la Figura 39 se presenta la secuencia de transformación de la cadena de valor avícola de las principales etapas del proceso.



**Figura 39. Cadena de valor avícola**

En el eslabón de producción de pollo de engorde se genera la pollinaza, que es un residual “sin aprovechamiento energético”, este residuo es la excreta de pollos de engorde que se encuentra mezclada con cascarilla de arroz que se emplea como cama, alimento no digerido, orina, mucosa intestinal, secreciones glandulares, microorganismos, plumas, insectos, pigmentos, trazas de medicamentos, etc. que se genera durante el ciclo de crecimiento del ave durante 40 días más 30 días, posteriormente se realiza una limpieza y desinfección para eliminar virus o enfermedades que hayan quedado de la parvada anterior y para garantizar la salud de la nueva parvada.

La pollinaza se clasifica y vende por su grado de humedad en seca, semi-húmeda y húmeda para ser empleada en diversos usos distintos al energético, para efectos de esta investigación la pollinaza se clasifica por su contenido de humedad a 25%, a 30%, a 35% y 40%.



En la Figura 40 se muestra de manera general los factores que intervienen en la generación de la pollinaza, durante el crecimiento del pollo de engorde, el recuadro central representa el eslabón de “producción” de la cadena de valor avícola, a la izquierda se ubican las materias primas e insumos que entran al sistema de producción, a la derecha se encuentran los productos y subproductos que se producen y se generan durante el proceso, en la parte inferior se encuentran algunos de los factores y recursos que afectan y determinan la calidad y cantidad de los productos y subproductos durante su transformación.

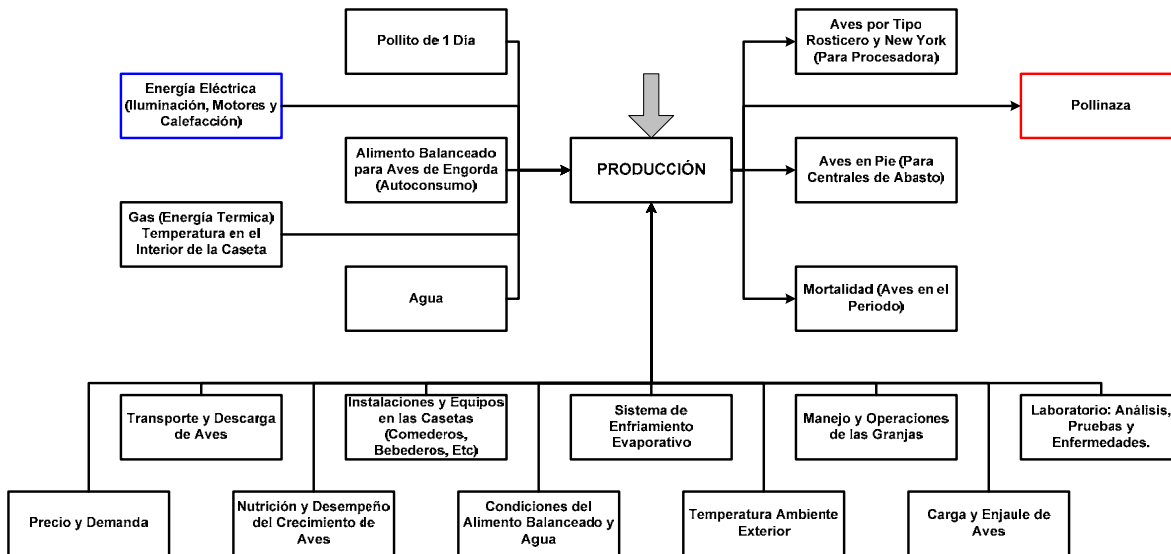


Figura 40. Sistema en el eslabón de producción de la cadena de valor avícola

La cadena de Valor Avícola está ubicada en distintos municipios en el estado de Veracruz concentrando su actividad en el municipio de Córdoba, Veracruz.

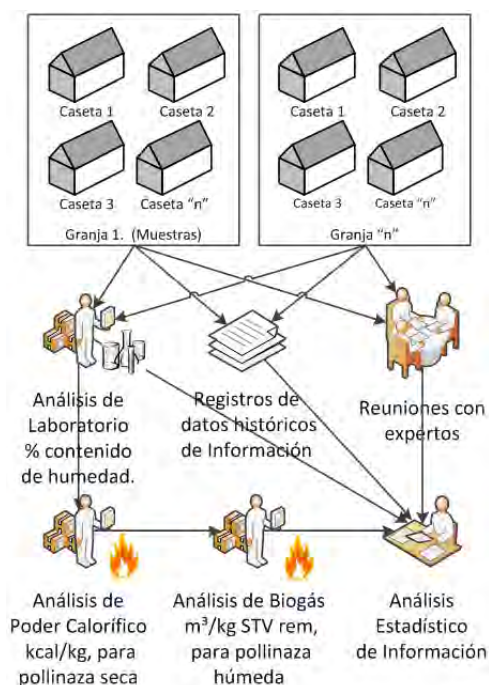
### 3.1.1. Análisis del sistema de producción de pollinaza

En el mundo se producen 311 millones de toneladas de carne para consumo humano a un ritmo de crecimiento del 1.1%, el 34.5% es carne de ave con 107.6 millones de toneladas, de los cuales el 80% es carne de pollo de engorde equivalente a 86 millones de toneladas. (FAO, 2014, USDA, 2014).

México es el 7 productor de carne de pollo de engorde en el mundo con 3 millones de toneladas, y el estado de Veracruz es el segundo productor de carne de pollo con el 10.5% a nivel nacional.

Resultado de las reuniones con los expertos de diversas áreas y de registros estadísticos, se obtuvo el comportamiento estadístico de las 13 variables de entrada que intervienen en una red neuronal y

un modelo de lógica difusa para determinar cómo afectan al contenido de humedad en la pollinaza, ver Figura 41.



**Figura 41. Análisis del sistema avícola**

Las granjas tienen en su interior un número variable de casetas, que son los espacios destinados para la producción de los pollos de engorde. Se utiliza como base la cascarilla de arroz para preparar la cama de los pollos por su disponibilidad y bajo costo.

El manejo adecuado de la caseta se requiere emplear la combinación de ventiladores, extractores, rociadores, bebederos, comederos, entre otros equipos para poder proporcionar el confort adecuado al pollo de engorde, brindando una reducción de humedad en la pollinaza y una reducción de temperatura en el interior de la granja a través de enfriamiento evaporativo. La selección de estos equipos depende de las políticas de estandarización de equipos, de la experiencia y entrenamiento del encargado de la granja.

La calidad de la pollinaza es la variable de salida y se clasifica en tres tipos dependiendo de su porcentaje de humedad, la pollinaza seca tiene un contenido de humedad menor a 26%, la pollinaza semi-húmeda contiene entre 23% y 37% de humedad, la pollinaza húmeda contiene más de 35% hasta 60% de humedad.

Para efectos de análisis se evalúan cuatro escenarios a diferente contenido de humedad, la pollinaza que tiene un 25% humedad, un 30% de humedad, un 35% de humedad y un 40% de humedad. El precio de venta de la pollinaza depende de su contenido de humedad, mientras más seca es mejor, más cara y de mejor calidad.

Las 13 variables que actúan las granjas y afectan el contenido de humedad en la pollinaza en el interior de la caseta son: 1) la temperatura ambiente promedio en el exterior de la caseta, 2) los días de estancia, que es el periodo que tarda el pollo en crecer y alcanzar su peso, 3) la densidad de pollos, es el número de pollos de engorde que se encuentran en un metro cuadrado, 4) la cantidad de extractores instalados en la caseta, 5) la cantidad de ventiladores instalados en la caseta, 6) la cubierta es el tipo de material utilizado para el techo en el exterior de la caseta, 7) el forro del techo es el tipo de material utilizado con el que ha sido forrado el techo en el interior de la caseta, 8) el tipo de comedero es el diseño del equipo que se utiliza para alimentar a los pollos de engorde, 9) el tipo de bebedero es el diseño del equipo que sirve para que beba agua el pollo de engorde, 10) nebulizadores instalados en el interior de la caseta, estos equipos son aspersores de gotas de agua de tamaño muy pequeño, 11) sombra miento es la característica que permite dar sombra y reducir su exposición al sol de las granjas al tener árboles plantados en los laterales de las casetas, 12) el tipo de área en el interior de la caseta donde se aloja la pollinaza antes de ser retirada, y 13) el manejo es el conocimiento y experticia que tiene el operador responsable de la granja para el cuidado de los pollos durante su crecimiento.

El análisis del sistema fue realizado utilizando 108 registros y/o muestras, en la Tabla 3 se representan solo 11 registros, ver Tabla 60

Tabla 60. Registros del análisis del sistema

<b>Variables</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
1) Manejo	7	8	8	2	9	2	8	10	3	3	8
2) Cantidad de extractores	12	0	0	12	13	12	0	12	0	0	0
3) Densidad por metro cuadrado	13.5	12.5	17	14.5	13.5	14.5	17	15	17	17	17
4) Temperatura (°C)	25.11	18.85	25.39	25.11	26.35	25.11	18.55	25.11	19.69	19.54	23.89
5) Forro del Techo	1	1	1	2	1	2	1	1	3	3	1
6) Días de estancia	49	37	37	49	49	49	37	49	37	38	37
7) Cantidad de ventiladores	0	13	14	0	0	0	0	0	4	4	0
8) Área al interior de la caseta	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2
9) Tipo de comedero	1	1	3	2	1	2	1	1	1	1	3
10) Sombreamiento	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1	2
11) Cubierta del Techo	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	2
12) Tipo de bebedero	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
13) Foggers	1	2	1	1	2	1	2	1	2	2	2
<b>% contenido de humedad</b>	<b>0.176</b>	<b>0.18</b>	<b>0.183</b>	<b>0.2</b>	<b>0.216</b>	<b>0.296</b>	<b>0.32</b>	<b>0.37</b>	<b>0.406</b>	<b>0.456</b>	<b>0.493</b>

En esta etapa se tomaron dos bloques de muestras de pollinaza, una de 4 muestras y otra de 8 muestras, para ser enviadas al laboratorio para practicarles diversos análisis químicos, físicos y energéticos. Los resultados se presentan y utilizan en la sección de anexos 3.1.4 Balance de materia y energía utilizando combustión. de la pollinaza.

### 3.1.2. Control de variables para mejorar la calidad de la pollinaza

El sistema de producción avícola que determina la calidad de la pollinaza no es de tipo lineal, se requiere aplicar técnicas que permitan su interpretación para poder manipularlo y controlarlo, por este motivo el presente trabajo propone utilizar una red neuronal artificial (RNA) y un modelo de lógica difusa (LD) para determinar el patrón de comportamiento de las variables que influyen en el nivel de humedad de la pollinaza.

Los resultados de las técnicas de inteligencia artificial determinan las mejores prácticas avícolas que deben realizarse para controlar el nivel de humedad, que como consecuencia se verá reflejado en el rendimiento de la bioenergía. A partir de los resultados de RNA y LD se realiza un análisis de factibilidad para determinar la estrategia de negocios más rentable a partir de la tecnología que maximice la generación de bioenergía.

#### 3.1.2.1. Aplicación de una red neuronal artificial para el control de la humedad en la pollinaza.

Durante el ciclo de producción de pollos de engorde es muy difícil identificar y predecir el comportamiento de los factores que determinan el contenido de humedad en la pollinaza, que en consecuencia afectan su nivel de calidad, clasificándola en seca, semi-húmeda y húmeda.

Se propone el uso de una red neuronal artificial (RNA) para realizar predicciones sobre el contenido de humedad en la pollinaza, a partir de los parámetros de operación de las 13 variables que actúan en el sistema de producción de aves de engorde, ver Tabla 61.

**Tabla 61. Variables de entrada seleccionadas para la red neural artificial**

<b>Variables de Entrada</b>	<b>Descripción</b>
Número de extractores	Cantidad de extractores por caseta.
Número de ventiladores	Cantidad de ventiladores por caseta.
Días de estancia	Periodo de tiempo desde que se introduce el ave hasta que se extrae la pollinaza.
Densidad por metro cuadrado	Cantidad de aves por metro cuadrado.
Cobertura	Material del techo de las casetas (lámina o asbesto).
Forro del techo	Material del que se encuentra forrado el techo: falso plafón, formular o spreado.
Tipo de comedero	Los comederos dentro de las casetas pueden ser ovalados,

	redondos o de bote, los ovalados y redondos a su vez pueden ser automáticos o manuales.
Tipo de bebedero	Niple o campana.
Aspersores/Nebulizadores	Si se cuenta o no con el sistema de rociadores.
Manejo	Es la persona encargada del manejo de la cama
Temperatura promedio externa	Temperatura promedio durante el segundo semestre del año 2011 (CONAGUA: comisión nacional de agua en México).
Sombreamiento	Si hay o no árboles sembrados en un costado de las casetas.
Área	Se pueden identificar claramente dos áreas en las casetas donde se concentra en mayor medida cierta calidad de pollinaza, en el área 1 pollinaza de baja humedad y en el área 2 de alta humedad

Una RNA es una técnica de Inteligencia Artificial (I.A.) que funciona a través de un modelo matemático que predice el patrón de comportamiento de sistemas lineales y no lineales. Las redes neuronales se agrupan en dos categorías en función del patrón de conexiones que presentan, las redes de alimentación hacia delante y las de retroalimentación o recurrentes.

Las redes de alimentación hacia adelante, son aquellas donde no existen ciclos o retroalimentaciones, sus conexiones unidireccionales solo permiten señales hacia un sentido entre las neuronas de cada capa, y pueden ser de tipo Monocapa (de perceptrón simple), Multicapa (de perceptrón multicapa) y de función de base radial, este tipo de estructuras no tiene memoria.

Las redes de retroalimentación o recurrentes, presentan al menos un ciclo cerrado de activación neuronal, se distinguen por la existencia de lazos de retroalimentación entre las neuronas de la misma o diferentes capas y pueden ser de tipo competitivo, de mapa auto organizado de Kohonen (SOM por sus siglas en ingles), de Hopfield y de teoría de resonancia adaptativa (ART por sus siglas en ingles), este tipo de estructuras presentan memoria para realizar la retroalimentación.

Los pasos para programar una red neuronal son: diseño de la arquitectura, entrenamiento, validación y prueba. El diseño de una neurona artificial se representa en la Figura 42. La red está definida por elementos de entrada, por la multiplicación y suma de los pesos sinápticos y las bias (sesgo), por una función de transferencia y por los elementos de salida

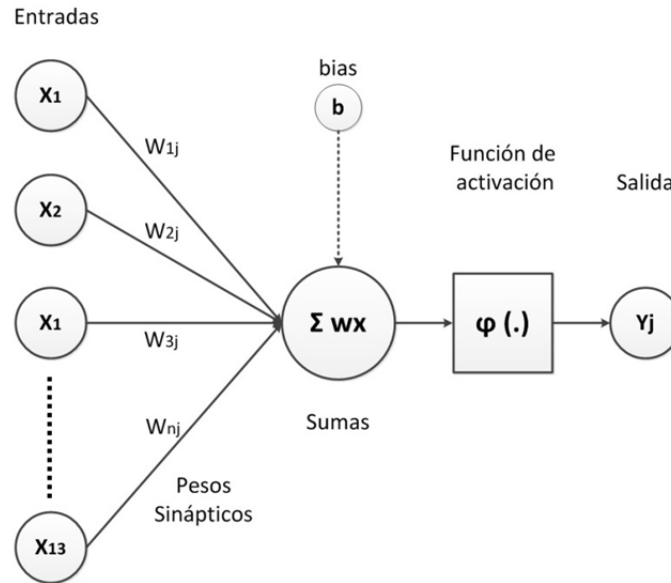


Figura 42. Arquitectura de la neurona artificial

Se utiliza una RNA de alimentación hacia adelante con entrenamiento de retropropagación programada en Neural Network de Matlab. El diseño de la RNA es de tipo perceptrón multicapa, y se caracteriza porque las neuronas están organizadas en capas y sus conexiones entre ellas se orientan estrictamente hacia una sola dirección de una capa a otra. El diseño de una red neuronal artificial se representa en la Figura 43.

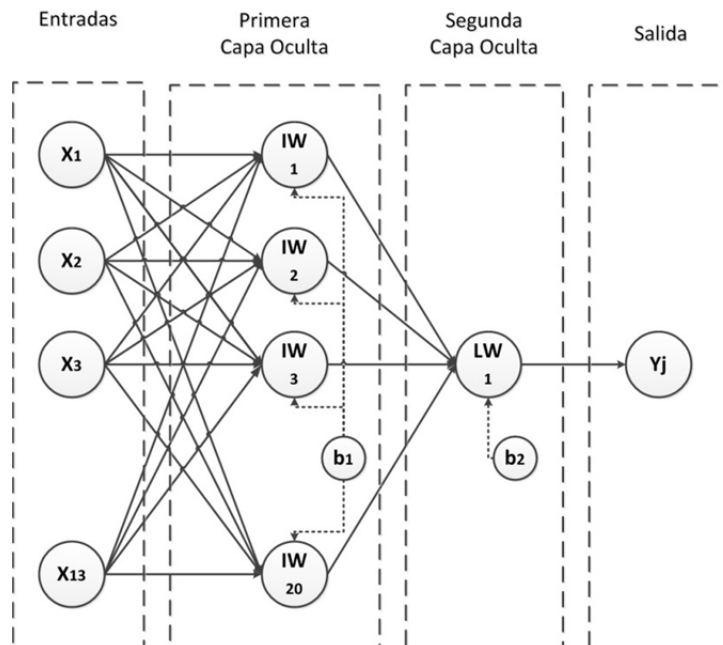


Figura 43. Arquitectura de la red neuronal artificial

La expresión matemática utilizada en la neurona artificial se indica en la Ecuación 121.

**Ecuación 121. Función matemática de la neurona artificial**

$$y_j = f\left(\sum_{i=0}^n w_{ji}x_i + b\right)$$

Donde ( $x_j$ ) son los valores de entrada, ( $w_{ji}$ ) son los coeficientes de los pesos de la neurona  $j$ , ( $b$ ) es bias, que es considerado un valor de sesgo que permite ajustar los pesos de la neurona para lograr un error mínimo de salida, ( $y$ ) son los valores de salida, y ( $f$ ) es la función de transferencia sigmoide. Los pesos de los datos de entrada son seleccionados de manera aleatoria, en un rango normalizado entre [-1,1], para lograrlo se utiliza la función de MAPMINMAX de Matlab para normalizar el valor mínimo y máximo de cada elemento de entrada y salida. La expresión matemática de la función Sigmoide se indica en la Ecuación 122.

**Ecuación 122. Función Sigmoide**

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

Existen diferentes algoritmos para el entrenamiento de la red neuronal artificial, estos algoritmos son técnicas matemáticas o heurísticas bien establecidas para obtener los valores de los pesos sinápticos y parámetro de bias (sesgo) diferenciándose entre ellos por la forma en que el factor de corrección es obtenido.

Los algoritmos de entrenamiento para una red neuronal son Levenberg-Marquardt, regularización Bayesiana, BFGS Quasi-Newton donde “BFGS” quiere decir Broyden, Fletcher, Goldfarb, and Shanno, de retropropagación elástica, batch con reglas de aprendizaje de pesos y sesgos, de retropropagación de gradiente conjugado Powell – Belae, Fletcher – Powell, Polak – Rubiere, escalado, de retropropagación de gradiente descendente, con tasa de aprendizaje adaptativa, con momento, de retropropagación secante de un solo paso, incremental de actualización de orden aleatorio, de orden secuencial, y de orden cíclico.

El método de entrenamiento Levenberg-Marquardt generalmente es el más rápido, seguido del método BFGS Quasi-Newton, se recomiendan utilizarlos para redes que tienen un número pequeño o mínimo de salidas (*Ghaffari et al.. 2006*) por su mejor ajuste en problemas no lineales para minimizar la suma del error cuadrático medio, no se recomienda utilizarlo para redes neuronales



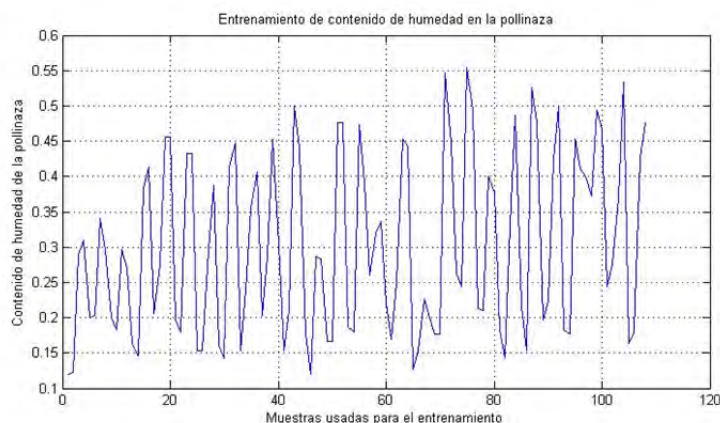
grandes, con miles de pesos ya que requieren de mayor memoria y tiempo de cálculo para la realización de las operaciones.

Estudios realizados para estimar la temperatura de fondo en pozos geotérmicos utilizando una RNA, indican que el algoritmo de más rápida convergencia para alcanzar una solución óptima es el Levenberg-Marquardt porque requiere de menos iteraciones cuando el diseño de la RNA tiene menos de 20 neuronas y una salida (Díaz-González *et al.* 2013).

Por esta razón se programa la RNA con el algoritmo Levenberg-Marquardt, utilizando la función de entrenamiento TRAINLM. Se utiliza la función de aprendizaje de adaptación LEARNNGDM, la función de desempeño MSE que expresa el error cuadrático medio y se definen dos capas ocultas, en la primera utiliza 20 neuronas y un bias, en la segunda capa solo una neurona y un bias.

El entrenamiento utiliza resultados de pruebas de laboratorio provenientes de 108 muestras, en combinación con registros históricos para estructurar una sólida base de datos. Mediante entrevistas a personal de diversas áreas y en conjunto con los expertos se identificaron y seleccionaron trece variables de entrada, que afectan la variable de salida “contenido de humedad en la pollinaza”

El entrenamiento de la red tiene un error cuadrático medio (MSE) de 0.0014 y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) es de 0.0368, este comportamiento se aprecia en la Figura 44.



**Figura 44. Entrenamiento de la red neuronal artificial con 108 muestras.**

La validación se realiza con 86 muestras cuyo resultado fue un MSE de 0.000519 y un RMSE de 0.0228, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de predicción de la validación es de 0.9503, la Figura 45 se muestra su comportamiento.

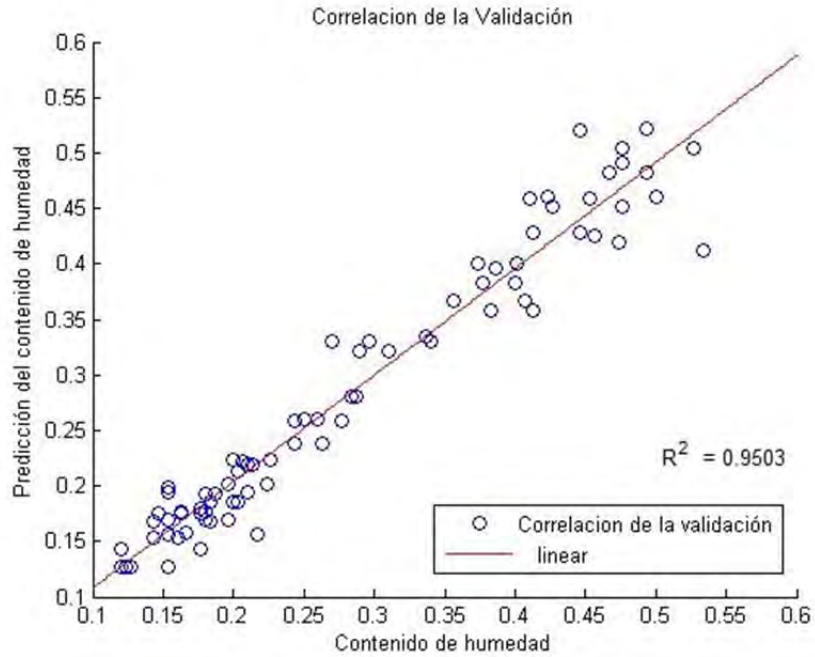


Figura 45. Correlación de la validación de la red neuronal artificial con 86 casos.

La prueba se realiza con 20 muestras nuevas para la predicción, logrando un MSE de 0.000100 y un RMSE de 0.01, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de predicción de la prueba es 0.9676, ver Figura 46.

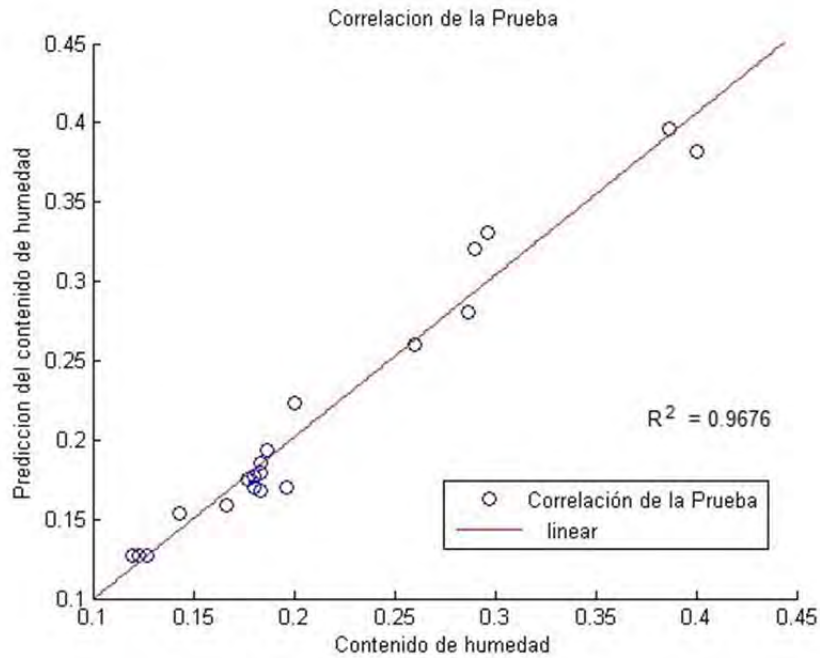


Figura 46. Correlación de la prueba de la red neuronal artificial con 20 casos

La capa oculta 1 utiliza pesos sinápticos normalizados de [-1,1], ver Tabla 62 y Tabla 63. Los bias de las capas se aprecian en la Tabla 64 y Tabla 65.

**Tabla 62. Pesos sinápticos de la capa oculta 1**

Capa 1	Neurona	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13
IW,1	{1,1}(1)'=	-0.167	-0.326	0.5034	0.064	0.6112	0.2671	-0.614	0.5983	0.1855	-0.718	-0.729	-0.471	-0.479
IW,1	{1,1}(2)'=	0.4127	0.8760	0.0618	-0.322	0.5154	0.3406	0.6371	-0.469	0.2692	0.6599	0.4663	-0.486	0.3013
IW,1	{1,1}(3)'=	0.6840	-0.002	-0.400	-0.143	0.7771	-0.400	-0.495	0.0558	-0.604	0.6646	-0.758	0.2287	0.1022
IW,1	{1,1}(4)'=	0.7574	0.3734	-0.671	0.460	-0.608	0.5370	0.5161	-0.101	-0.005	-0.764	-0.109	-0.305	-0.325
IW,1	{1,1}(5)'=	0.8201	-0.826	0.2134	-0.265	-0.176	-0.349	-0.274	-0.580	-0.321	0.0401	-0.785	0.5524	0.2074
IW,1	{1,1}(6)'=	0.6637	0.1764	-0.796	-0.062	-0.013	-0.792	0.2866	0.1682	0.1316	0.2518	0.7969	0.6426	0.3616
IW,1	{1,1}(7)'=	0.5407	0.1130	-0.647	-0.195	-0.357	-0.601	-0.661	0.6468	0.6559	-0.169	0.0330	0.6585	-0.324
IW,1	{1,1}(8)'=	0.5101	0.5210	-0.627	0.304	-0.784	0.5049	0.3971	-0.664	-0.123	0.2530	0.6943	-0.185	-0.148
IW,1	{1,1}(9)'=	0.1036	0.2921	-0.093	0.1277	0.8943	0.3985	-0.008	0.7541	-0.880	0.4955	-0.220	0.5680	-0.259
IW,1	{1,1}(10)'=	-0.138	0.6452	0.2940	0.2589	0.3862	0.4834	0.7562	0.0860	0.7326	0.1292	0.6558	-0.584	0.4805
IW,1	{1,1}(11)'=	-0.649	0.7012	0.6206	-0.015	-0.613	0.2159	-0.366	-0.126	0.7406	0.2299	-0.426	0.2181	-0.635
IW,1	{1,1}(12)'=	0.2783	-0.626	-0.002	-0.182	-0.633	0.5857	-0.222	-0.625	-0.255	-0.399	0.7363	0.3582	0.7237
IW,1	{1,1}(13)'=	0.5334	-0.450	-0.661	-0.033	0.3001	-0.681	-0.566	-0.370	-0.351	0.4980	0.5782	-0.606	-0.308
IW,1	{1,1}(14)'=	-	0.6135	-0.392	-0.913	-0.250	-0.199	0.9802	-0.110	0.6049	-0.154	-0.214	0.0657	-0.009
IW,1	{1,1}(15)'=	0.4753	0.6508	-0.840	0.2709	-0.170	-0.810	-0.478	-0.129	0.0627	0.0221	0.2518	0.2392	0.7434
IW,1	{1,1}(16)'=	-0.794	-0.203	0.5299	0.868	-0.165	-0.035	-0.768	-0.268	0.1157	0.6171	0.1251	-0.437	0.3276
IW,1	{1,1}(17)'=	-0.212	-0.351	-0.370	0.493	-0.626	0.6688	0.3805	0.4796	0.3245	-0.403	0.6928	-0.465	-0.614
IW,1	{1,1}(18)'=	-0.441	0.4462	-0.004	0.436	0.5695	-0.417	0.0129	0.7272	-0.776	-0.189	-0.544	0.6471	0.3744
IW,1	{1,1}(19)'=	-0.546	-0.623	0.5012	0.418	0.6773	0.1560	-0.270	0.3685	0.5865	0.0854	-0.781	-0.007	-0.584
IW,1	{1,1}(20)'=	0.1962	0.4383	0.1425	0.384	-0.742	-0.709	0.3798	-0.140	0.6636	-0.084	0.5702	-0.520	0.6681

**Tabla 63. Pesos sinápticos de la capa oculta 2**

Capa 2	Neuronas	A1
LW{2}	{2,1}(1)'=	0.7728
LW{2}	{2,1}(2)'=	0.0300
LW{2}	{2,1}(3)'=	0.3588
LW{2}	{2,1}(4)'=	0.9536
LW{2}	{2,1}(5)'=	-0.7491
LW{2}	{2,1}(6)'=	0.5045
LW{2}	{2,1}(7)'=	0.6541
LW{2}	{2,1}(8)'=	0.5629
LW{2}	{2,1}(9)'=	-0.6182
LW{2}	{2,1}(10)'=	-0.1427

LW{2}	{2,1}(11)'=	-0.9711
LW{2}	{2,1}(12)'=	-0.3494
LW{2}	{2,1}(13)'=	-0.7306
LW{2}	{2,1}(14)'=	-0.0990
LW{2}	{2,1}(15)'=	0.1446
LW{2}	{2,1}(16)'=	0.5841
LW{2}	{2,1}(17)'=	-0.1605
LW{2}	{2,1}(18)'=	0.0651
LW{2}	{2,1}(19)'=	0.8514
LW{2}	{2,1}(20;:)'=	0.7982

Tabla 64. Bias de la capa oculta 1

Bias	Neuronas	b{1}
b{1}	{1,1}(1)'=	1.7628
b{1}	{1,1}(2)'=	-1.5773
b{1}	{1,1}(3)'=	-1.3917
b{1}	{1,1}(4)'=	-1.2061
b{1}	{1,1}(5)'=	-1.0206
b{1}	{1,1}(6)'=	-0.8350
b{1}	{1,1}(7)'=	-0.6495
b{1}	{1,1}(8)'=	-0.4639
b{1}	{1,1}(9)'=	-0.2783
b{1}	{1,1}(10)'=	0.0928
b{1}	{1,1}(11)'=	-0.0928
b{1}	{1,1}(12)'=	0.2783
b{1}	{1,1}(13)'=	0.4639
b{1}	{1,1}(14)'=	-0.6495
b{1}	{1,1}(15)'=	0.8350
b{1}	{1,1}(16)'=	-1.0206
b{1}	{1,1}(17)'=	-1.2061
b{1}	{1,1}(18)'=	-1.3917
b{1}	{1,1}(19)'=	-1.5773
b{1}	{1,1}(20)'=	1.7628

Tabla 65. Bias de la capa oculta 2

Bias	Neuronas	b{2}
b{2}	{2,1}(1)'=	0.08967

Para determinar la contribución relativa (CR) de las 13 variables de entrada de la RNA se utiliza el Algoritmo de Garson (*Garson, 1991*), definido en la Ecuación 123 que sirve para determinar en qué grado influye cada variable de entrada sobre el comportamiento del contenido de humedad en la pollinaza.

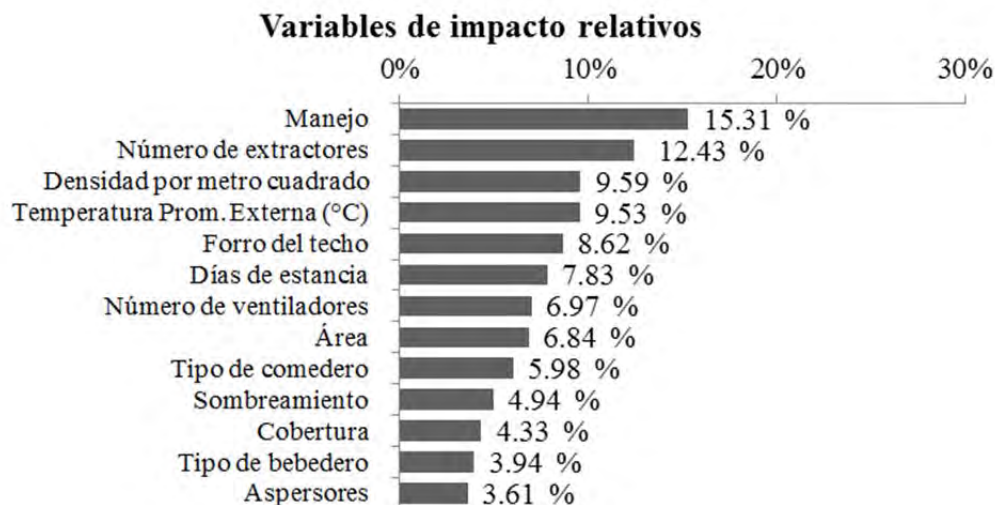
**Ecuación 123. Algoritmo de Garson**

$$CR_p = \frac{\sum_{j=1}^n |w_{jp}| |v_j|}{\sum_{k=1}^I |w_{jk}|} \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^n |w_{jp}| |v_j|}{\sum_{k=1}^I |w_{jk}|}$$

En donde  $p$  es la entrada de la cual desea conocer su contribución relativa,  $n$  es el número de las neuronas ocultas,  $j$  es la  $j$ -ésima neurona oculta,  $I$  es el número de entradas de la RNA,  $w_{jp}$  es el peso sináptico de la entrada  $p$  hacia la neurona  $j$ ,  $v_j$  es el peso sináptico de la neurona  $j$  hacia la salida,  $w_{jk}$  es el peso sináptico de la entrada  $k$  hacia la neurona  $j$ .

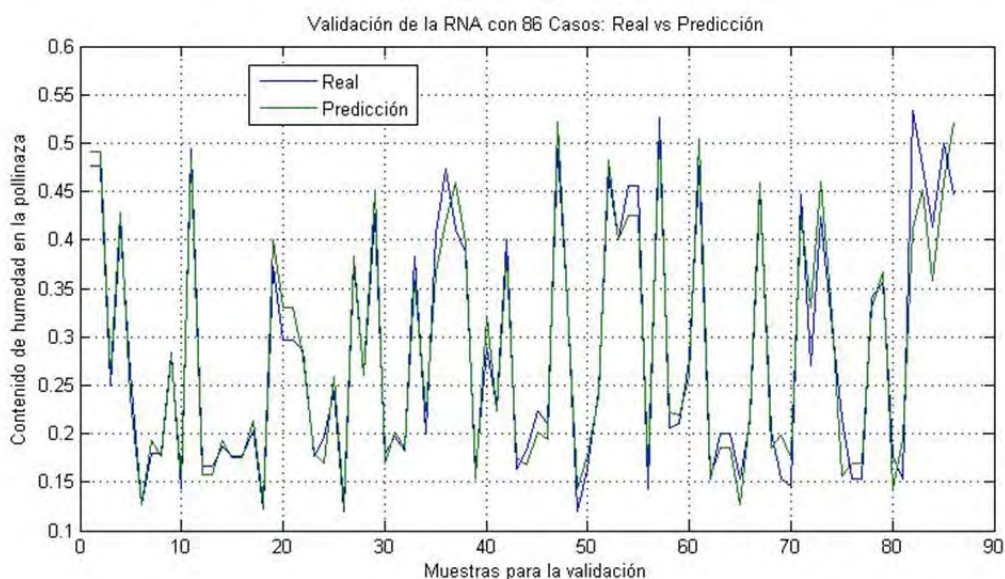
La Figura 47 muestra un gráfico de tornado el cual representa la contribución relativa cada variable de entrada y su impacto a la variable de salida que determina el contenido de humedad.

Se puede observar que la variable de entrada que más impacta en el sistema avícola es el manejo, que es la experticia que tiene el trabajador en la operación de la granja. Las siguientes variables de impacto son el número de extractores y densidad por metro cuadrado.



**Figura 47. Variables de impacto relativos al contenido de humedad**

Los resultados del entrenamiento de la red neuronal artificial muestran que las diferencias entre los valores reales y la predicción de la validación con 86 casos con una  $R^2$  de 95.03% (el coeficiente de determinación  $R^2$ , indica un ajuste perfecto mientras más se acerque a 1), se puede decir que hay una fuerte relación lineal positiva, por lo que se considera que la red esta entrenada adecuadamente, ver Figura 48.



**Figura 48. Validación de la predicción de la red neuronal con 86 casos**

Los resultados de la prueba con 20 casos nuevos muestran un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 96.76%, logrando que las predicciones sean exitosas, ver Figura 49.

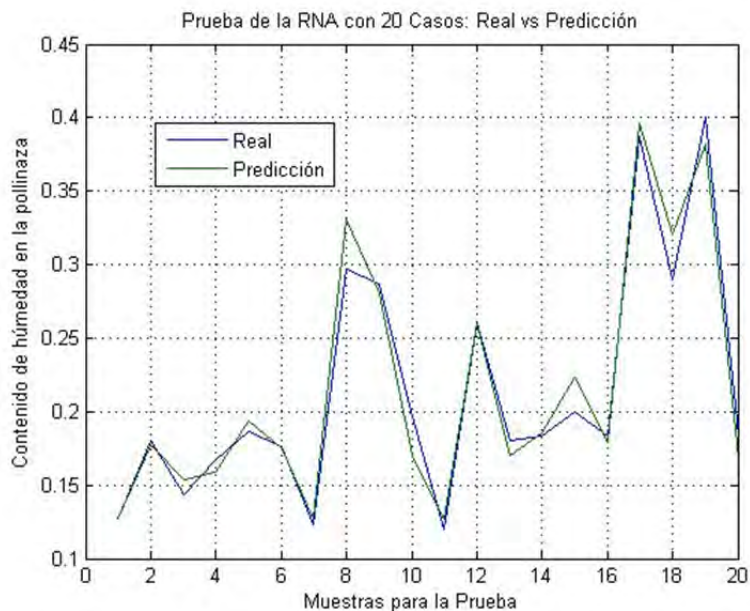


Figura 49. Validación de la prueba de la predicción de la red neuronal con 20 casos.

Una vez entrenada la red neuronal artificial y validada mediante la prueba, ya se pueden simular diferentes parámetros de las variables de entrada, para realizar la predicción de forma automática, ver Tabla 66.

Tabla 66. Predicciones de la prueba de la red neuronal artificial con 20 casos nuevos.

Área	Temperatura Prom. Externa (°C)	Foggers	Días de estancia	Manejo	Densidad por metro cuadrado	sombreamiento	Cober tura	Fo rro del tec ho	Tipo de com edero	Tipo de bebedero	Cantid ad de extract ores	Cantida d de ventilad ores	Contenid o de Humedad	Predicció n RNA de la Prueba con 20 Casos	Residual es del Error
1	26.17	2	49	3	13.5	2	2	3	1	1	14	0	0.1267	0.1270	0.0038
1	25.11	1	49	10	13.5	2	2	3	1	1	11	0	0.1800	0.1774	0.0006
1	26.85	2	49	3	13.5	2	2	3	1	1	11	0	0.1433	0.1536	0.0031
1	26.45	2	49	1	13.5	1	1	1	1	1	13	0	0.1667	0.1584	0.0001
1	18.85	2	37	8	12.5	2	2	1	1	1	0	13	0.1866	0.1934	0.0074
1	26.55	2	49	3	13.5	1	1	1	1	1	13	0	0.1767	0.1753	0.0003
1	25.17	2	49	1	13.5	1	1	1	1	1	14	0	0.1233	0.1272	0.0016
2	25.11	1	49	2	14.5	2	2	2	2	1	12	0	0.2967	0.3306	-0.0014
2	25.11	1	49	7	13.5	2	2	1	1	1	12	0	0.2867	0.2806	-0.0100
1	16.35	2	37	4	17	2	2	1	3	1	0	0	0.1967	0.1699	0.0251
1	25.17	2	49	1	13.5	1	1	1	1	1	14	0	0.1200	0.1272	-0.0017
1	18.55	2	37	8	17	2	2	1	1	1	0	0	0.2600	0.2601	0.0111
1	16.35	2	37	4	17	2	2	1	3	1	0	0	0.1800	0.1699	0.0084

1	25.11	1	49	2	14.5	2	2	2	2	1	12	0	0.1833	0.1852	-0.0142
2	26.17	2	49	3	13.5	2	2	3	1	1	14	0	0.2000	0.2234	-0.0069
1	25.39	1	37	8	17	2	1	1	3	1	0	14	0.1833	0.1792	0.0034
2	16.35	2	37	4	17	2	2	1	3	1	0	0	0.3867	0.3965	-0.0001
2	25.17	2	49	1	13.5	1	1	1	1	1	14	0	0.2900	0.3209	-0.0127
2	25.39	2	37	8	17	1	2	1	1	1	0	8	0.4000	0.3824	0.0114
1	18.69	2	49	6	13	2	2	1	1	1	4	16	0.1833	0.1679	0.0210

A partir de los resultados de la RNA, se determinaron las prácticas avícolas óptimas para obtener pollinaza seca y húmeda. En la Tabla 67, se muestra por ejemplo que para obtener pollinaza seca se puede lograr con una densidad baja de aves por metro cuadrado, porque se logra una mayor circulación de aire entre las aves al interior de la caseta, o utilizar un bebedero tipo niple que evita un desperdicio de agua al momento de que las aves beben agua. Para obtener pollinaza húmeda, la cantidad de extractores de aire debe ser menor a 7, ya que es muy probable que exista un contenido de humedad alto al interior de la caseta porque no se realiza una extracción efectiva de vapores de agua por la poca cantidad de extractores instalados.

**Tabla 67. Parámetros de control para el contenido de humedad.**

<b>Parámetros de la variables de control</b>	<b>Para pollinaza seca</b>	<b>Para pollinaza húmeda</b>
Área	1 (centro granja)	2 (perímetro interior granja)
Temp. Prom. Externa (°C)	Mayor a 25	Hasta 24
Rociadores	No (sin foggers)	SI o <b>NO</b>
Días de estancia	Hasta 44	Más de 47
Manejo (personal)	<b>1, 4, 5, 6, 8, 9</b>	10 o 6
Densidad por metro cuadrado	<b>13.5 - 14.5</b>	Más de 13.8
Sombreamiento	1 (si hay árboles sembrados al costado de las casetas)	2 (no hay árboles sembrados al costado de las casetas)
Tipo de Cobertura	Asbesto o <b>Lamina</b>	<b>Asbesto</b> o Lamina
Tipo de Forro del techo	<b>espreado</b> o Falso Plafón	espreado, Falso Plafón o <b>Formular</b>
Tipo de comedero	Redondo u Ovalado	Redondo
Tipo de bebedero	<b>Niple</b> o Campana	Niple o <b>Campana</b>



Cantidad de extractores	Mayor a 11	7 o menos
Cantidad de ventiladores	0 a 4	0
Combinaciones.	Posibles combinaciones de número de extractores y ventiladores respectivamente: 3 y 10, 4 y 7, 4 y 8	Posibles combinaciones de número de extractores y rociadores respectivamente: 11 y 7, 8 y 14

Mientras mayor sea el número de parámetros que se cumplan, mayor será el resultado en el contenido de humedad en la pollinaza que se desea lograr.

### 3.1.2.2. Aplicación de un modelo de lógica difusa para el control de la humedad de la pollinaza.

Se utiliza lógica difusa para administrar el comportamiento de las 13 variables que minimizan el contenido de humedad de la pollinaza en cuatro niveles de humedad en el interior de la granja antes de que sea utilizada como biocombustible para aumentar la producción de bioenergía durante su combustión.

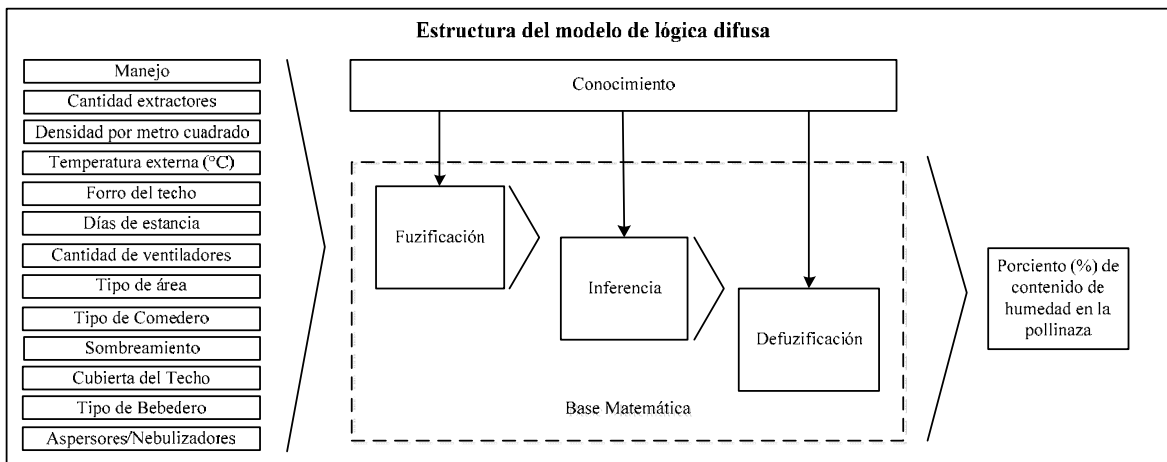
El modelo de lógica difusa permite reducir la humedad en la pollinaza, permitiendo mejorar la calidad de la cama al hacerla más seca para ser utilizada como combustible en el interior de una caldera para producir vapor a partir de su combustión.

El modelo de lógica difusa permite conocer el patrón de comportamiento de las variables que afectan el contenido de humedad en la pollinaza, para determinar el mejor conjunto de prácticas avícolas que nos permitan reducir su humedad al clasificar la pollinaza en seca, semi-húmeda y húmeda y evaluar escenarios de 25%, 30%, 35% y 40% de humedad.

El modelo de lógica difusa (LD) permite representar el conocimiento y experiencia de los especialistas en producción de pollo de engorde y pollinaza. Este trabajo de investigación utiliza un modelo de lógica difusa (FIS) programado en Fuzzy Logic Toolbox de Matlab.

Existen dos métodos de inferencia en lógica difusa el tipo Mamdani y el tipo Sugeno. El método Mamdani es el más común porque los conjuntos difusos de cada regla de inferencia se combinan a través de un operador de “Agregación” y el conjunto difuso resultante es defuzzificado para producir una salida y en el método Sugeno las funciones de pertenencia son lineales o constantes.

En la Figura 50 se presenta el modelo de inferencia utilizando el método Mamdani, con el tipo de implicación MIN.



**Figura 50. Estructura del modelo de lógica difusa**

El proceso de inferencia se realiza en 3 etapas. La primera etapa inicia con la Fuzzificación de las variables de entrada para determinar el grado de pertenencia que tienen en cada conjunto difuso definido por medio de las funciones de pertenencia. La variable lingüística es el nombramiento que se le asigna a cada conjunto difuso.

Se aplica un operador Fuzzy sobre las variables de entrada que han sido fuzzificadas y conocer el grado en que cada una de las variables lingüísticas que forman el antecedente se cumple para cada regla de inferencia válida.

En la segunda etapa se declaran las reglas de inferencia se declaran bajo reglas tipo IF-THEN y utilizan variables lingüísticas (A, B, etc.) que son definidas matemáticamente por conjuntos difusos, las reglas de este tipo asumen la forma IF “x es A” THEN “es B”. El argumento que se ubica antes de THEN se le llama antecedente o premisa y al argumento posterior a THEN se llama consecuencia o conclusión.

Si el antecedente de la regla de inferencia tiene más de una variable lingüística se aplican múltiples combinaciones de operadores lógicos (AND se utiliza para una intersección o conjunción, OR para una unión o disyunción y NOT como un complemento aditivo).

Se aplica el método de implicación para asignar un valor ponderado al antecedente para cada regla de inferencia válida y la salida es un conjunto difuso. Fuzzy Logic Toolbox de Matlab tiene disponibles el método MIN (mínimum) el cual trunca la salida del conjunto difuso y el método

PROD (product) que escala la salida del conjunto difuso. El modelo de lógica difusa de este trabajo utiliza el método de implicación tipo MIN, el método de agregación tipo MAX y tipo Centroide para la defuzificación.

Se desarrolla agregación que es el proceso por el cual los conjuntos difusos que representan las salidas de cada regla de inferencia se combinan en un único conjunto difuso de salida. Fuzzy Logic Toolbox de Matlab tiene disponibles el método MAX (maximum), el método PROBOR (probabilistic OR) y el método SUM (simply the sum of each rule's output set). El modelo de lógica difusa de este trabajo utiliza el método de implicación MAX.

Solo son válidas 67 reglas de inferencia para correr la prueba y realizar la validación del modelo, de un total de 138,240 combinaciones diferentes de reglas. Son muy pocas reglas debido al grado de estandarización de los equipos instalados en las granjas de producción de pollo de engorde, haciendo imposible ciertas combinaciones en las reglas.

Los conjuntos difusos y funciones de pertenencia de las 13 variables de entrada se pueden visualizar en la Figura 51.

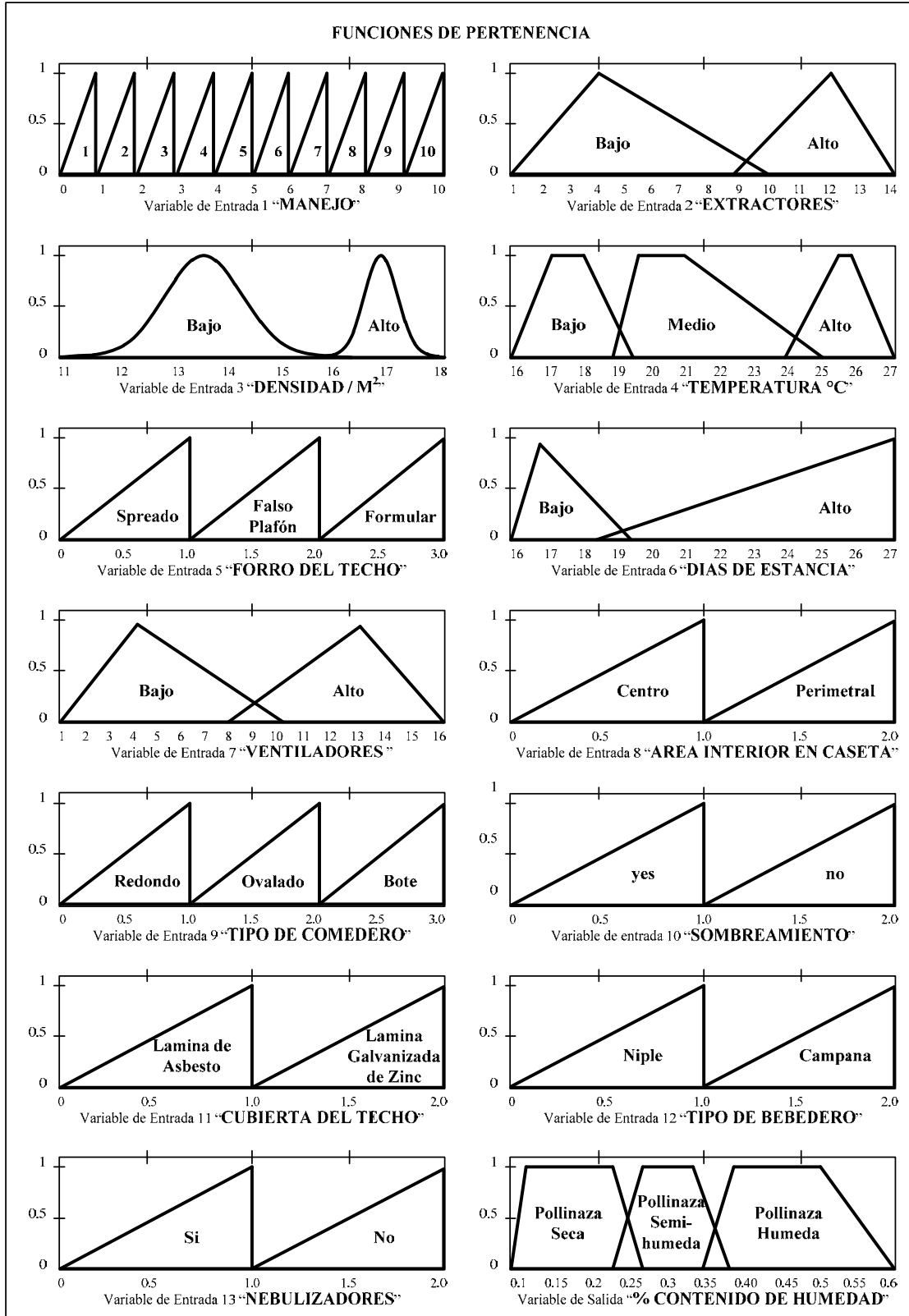
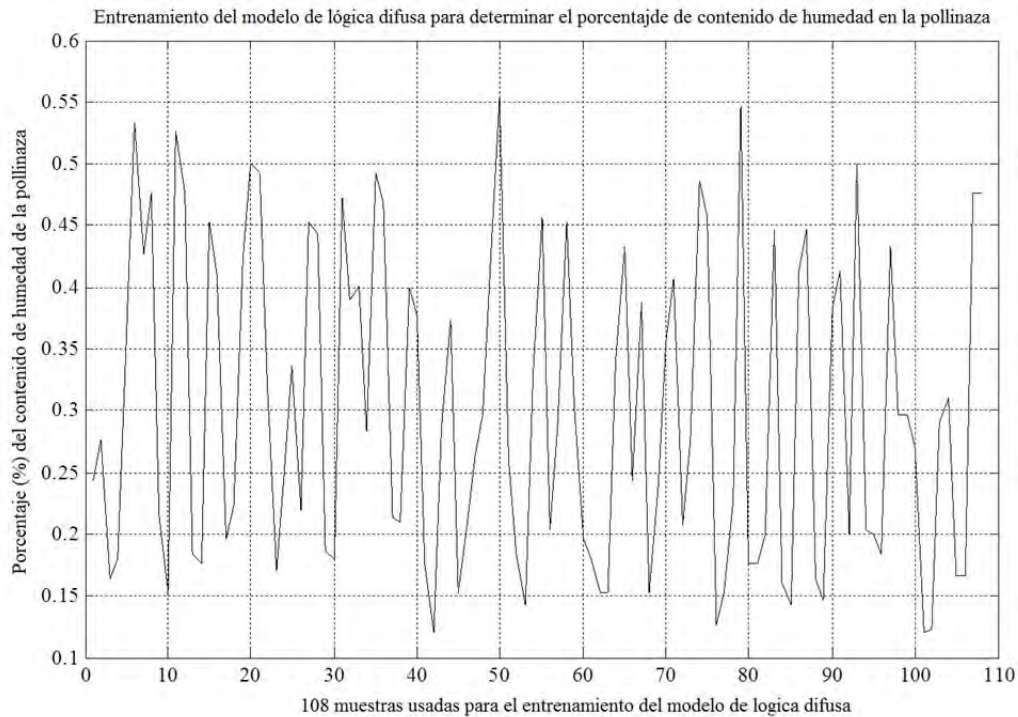


Figura 51. Representación gráfica de las funciones de pertenencia del modelo de lógica difusa

La tercera etapa es la defuzzificación que es el proceso en el que se obtiene el peso del conjunto difuso agregado. Fuzzy Logic Toolbox de Matlab están disponibles los métodos matemáticos del centroide, bisectrices, medio del máximo (el promedio del valor máximo del conjunto de salida), el más grande del máximo, y el más pequeño de máximo. Este trabajo utiliza el método del centroide.

Los resultados sobre el comportamiento del contenido de humedad en la pollinaza en el sistema real se representan 108 muestras en la Figura 52.



**Figura 52. Contenido de humedad de 108 muestras, en el modelo de lógica difusa**

Los resultados del modelo de lógica difusa muestran que las diferencias entre los valores reales y la predicción de la validación con 25 casos con una  $R^2$  de 90.32% (el coeficiente de determinación  $R^2$ , indica un ajuste perfecto mientras más se acerque a 1), se puede decir que hay una fuerte relación lineal positiva, por lo que se considera que la red esta entrenada adecuadamente, ver Figura 53.

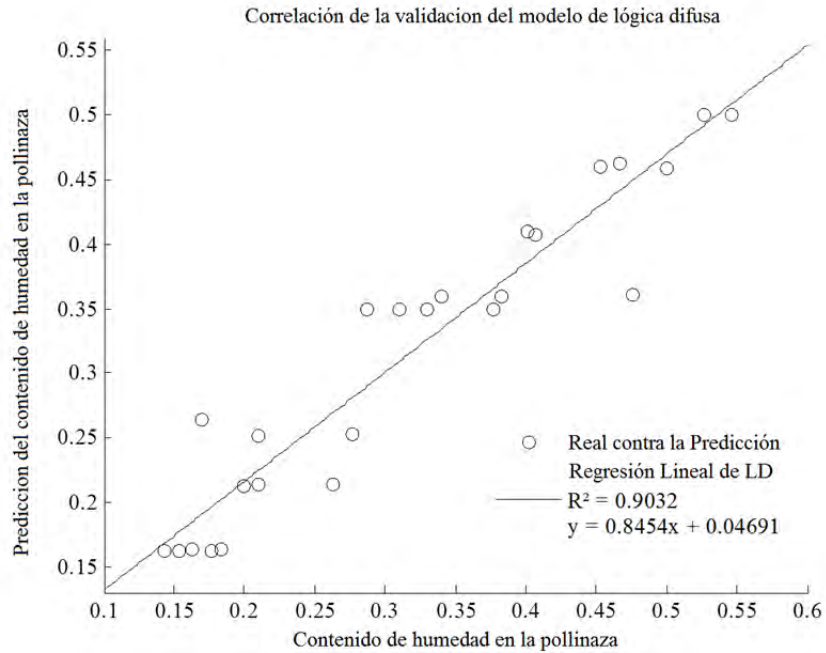


Figura 53. Correlación de la validación del modelo de lógica difusa con 25 casos.

Los resultados del modelo de lógica difusa de la prueba con 20 casos nuevos muestran un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 92.88%, logrando que las predicciones sean exitosas, ver Figura 54 y Tabla 68.

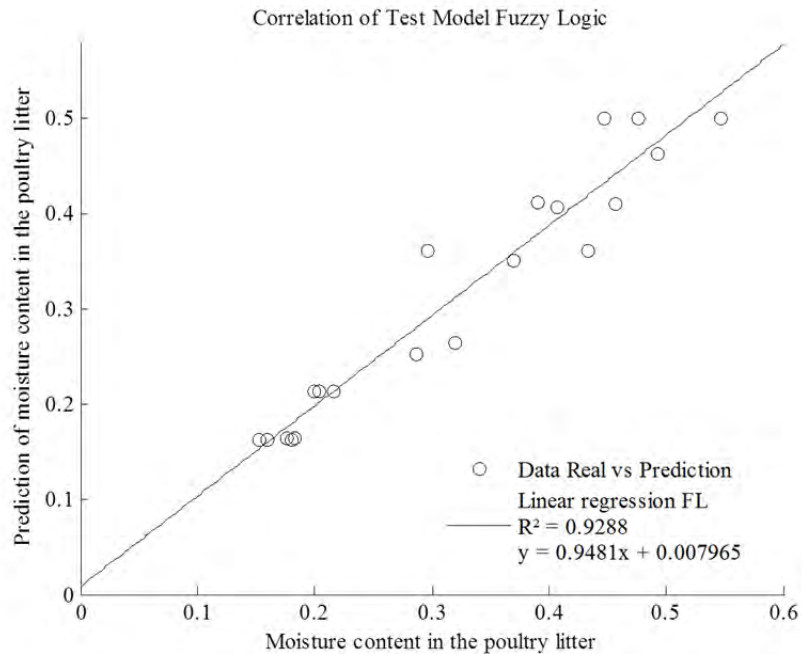


Figura 54. Correlación de la prueba del modelo de lógica difusa con 20 casos

Tabla 68. Predicciones de la prueba de Lógica Difusa con 20 casos nuevos.

Manejo	Cantidad de Extractores	Densidad	Temperatura (°C)	Forro del Techo	Días de estancia	Cantidad de Ventiladores	Área	Tipo de comedero	Sombreado	Cubierta del Techo	Tipo de bebedero	Fogger	% Contenido de Humedad	Predicción de lógica difusa con 20 casos nuevos
4	0	17	16.35	1	37	0	1	3	2	2	1	2	0.1533	0.162
3	11	13.5	26.85	3	49	0	1	1	2	2	1	2	0.16	0.162
7	12	13.5	25.11	1	49	0	1	1	2	2	1	1	0.1767	0.163
8	0	12.5	18.85	1	37	13	1	1	2	2	1	2	0.18	0.162
8	0	17	25.39	1	37	14	1	3	2	1	1	1	0.1833	0.163
2	12	14.5	25.11	2	49	0	1	2	2	2	1	1	0.2	0.212
2	12	14.5	25.11	2	49	0	1	2	2	2	1	1	0.2033	0.212
9	13	13.5	26.35	1	49	0	1	1	1	1	1	2	0.2166	0.212
5	0	16	19.69	1	37	0	1	3	1	2	2	2	0.2867	0.252
2	12	14.5	25.11	2	49	0	2	2	2	2	1	1	0.2967	0.36
8	0	17	18.55	1	37	0	1	1	2	2	1	2	0.32	0.264
10	12	15	25.11	1	49	0	2	1	1	1	1	1	0.37	0.35
8	0	12.5	18.85	1	37	13	2	1	2	2	1	2	0.39	0.411
3	0	17	19.69	3	37	4	2	1	1	2	1	2	0.4067	0.407
4	0	17	16.35	1	37	0	2	3	2	2	1	2	0.4333	0.361
3	13	13.5	26.55	1	49	0	2	1	1	1	1	2	0.4467	0.5
3	0	17	19.54	3	38	4	2	1	1	2	1	2	0.4567	0.409
9	13	13.5	26.35	1	49	0	2	1	1	1	1	2	0.4767	0.5
8	0	17	23.89	1	37	0	2	3	2	2	2	2	0.4933	0.462
3	13	13.5	26.55	1	49	0	2	1	1	1	1	2	0.5467	0.5

### 3.1.2.3. Comparación del desempeño de la red neuronal artificial y el modelo de lógica difusa.

Se utiliza lógica difusa porque tenemos información obtenida a partir del conocimiento y experiencia de los responsables de la operación avícola, los resultados del modelo se comparan con una red neuronal artificial que es diseñada con información de registros estadísticos para medir el desempeño en el control de la humedad de la pollinaza en ambos modelos.

Una vez validado los resultados del modelo de lógica difusa se realiza un análisis comparativo con la red neuronal artificial (RNA) para las mismas 13 variables utilizando los 20 casos registrados para entrenar al modelo de lógica difusa, para validar el desempeño de ambos modelos en la predicción del contenido de humedad en la pollinaza.

Los resultados de la prueba de la red neuronal artificial con 20 casos nuevos muestran un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 92.91%, logrando que las predicciones sean exitosas, ver Figura 55.

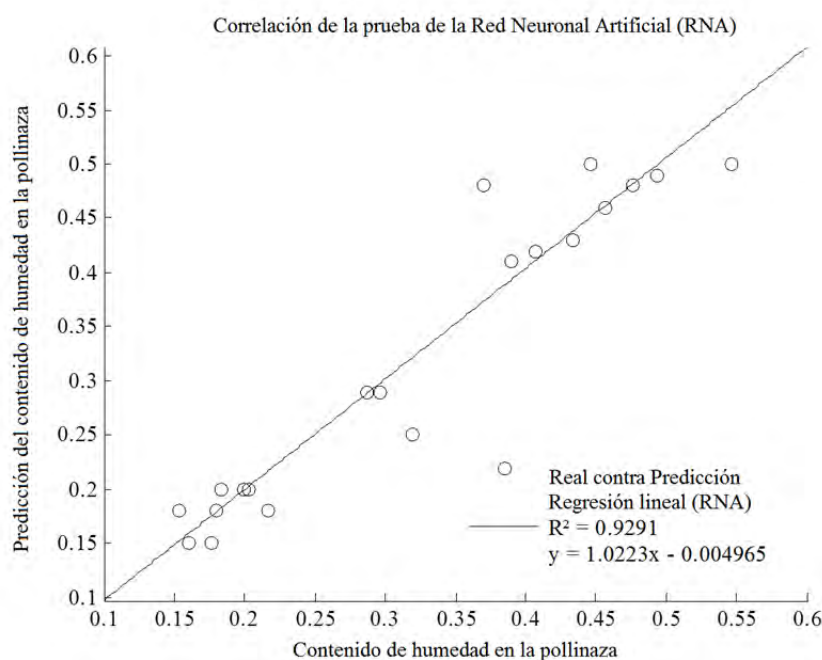


Figura 55. Correlación de la prueba de la red neuronal artificial con 20 casos nuevos

La Figura 56 se muestra el desempeño comparativo de la predicción del modelo de FL y de ANN utilizando las mismas muestras, en él se visualizan las predicciones de la variable de salida que determina el contenido de humedad.



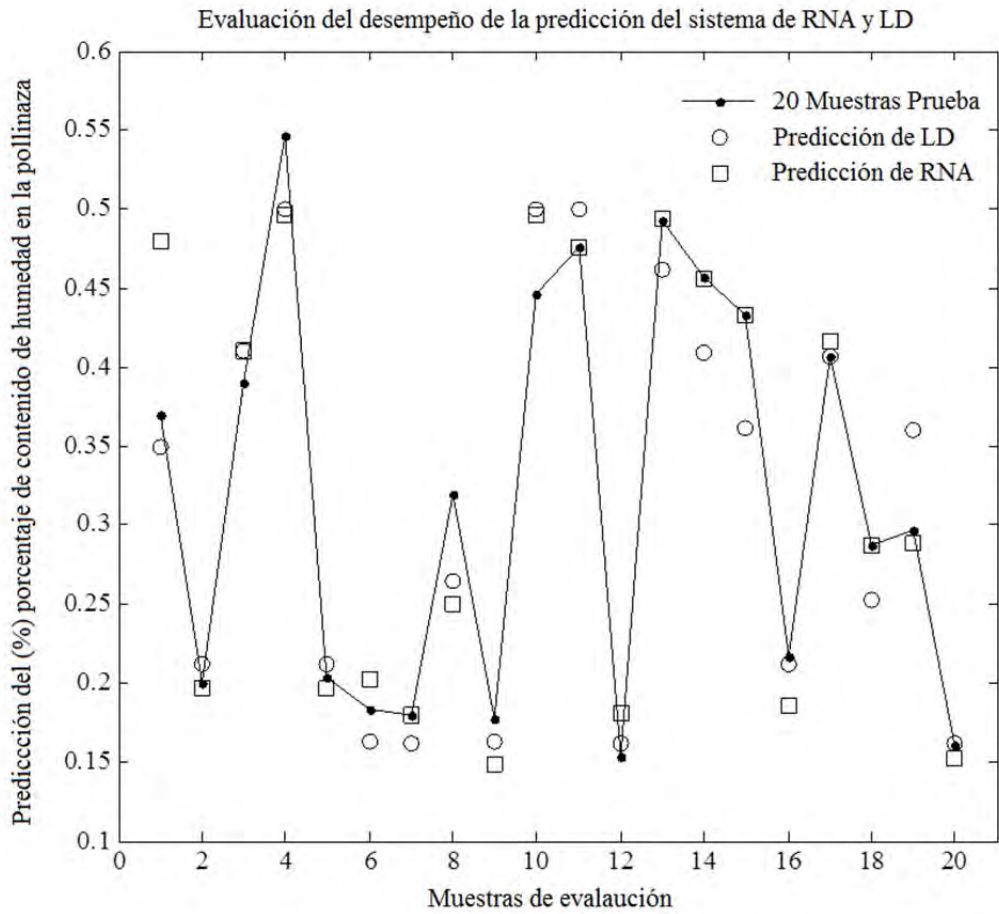
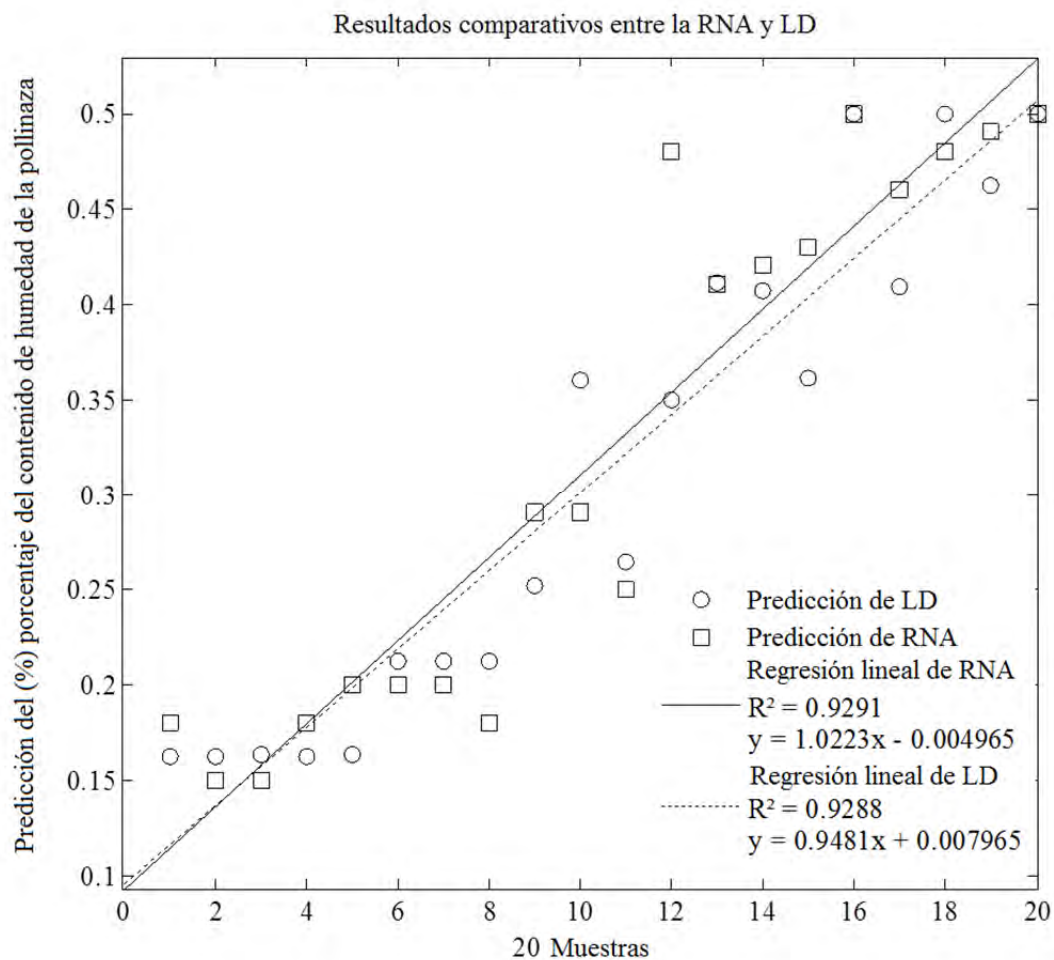


Figura 56. La evaluación del desempeño de los sistemas de predicción RNA y LD.

En la Figura 57 se representan los coeficientes de determinación de la predicción de ambos modelos, se identifica que tienen el mismo éxito para predecir, ligeramente la ANN es más cercano a 1, pero ambos ofrecen muy buenas predicciones.



**Figura 57. Comparación del coeficiente de correlación de la RNA y LD para predecir el contenido de humedad.**

Este trabajo muestra un estudio comparativo que se ha realizado entre dos técnicas de inteligencia artificial RNA y LD, para controlar las variables que afectan el contenido de humedad en la polinaza, durante el ciclo de producción de pollos de engorde.

Las predicciones de ambas técnicas son altamente efectivas debido a que el coeficiente de determinación son cercanas a 1, sin embargo el modelo de RNA logra ligeramente mejores resultados que el de LD, debido a que la técnica de RNA utiliza una base de datos, y el modelo de LD está sujeto a la experticia de uno o más individuos con diferente criterio.

### 3.1.3. Producción de pollinaza considerando inhibidor de rendimiento energético (Contenido de humedad)

Se considera realizar un análisis de riesgo para implementar la tecnología de combustión para pollinaza al 40% y realizar otros escenarios con 35%, 30% y 25% los cuales requieren una mayor inversión en las granjas para producir pollinaza seca. Se decide realizar un análisis de escenarios que no sólo incluya las diferentes opciones de inversión en generación de energía, sino también la incertidumbre de la compra de equipos en granjas para reducir el contenido de humedad de la pollinaza y mejorar la combustión con diferentes contenidos de humedad y garantizar una combustión estable.

Las Granjas de producción de pollos de engorde operan los 365 días al año, y cada ciclo de producción tiene una duración de 68 días a 70 días, para efectos de la evaluación de la pollinaza se consideran 68 días al ciclo.

Durante el año se efectúan entre 5.37 ciclos de producción al año con 12 millones de pollos, mientras más tiempo dure el ciclo menos ciclos se registran en el año y viceversa, mientras menos tiempo dure el ciclo de producción más ciclos se registran en el año.

La pollinaza disponible para ser utilizada como biocombustible en el año es resultado de 65 millones de pollos de engorde que se producen al año y el rendimiento de 1.55 kilos de pollinaza que produce cada pollo, en la Tabla 69 se muestran los valores de producción de pollo de engorde.

Investigaciones en Estados Unidos indican un rendimiento de 1.2 kilos por ave (*Carr et al. 2002*), también entre 1.1 y 1.4 kilos por ave (*Collins, 2009*), y otros entre 1.2-1.7 kilos por ave de engorde (*Grimes et al., 2006*).

**Tabla 69. Producción de pollos de engorde**

Concepto	Cantidad	Unidad
Días al año	365.0	Días
Duración del ciclo de Producción	68.0	Días/ciclo
Pollos finalizados por año	65,171,131.3	Pollo de engorde/año
Producción de Pollinaza por Año	101,015,255.1	kg pollinaza anual
Población Avícola anual	12,141,471.0	Parvada constante en el Ciclo
Tiempo del Ciclo	5.37	Ciclos/año
Rendimiento de Pollinaza por Ave	1.55	kg pollinaza/pollo de engorda

El diseño y construcción de cualquier planta industrial debe considerar el crecimiento en la producción de materia prima y de producto terminado que es afectado por el crecimiento del mercado.

El volumen de pollinaza a utilizar está afectado por el volumen de compra adicional del 25% que planea realizar la empresa a otros proveedores para llegar a 126 mil toneladas y se le aplica una tasa media de crecimiento anual (TMCA) que registra la producción del pollo de engorde hasta el año siete, ver Tabla 70.

Los expertos energéticos de la empresa recomendaron una holgura de hasta 5 años con respecto a la capacidad instalada de la planta nueva, y los fabricantes de las calderas y el departamento de ingeniería del proyecto indican que tardan 2 años en construir la planta, por este motivo el diseño de la capacidad instalada de la planta se lleva al año 7.

**Tabla 70. Crecimiento en la producción de pollinaza**

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Pollos de engorde actual	65,171,131	t pollos de engorde/año
Producción anual de pollinaza	101,015.26	t pollinaza/año
Compra Adicional de Pollinaza	25.00%	% de Compra
Pollos adicionales	16,292,782	t pollos de engorde/año
Compra Adicional de Pollinaza	25,253.81	t pollinaza/año
Total de pollos disponibles	81,463,914	t pollos de engorde/año
Total de Pollinaza Disponible	126,269.07	t pollinaza/año
Tasa media de crecimiento anual	3.50%	% TMCA
Proyección de Crecimiento a:	7.00	años
Producción de pollos en 7.0 años	103,644,848	t pollos de engorde/año
Volumen de pollinaza a 7.0 años	160,649.52	t pollinaza/año

El volumen de pollinaza capaz de ser combustionada en la planta es de hasta 160 mil toneladas de pollinaza al año.

La planta de generación de energía eléctrica opera los 365 días al año, de los cuales existe un tiempo perdido por mantenimiento programado sobre los equipos que requieran ser reparados, y no

se considera tiempo perdido por falla porque es un equipo nuevo que garantiza un buen funcionamiento en al menos los primeros 8 a 9 años, este periodo representa el 25% de la vida útil de estos equipos que ronda los 30 a 35 años.

Después del 25% de la vida útil de la planta los equipos instalados registran averías que pueden generar tiempos perdidos por falla y los importes de reparación son relativamente pequeños. En la Tabla 71 se presenta los 334 días de operación en la planta de generación.

**Tabla 71. Tiempos de operación de la planta de generación eléctrica con pollinaza**

Concepto	Cantidad	Unidad
Tiempo Perdido por Falla	0.00%	% Tiempo perdido por Falla
Horas al año	8,760.0	Horas/año
Tiempo perdido para Mantenimiento	8.41%	% Tiempo perdido Programado
Horas sin operación	736.4	Horas/año
Horas efectivas de operación	8,023.6	Horas/año
Días efectivos de operación	334.3	días/año

La pollinaza disponible se estima en 20 toneladas por hora, que es el biocombustible que será combustionado en la caldera de alta presión, ver Tabla 72.

**Tabla 72. Pollinaza disponible.**

Concepto	Cantidad	Unidad
Producción de pollinaza	160,649.5	t pollinaza/año
Pollinaza para generación eléctrica	480.55	t pollinaza/día
Pollinaza para generación eléctrica	20.0	t pollinaza/hora

### 3.1.4. Balance de materia y energía utilizando combustión.

Para desarrollar el balance y la conversión de materia a energía se utilizan ecuaciones de Mollier y de Regnault para determinar los valores más probables de la entalpía del vapor y de calor latente de vaporización, estas ecuaciones utilizan los resultados de poder calorífico de las muestras de pollinaza obtenidas del laboratorio.

Las muestras de los residuos de Pollinaza fueron reducidas de tamaño a través de un molino eléctrico de cuchillas y se pasó a través de un tamiz malla 40 para obtener un tamaño de partícula menor a 0.42 mm, posteriormente se almacenaron en recipientes de plástico. La pollinaza se puso a secar al sol durante 3 días para reducir la humedad al 8% y se aprovechó para retirar la mayor cantidad de plumas, debido a que es un agente no deseable para la confiabilidad de los análisis realizados.



**Imagen 42. Preparación de las muestras de pollinaza**

Se realizan dos bloques de muestras para análisis químico utilizando la metodología ASTM (American Section of the International Association for Testing Materials). El primer bloque se realiza con 4 muestras de pollinaza seca con el 8% de contenido de humedad fueron evaluadas para determinar su poder calorífico con un calorímetro automático isoperbólico modelo Parr 6400, realizado en colaboración del laboratorio de investigación en química del Instituto Tecnológico de Orizaba.



**Imagen 43. Calorímetro automático, colocación de la muestra, y display del resultado**

En el segundo bloque se realiza con 8 muestras para determinar la composición elemental de pollinaza calcinada y no calcinada, con una mufla a 450 °C durante una hora y un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-6380LV modelo 7582 con detección de rayos X EDS InCA x-sight Oxford Instruments, con barridos de 3 campos distintos y voltaje mínimo a 15 kV.

Los resultados del análisis próximo del primer bloque de muestras se ubican en la Tabla 73 indican que la pollinaza seca contiene más de 71% de materia volátil y 18.44% de cenizas (Alvarado-García, 2013). Para combustionar la pollinaza de manera directa es importante que tenga un alto contenido de materia volátil y un bajo contenido de ceniza, también presenta valores altos de carbono y oxígeno lo que indica buenas propiedades de combustión.

**Tabla 73. Resultados de análisis elemental y próximo del primer bloque de 4 muestras.**

Humedad	Cenizas	Material Volátil	Carbón Fijo
8.83% ± 0.15% DS	18.44% ± 0.23% DS	71.5% ± 0.06 DS	1.22% ± 0.4 DS
ASTM D2867-99	ASTM E1755-01	ASTMD2866-83	Por diferencia
% C	% H	% O	
33.31%	4.49%	34.41%	

\* DS = Desviación estándar

Los resultados del poder calorífico de las muestras de pollinaza base seca del primer bloque de muestras (ver Tabla 74), representan los valores del poder calorífico superior (P.C.S.) del residuo quemado bajo condiciones controladas de combustión, con los valores de P.C.S. se determina el poder calorífico neto (P.C.I.) que es el valor más probable de ocurrir cuando la biomasa sea aplicada en calderas industriales de alta presión de lecho fluidizado, esta variación del poder calorífico ocurre por la fluctuación no controlada en el contenido de humedad de la pollinaza. La definición de los diferentes niveles de poder calorífico se encuentra en la sección de anexos 2.2.1 Calculo del poder calorífico de la biomasa

**Tabla 74. Muestras de poder calorífico en la pollinaza seca**

Poder calorífico en kcal/kg de pollinaza base seca						
Pollinaza	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Promedio	Desv. Est.
P.C.S. al 8% Húm.	3,274.4	3,280.5	3,295.7	3,275.8	3,281.6	± 9.75
Medio al 8% Húm.	2,923.59	2,929.10	2,942.60	2,924.83	2,930.03	± 8.70
P.C.I. al 8% Húm.	2,572.7	2,577.7	2,589.5	2,573.8	2,578.4	± 7.66

Los resultados del poder calorífico de la pollinaza quemada bajo condiciones estándar de combustión, presentan un enorme potencial para ser usado energéticamente.

Los resultados del análisis de composición elemental del segundo bloque de 8 muestras se ubican en la Tabla 75 indican el contenido de elementos químicos de pollinaza sin calcinar y calcinada (cenizas de pollinaza).

**Tabla 75. Resultados de análisis de composición elemental del segundo bloque de 8 muestras.**

Concentración g/100g	Muestras Sin Calcinar		Muestras Calcinadas (Cenizas)	
	Promedio de 8 muestras	Desviación Estándar	Promedio de 8 muestras	Desviación Estándar
<b>Elemento Químico</b>				
<b>C</b>	21.75	0.72	9.88	1.94
<b>N</b>	3.18	0.69	1.69	0.98
<b>Na</b>	0.26	0.04	2.35	0.31
<b>Mg</b>	0.38	0.03	1.87	0.35
<b>Al</b>	0.14	0.03	0.76	0.24
<b>Si</b>	0.41	0.05	2.11	0.25
<b>P</b>	0.88	0.12	4.94	0.99
<b>S</b>	0.34	0.06	1.72	0.34
<b>Cl</b>	0.36	0.06	7.02	2.02
<b>K</b>	1.11	0.18	11.31	1.80
<b>Ca</b>	0.97	0.08	5.91	1.15
<b>Fe</b>	0.00	0.00	0.43	0.16
<b>O</b>	70.22	0.28	50.01	2.95
<b>Suma</b>	100		100	

Se presenta la composición elemental de la pollinaza con el 8% de humedad proveniente de los resultados de laboratorio ver la Tabla 76 y se proyecta el comportamiento elemental de la pollinaza con el 40% de humedad.



Tabla 76. Composición elemental de la pollinaza base seca

<b>Composición de la pollinaza seca</b>	<b>Volumen Materia Base Seca al 8%</b>	<b>Volumen pollinaza al 40%</b>
C =	33.31%	21.87%
H =	4.50%	2.95%
O <sub>2</sub> =	34.41%	22.59%
Cenizas =	18.44%	12.11%
Carbón Fijo =	1.22%	0.8%
Sub-total =	91.88%	60.33%
Humedad de la Muestra al 8% =	8.12%	39.67%
Total =	100.00%	100.00%

Se aplican las ecuaciones de la sección de anexos 2.2.1. Calculo del poder calorífico de la biomasa a diferente contenido de humedad de la pollinaza para proyectar el poder calorífico superior (alto), inferior (bajo) y medio.

Para efectos de evaluación se utiliza el poder calorífico interior (bajo) para asegurarnos de generar la cantidad de energía y ponernos en un escenario conservador, si en la práctica resultaran valores más altos de poder calorífico afectados por el comportamiento de la humedad en la pollinaza beneficiarían aún más el proyecto.

Este escenario conservador se aplica para evitar dar falsas expectativas de energía y realizar un proyecto muy optimista que ponga en riesgo la rentabilidad del mismo, en la Tabla 77 se muestran estos valores. Un poder calorífico superior representa una mayor generación de energía y una mayor capacidad instalada en los equipos de generación de vapor y eléctrica.

Sería un error grave evaluar un proyecto industrial con los valores de poder calorífico de base seca provenientes del laboratorio.

**Tabla 77. Comportamiento del poder calorífico de la pollinaza**

Concepto	Cantidad	Unidad
Contenido de humedad	39.67%	% de Humedad en la Pollinaza
Valor calórico alto base seca	13.75	MJ/kg
1Mj a kcal	238.85	kcal/MJ
Valor calórico alto base seca al 8%	3,283.83	kcal/kg
Valor calórico alto de pollinaza húmeda	1,981.25	kcal/kg
Valor calórico medio de pollinaza húmeda	1,789.00	kcal/kg
Valor calórico bajo de pollinaza húmeda	1,596.75	kcal/kg
Escenario Calórico de la Pollinaza	Bajo/Conservador	

Con este valor calorífico se diseña la caldera de alta presión y se determinan los parámetros de operación y capacidad de generación de vapor, en la Tabla 78 se presentan las características de operación.

**Tabla 78. Diseño de la caldera de alta presión para combustión de pollinaza**

Concepto	Cantidad	Unidad
Eficiencia de la caldera moderna con calentador de aire y economizador	83.00%	% eficiencia
Presión del vapor	63.30	kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura del vapor	445.00	°C
Entalpía de la temperatura del vapor	784.90	kcal/kg
Presión agua alimentar	75.00	kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura agua alim.	85.00	°C
Entalpía de la temperatura del agua de alimentación	86.39	kcal/kg
Salto de entalpía	698.51	kcal/kg

La eficiencia de generación de vapor en la caldera es de 83% afectado por la calidad de la pollinaza derivados de la humedad en ella, es deseable controlar los picos y valles de generación de vapor en la caldera. Las entalpias de entrada y de salida provienen de las ecuaciones de Mollier.

El vapor que se produce en la caldera tiene un rendimiento de 1.8991 kilos de vapor por cada kilo de pollinaza que se combustiona en el interior de la caldera, ver la Tabla 79, y cada kilowatt-hora que se produce en el turbogenerador demanda un consumo de 4.1667 kilos de vapor provenientes de la caldera. Las distribuciones de probabilidad utilizadas para determinar los índices se presentan en la Tabla 30.

**Tabla 79. Balance de materia y energía usando pollinaza como combustible**

Concepto	Cantidad	Unidad
<b>Balance: Vapor-Pollinaza 40° hum.</b>	<b>1.8991</b>	<b>kg vapor / kg Pollinaza 40° hum.</b>
°. 1 kg de pollinaza al 40% de hum. produce 1.8991 kg de vapor		
Balance: Pollinaza 40° hum.-Vapor	0.5266	kg Pollinaza 40° hum./kg vapor
°. 1 kg vapor consume 0.5266 kg de pollinaza al 40% de hum.		
<b>Balance: Vapor-kWh</b>	<b>4.1667</b>	<b>kg vapor / kWh</b>
°. 1 kWh requiere de 4.1667 kg de vapor		
Balance: kWh-Vapor	0.2400	kWh/kg vapor
°. 1 kg vapor produce 0.2400 kWh		

El turbogenerador utiliza vapor de alta para ejercer fuerza mecánica que mueve los alabes de la turbina de vapor, y el eje de la turbina de vapor mueve al generador eléctrico para producir energía eléctrica generada por el campo eléctrico formado entre el estátor y rotor del generador eléctrico, para ver más detalle sobre el funcionamiento de estos equipos de generación, consultar la sección de anexos 3.3.4.

Para diseñar la capacidad de la caldera de alta presión y el turbogenerador de condensación a comprar se debe realizar un estimado de generación de energía considerando las 160 mil toneladas de pollinaza a combustionar a un ritmo de 20 toneladas por hora capaces de generar 31 millones de kilocalorías por hora, esta energía produce  $37.99 \approx 38$  toneladas de vapor por hora, ver Tabla 80.

**Tabla 80. Demanda de biomasa para determinar el flujo de vapor**

Concepto	Cantidad	Unidad
Pollinaza disponible anual	160,649.52	ton/año
Pollinaza disponible por hora	20.02	ton/h
Energía disponible por hora	31,970,374.71	kcal/h
kilos de Vapor posible a generar por hora	37,988.75	kg/h

Vapor posible a generar por hora	37.99	ton/h
Producción de vapor por ton de Pollinaza por hora	1.90	ton vapor / ton pollinaza
Índice de Seguridad para cubrir picos de generación en la caldera	35.00%	% seguridad en Capacidad Instalada.
Diseño de caldera con el Vapor posible a generar por hora	51.28	ton/h

Por lo tanto si la caldera va a producir 38 toneladas de vapor y se desea un índice de seguridad del 35% para tener una holgura en la producción de vapor cuando la pollinaza tenga mejora calidad o se encuentre más seca, se debe diseñar y adquirir una caldera de 51.3 toneladas de vapor por hora.

El flujo de vapor es determinante para estimar el turbogenerador a comprar el cual debe estar diseñado para recibir el vapor proveniente de la caldera de alta presión.

Las 38 toneladas de vapor producidas entre el 4.17 toneladas de consumo por el turbogenerador indican que el tubo debe tener una capacidad de 9.2 MWh, regularmente la eficiencia de turbogeneradores de condensación modernos fabricados por General Electric tienen una muy alta eficiencia de generación superior al 95%.

Para efectos de evaluación se considera una eficiencia del 92.33% y determinar que el turbogenerador a comprar deber tener una capacidad de generación superior a 9.87 MWh, ver la Tabla 81.

**Tabla 81. Demanda de vapor para determinar la energía eléctrica a producir**

Concepto	Cantidad	Unidad
Consumo específico del turbo	4.17	ton vapor/MWh
Electricidad posible a generar	9.12	MWh
% de aprovechamiento del turbo	92.33%	%
Capacidad del turbo a comprar	9.87	MWh

La distribución triangular utilizada para su modelación de la eficiencia del turbogenerador se puede ver en la Tabla 30.

Se realiza la evaluación de la pollinaza con 4 escenarios (40%, 35%, 30% y 25%) de humedad en la pollinaza, los resultados de la simulación del sistema de generación de energía se muestran en la Tabla 82.

**Tabla 82. Índices de generación de energía en año 7 a plena capacidad**

<b>Calidad de la Pollinaza</b>	<b>40%</b>	<b>35%</b>	<b>30%</b>	<b>25%</b>	<b>unidad</b>
Pollinaza para Combustión	160,650	160,650	160,650	160,650	t pollinaza
P.C.I. Índice de Regnault	1,597	1,779	1,961	2,143	kcal/kg
Energía por hora	31,970,375	35,615,472	39,260,488	42,905,545	kcal/h
Índice de producción de vapor	1.9	2.1	2.3	2.5	t vapor/t pollinaza
Flujo de vapor por hora	38.0	42.3	46.7	51.0	t vapor/h
Índice de consumo de vapor	4.17	4.17	4.17	4.17	t vapor/MWh
Índice de generación de energía	9.12	10.16	11.20	12.24	MWh
Diseño de turbogenerador	9.9	11.0	12.1	13.3	MW
Diseño de caldera	51.3	57.1	63.0	68.8	t vapor/hr

El sistema propuesto consiste en combustionar la pollinaza de 40° de humedad en una caldera de alta presión para generar vapor, que mueve una turbina a condensación y un generador eléctrico de 10 MW para producir electricidad. Una caldera de 38 T vapor/h, presión de 60 kg/cm<sup>2</sup> (900 lb/in<sup>2</sup>) y temperatura de 450°C, ver Imagen 44, Imagen 45 e Imagen 46.



**Imagen 44. Planta de Generación con biomasa de Pollinaza**



**Imagen 45. Turbogenerador condensante sin extracción para la cadena de valor usando pollinaza**



**Imagen 46. Cenizas pulverizadas y sólidas provenientes de la combustión de pollinaza**

### 3.1.5. Producción de energía térmica (vapor) y eléctrica

La energía total producida en la planta de generación tiene dos usos, la energía para autoconsumo y la energía excedente para su exportación a la red nacional para su venta a empresas socias.

La energía eléctrica para autoconsumo se utiliza para mover los equipos eléctricos que requiere la planta industrial para su funcionamiento interno, es decir los motores, centros de carga eléctrico, transportadores, oficinas, equipos de cómputo para el control de los equipos de operación, etc., es decir todo equipo que requiera energía eléctrica para que opere la planta de generación de energía.

La energía excedente es la energía que no es necesaria para el requerimiento interno de la planta o que sobra puede ser usada para otros requerimiento en el exterior de la planta de generación, regularmente esta energía se comercializa con otras empresas que están interconectadas con la red

nacional de energía eléctrica, esta red de cableado se utiliza para transportar y enviar la energía eléctrica a diferentes puntos o nodos de consumo de energía.

La oferta de energía al día es de 219 MWh, de los cuales 21.9 MWh son utilizados para el autoconsumo de la planta y 197.1 MWh son enviados a la red nacional de energía eléctrica para ser utilizado por otras industrias que tengan grande requerimientos de energía eléctrica para que puedan sustituir el uso de combustibles fósiles. En la Tabla 83 se presenta la generación de energía eléctrica por hora y por día. La distribución de probabilidad del comportamiento del autoconsumo y excedente se encuentran en la sección de anexos 2.2.4

**Tabla 83. Generación de energía eléctrica al día con pollinaza del 40% de humedad.**

Concepto	Cantidad	Unidad
Producción total de energía	219.0	MWh (MegaWatts-hora) /día
Energía para Exportación	90.00%	% para exportación
Energía para Autoconsumo	10.00%	% para autoconsumo
Energía para Exportación	197.1	MWh (MegaWatts-hora) /día
Energía para Autoconsumo	21.9	MWh (MegaWatts-hora) /día
Energía para Exportación	8.2	MW (MegaWatts-hora)
Energía para Autoconsumo	0.9	MW (MegaWatts-hora)

\* Energía para autoconsumo, es energía utilizada en los equipos eléctricos al interior de la planta.

Considerando los tiempos de operación de la Tabla 71 de 8,023 horas efectivas de operación equivalentes a 334 días y los índices de generación eléctrica horaria de la Tabla 83 se estima una producción de 73,221 MWh de energía eléctrica generada en el año, ver Tabla 84.

**Tabla 84. Producción anual de energía eléctrica con pollinaza**

Concepto	Cantidad	Unidad
Capacidad de Generación de energía	79,942.4	MWh (MegaWatts-hora)/año
Generación Eléctrica Efectiva anual	73,221.9	MWh (MegaWatts-hora) /año
Energía excedente para Exportación	65,899.7	MWh (MegaWatts-hora)/año
Energía para Autoconsumo	7,322.2	MWh (MegaWatts-hora)/año
Energía Sin Producir	6,720.5	MWh (MegaWatts-hora)/año

La energía calorífica proveniente de la combustión de la pollinaza en el interior de la caldera provoca que el agua contenida en el interior de los tubos acuotubulares de la caldera se caliente a temperaturas muy altas y se convierta instantáneamente en vapor en el domo de la caldera.

Los residuos de la combustión de la pollinaza son cenizas útiles por los elementos que contiene para ser utilizando como ortofosfato para el suplemento alimenticio en la dieta de las aves o como superfosfato para ser utilizado como biofertilizante para cultivos agrícolas, ver Tabla 73, Tabla 75, y Tabla 76.

La producción de ceniza representa el 15.81% de la pollinaza que es utilizada en la caldera para combustionar, las cenizas representan 25,404 toneladas al año como se muestra en la Tabla 85.

La distribución triangular utilizada para determinar el porcentaje de cenizas residual se presenta en la Tabla 30 y utiliza como límite superior el valor de la Tabla 73.

**Tabla 85. Producción de Cenizas provenientes de la combustión de la pollinaza**

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
% de cenizas residuales	15.81%	% de Cenizas
Producción de Cenizas para Fertilizante	25,404.0	t cenizas/año
Producción de Cenizas para Fertilizante	69.6	t cenizas/día

Se presenta la evaluación de la pollinaza a diferentes contenidos de humedad, en ellos se muestra la viabilidad para utilizar la pollinaza con el 40% de humedad al producir 9.1 MWh. En el análisis se consideran las horas efectivas para lograr una producción anual de 73,222 MWh de los cuales el 10% se utiliza energía para autoconsumo y el 90% de la energía producida es excedente por 65,900 MWh que se vende hacia la red nacional. Para ver la capacidad de producción de energía con diferentes contenidos de humedad consultar la Tabla 86.



**Tabla 86. Índices de generación de energía en año 7 a plena capacidad**

<b>Humedad de la Pollinaza</b>	<b>40%</b>	<b>35%</b>	<b>30%</b>	<b>25%</b>	<b>unidad</b>
Pollinaza para Combustión	160,650	160,650	160,650	160,650	t pollinaza
Autoconsumo de energía	7,322	8,114	8,842	9,763	MWh/año
Excedentes de energía venta	65,900	73,029	79,579	87,865	MWh/año
Producción de energía	73,222	81,143	88,421	97,627	MWh/año
Producción de cenizas	25,404	25,404	25,404	25,404	t cenizas/año
Reducción Emisiones tCO <sub>2</sub> eq	32,943	36,507	39,781	43,923	tCO <sub>2</sub> eq

Se obtienen diversos índices para realizar cálculos rápidos de energía, vapor, cenizas utilizando biomasa de pollinaza al 40% de humedad, ver Tabla 87

**Tabla 87. Índices de rendimiento energético de la pollinaza del 40% de humedad**

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Rendimiento de Pollinaza:	0.456	MW/t Pollinaza
1 t pollinaza por hora produce 0.46 MWh	0.456	kWh/kg pollinaza
Rendimiento de Energía	2.194	t Pollinaza/MWh
1 MW por hora requiere 2.19 t de pollinaza por hora	2.194	kg pollinaza/kWh
Rendimiento de Cenizas	6.324	t Pollinaza/t Cenizas
1 t Ceniza requiere de 6.32 t de pollinaza	6.324	kg pollinaza/kg Cenizas
Rendimiento de Cenizas	0.158	t Cenizas/t Pollinaza
1 t pollinaza produce 0.16 t de Ceniza	0.158	kg Cenizas/kg pollinaza
Rendimiento de Cenizas	2.594	MWh/t Cenizas
1 t Ceniza requiere de 2.59 MWh	2.594	kWh/kg Cenizas
Rendimiento de Cenizas	0.385	t Cenizas/MWh
1 MWh produce 0.39 t de Ceniza	0.385	kg Cenizas/kWh

Con los índices de producción pollos de engorde, de pollinaza al 40% se puede estimar la producción de energía, cenizas de manera anual, en la Tabla 88 el volumen de pollos de engorde que serán necesarios para producir la pollinaza de manera anual.

Tabla 88. Producción de pollo de engorda por año

Año	Año	Producción de Pollos de Engorde Total	Producción de Pollos de Engorde en Grupo Pecuario San Antonio	Producción de Pollos de Engorde Externos
0	2015	81,463,914	65,171,131	16,292,783
1	2016	84,315,151	67,452,121	16,863,030
2	2017	87,266,181	69,812,945	17,453,236
3	2018	90,320,498	72,256,398	18,064,100
4	2019	93,481,715	74,785,372	18,696,343
5	2020	96,753,575	77,402,860	19,350,715
6	2021	100,139,950	80,111,960	20,027,990
7	2022	103,644,849	82,915,879	20,728,970
8	2023	103,644,849	82,915,879	20,728,970
9	2024	103,644,849	82,915,879	20,728,970
10	2025	103,644,849	82,915,879	20,728,970

En la Tabla 89 se muestra la producción de pollinaza al 40% utilizada para producir bioenergía y la parte proporcional comprada a productores de la zona. El 85% del volumen de biomasa es materia volátil que desintegra en el interior de la caldera y el 15% restante son cenizas residuales del proceso de combustión, que se obtiene como resultado de la producción de bioenergía anual.

Tabla 89. Producción de productos derivados de la combustión.

Año	Año	Pollinaza Propia	Compra de Pollinaza adicional	Pollinaza Total Disponible	MWh con Pollinaza	Materia orgánica combustionada	t de Fertilizante (Cenizas)
0	2015	101,015	25,253	126,269	57,552	106,302	19,967
1	2016	104,550	26,137	130,688	59,566	110,022	20,666
2	2017	108,210	27,052	135,262	61,651	113,873	21,390
3	2018	111,997	27,999	139,996	63,809	117,859	22,138
4	2019	115,917	28,979	144,896	66,042	121,984	22,913
5	2020	119,974	29,993	149,968	68,353	126,253	23,715
6	2021	124,173	31,043	155,216	70,746	130,672	24,545

7	2022	128,519	32,129	160,649	73,222	135,245	25,404
8	2023	128,519	32,129	160,649	73,222	135,245	25,404
9	2024	128,519	32,129	160,649	73,222	135,245	25,404
10	2025	128,519	32,129	160,649	73,222	135,245	25,404

Para poder producir la energía eléctrica a plena capacidad instalada es necesario contar con un suministro de 20 toneladas de pollinaza por hora. El año 2 la planta de generación inicia operaciones con 17 toneladas por hora de pollinaza, es decir se estará operando al 85% de la capacidad para la cual fue diseñada la planta.

Después de haberse construido la planta, en el año 2 se podrá generar 61.6 mil MWh por año de los cuales 6.1 mil MWh los utilizará para autoconsumo y el resto 55.4 mil MWh para la venta entre las compañías que formaran la red de valor, ver la Tabla 90.

**Tabla 90. Flujo de producción de bioenergía**

Año	Año	Demanda de pollinaza/hr	Oferta t Pollinaza/hr	Horas de Operación/Oferta	MWh con Pollinaza	MWh para Autoconsumo con pollinaza	MWh para Exportación con pollinaza
0	2015	20	16	6,306	57,552	5,755	51,797
1	2016	20	16	6,527	59,566	5,957	53,609
2	2017	20	17	6,756	61,651	6,165	55,486
3	2018	20	17	6,992	63,809	6,381	57,428
4	2019	20	18	7,237	66,042	6,604	59,438
5	2020	20	19	7,490	68,353	6,835	61,518
6	2021	20	19	7,752	70,746	7,075	63,671
7	2022	20	20	8,024	73,222	7,322	65,900
8	2023	20	20	8,024	73,222	7,322	65,900
9	2024	20	20	8,024	73,222	7,322	65,900
10	2025	20	20	8,024	73,222	7,322	65,900

Una vez que se determinaron los flujos de producción se realiza la estimación económica, considerando las ventas y los costos de cada año.

### 3.1.6. Análisis de riesgo para estimar la rentabilidad económica del uso de pollinaza.

Se estiman los precios de venta para los bioproductos, los costos de producción y los costos de materia prima se utilizan para determinar el flujo de efectivo, ver Tabla 91.

**Tabla 91. Precios y costos relacionados con la combustión de la pollinaza**

Concepto	Cantidad	Unidad
Precio de MWh	\$1,380.00	Pesos/MWh
Precio de Fertilizante (Cenizas)	\$1,750.00	Pesos/tonelada cenizas
Costo de Porteo de Energía Renovable	\$ 34.18	Pesos/MWh
Costo de Serv. Conexos de Energía	\$110,000.00	Pesos/mes
Precio de Pollinaza al 40° hum	\$349.00	Pesos/tonelada pollinaza
Flete por tonelada de pollinaza	\$100.00	Pesos/tonelada pollinaza
Costo total de Pollinaza al 40° hum.	\$449.00	Pesos/tonelada pollinaza

Las distribuciones de probabilidad de los precios y costos relacionados con la combustión de la pollinaza se encuentran en la Tabla 33, en la Figura 37 y Figura 38 donde se muestra el precio histórico del kilowatt-hora en México, y para determinar el costo de la pollinaza se utiliza la Tabla 92.

**Tabla 92. Comportamiento del precio de venta de la pollinaza**

Tipo	Asignación	Precios buenos (7 meses) 58.33%	Precio malos (5 meses) 41.67%
Pollinaza Seca	6%	\$ 610.00	\$ 510.00
Pollinaza 1ra.	40%	\$ 520.00	\$ 450.00
Pollinaza 2da.	54%	\$ 230.00	\$ 202.60
<b>Total</b>	<b>100%</b>	<b>\$ 368.80</b>	<b>\$ 320.00</b>

Las ventas de energía eléctrica producida y la venta de cenizas se muestran en la Tabla 93, la suma representa el ingreso total, ver Tabla 94y Tabla 95.

Tabla 93. Ingresos por bioenergía y biofertilizante

Año	Año	Ingresos por MWh	Ingreso por Fertilizante (Cenizas)	Ingresos Totales
0	2015	\$ 71,479,281	\$34,942,860	\$106,422,142
1	2016	\$ 73,981,056	\$36,165,860	\$110,146,917
2	2017	\$ 76,570,393	\$37,431,666	\$114,002,059
3	2018	\$ 79,250,357	\$38,741,774	\$117,992,131
4	2019	\$ 82,024,120	\$40,097,736	\$122,121,856
5	2020	\$ 84,894,964	\$41,501,157	\$126,396,120
6	2021	\$ 87,866,287	\$42,953,697	\$130,819,985
7	2022	\$ 90,941,608	\$44,457,077	\$135,398,684
8	2023	\$ 90,941,608	\$44,457,077	\$135,398,684
9	2024	\$ 90,941,608	\$44,457,077	\$135,398,684
10	2025	\$ 90,941,608	\$44,457,077	\$135,398,684

Tabla 94. Costos de generación eléctrica

Año	Año	Costos de Pollinaza	Costos de Porteo	Costos de Servicios Conexos	Costos de Generación
0	2014	\$ 56,694,812	\$ 1,770,234	\$ 1,320,000	\$ 59,785,046
1	2015	\$ 58,679,130	\$ 1,832,193	\$ 1,320,000	\$ 61,831,323
2	2016	\$ 60,732,900	\$ 1,896,319	\$ 1,320,000	\$ 63,949,219
3	2017	\$ 62,858,551	\$ 1,962,691	\$ 1,320,000	\$ 66,141,242
4	2018	\$ 65,058,601	\$ 2,031,385	\$ 1,320,000	\$ 68,409,986
5	2019	\$ 67,335,652	\$ 2,102,483	\$ 1,320,000	\$ 70,758,135
6	2020	\$ 69,692,400	\$ 2,176,070	\$ 1,320,000	\$ 73,188,470
7	2021	\$ 72,131,634	\$ 2,252,233	\$ 1,320,000	\$ 75,703,866
8	2022	\$ 72,131,634	\$ 2,252,233	\$ 1,320,000	\$ 75,703,866
9	2023	\$ 72,131,634	\$ 2,252,233	\$ 1,320,000	\$ 75,703,866
10	2024	\$ 72,131,634	\$ 2,252,233	\$ 1,320,000	\$ 75,703,866

**Tabla 95. Beneficios económicos por la generación eléctrica con la pollinaza**

<b>Año</b>	<b>Año</b>	<b>Ingresos Totales</b>	<b>Egresos Totales</b>	<b>Utilidad Total</b>
0	2015	\$ 106,422,142	\$ 59,785,046	\$ 46,637,095
1	2016	\$ 110,146,917	\$ 61,831,323	\$ 48,315,594
2	2017	\$ 114,002,059	\$ 63,949,219	\$ 50,052,840
3	2018	\$ 117,992,131	\$ 66,141,242	\$ 51,850,889
4	2019	\$ 122,121,856	\$ 68,409,986	\$ 53,711,870
5	2020	\$ 126,396,120	\$ 70,758,135	\$ 55,637,985
6	2021	\$ 130,819,985	\$ 73,188,470	\$ 57,631,515
7	2022	\$ 135,398,684	\$ 75,703,866	\$ 59,694,818
8	2023	\$ 135,398,684	\$ 75,703,866	\$ 59,694,818
9	2024	\$ 135,398,684	\$ 75,703,866	\$ 59,694,818
10	2025	\$ 135,398,684	\$ 75,703,866	\$ 59,694,818

Se realiza un costeo por tonelada de pollinaza, se muestra en la Tabla 96.

**Tabla 96. Ingresos, costos y utilidad por tonelada de pollinaza utilizada**

<b>Año</b>	<b>Año</b>	<b>Ingresos Totales por t de Pollinaza al 40° Hum.</b>	<b>Egresos Totales por t de Pollinaza al 40° Hum.</b>	<b>Utilidad Total por t de Pollinaza al 40° Hum.</b>
0	2015	\$ 842.8	\$ 473.5	\$ 369.3
1	2016	\$ 842.8	\$ 473.1	\$ 369.7
2	2017	\$ 842.8	\$ 472.8	\$ 370.0
3	2018	\$ 842.8	\$ 472.4	\$ 370.4
4	2019	\$ 842.8	\$ 472.1	\$ 370.7
5	2020	\$ 842.8	\$ 471.8	\$ 371.0
6	2021	\$ 842.8	\$ 471.5	\$ 371.3
7	2022	\$ 842.8	\$ 471.2	\$ 371.6
8	2023	\$ 842.8	\$ 471.2	\$ 371.6
9	2024	\$ 842.8	\$ 471.2	\$ 371.6
10	2025	\$ 842.8	\$ 471.2	\$ 371.6

**Evaluación económica de la pollinaza al 40% (sin mejoras en Granjas)**

El comportamiento del escenario sin mejoras se muestra en la Tabla 97 y Tabla 98.

**Tabla 97. Inversión inicial para para combustionar la pollinaza (sin mejoras)**

<b>Desglose de la Inversión</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>Total</b>
Terrenos	\$ -	\$ -	\$ -
Edificios y drenajes	\$ 7,775,310	\$ 1,943,827	\$ 9,719,137
Equipo de proceso	\$ 113,550,997	\$ 48,664,713	\$ 162,215,710
Montajes, Refuerzo + Serv. + Fletes	\$ 49,529,462	\$ 21,226,912	\$ 70,756,374
Costos preoperativo y Cap. de trabajo	\$ -	\$ 4,657,465	\$ 4,657,465
I+D Proceso e Ingeniería	\$ 12,041,377	\$ 5,160,590	\$ 17,201,967
Subtotal	\$ 182,897,145	\$ 81,653,507	\$ 264,550,652
Equipo Granjas	\$ -	\$ -	\$ -
<b>Total</b>	<b>\$ 182,897,145</b>	<b>\$ 81,653,507</b>	<b>\$ 264,550,652</b>

**Tabla 98. Aportación de capital por los socios para generación eléctrica con pollinaza**

<b>Año</b>	<b>Año</b>	<b>Aportación de Socios (20%)</b>	<b>Financiamiento a largo plazo (80%)</b>	<b>Total</b>
0	2015	\$ 36,579,429	\$ 146,317,716	\$ 182,897,145
1	2014	\$ 16,330,701	\$ 65,322,806	\$ 81,653,507
		\$ 52,910,130	\$ 211,640,522	\$ 264,550,652

Los ingresos totales del flujo de efectivo incluyen los ingresos por pollinaza y los ingresos por la generación de energía. Los costos del flujo de efectivo son la compra de la pollinaza con el 40% de contenido de humedad y los costos producción asociados a la energía eléctrica, la ceniza al ser un derivado no generan costos de producción, ver Tabla 99.

Tabla 99. Flujo de efectivo de combustión de pollinaza al 40% (Sin Mejoras)

Año	Año	Inversión Inicial	Ingresos Totales	Egresos Totales	Utilidad Total	Flujo de Efectivo	Flujo de Efectivo Acum.
0	2014	\$182,897,145	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 182,897,145	-\$182,897,145
1	2015	\$ 81,653,507	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 81,653,507	-\$ 264,550,652
2	2016	\$ -	\$ 114,002,059	\$ 63,949,219	\$ 50,052,840	\$ 50,052,840	-\$ 214,497,813
3	2017	\$ -	\$ 117,992,131	\$ 66,141,242	\$ 51,850,889	\$ 51,850,889	-\$162,646,924
4	2018	\$ -	\$ 122,121,856	\$ 68,409,986	\$ 53,711,870	\$ 53,711,870	-\$108,935,054
5	2019	\$ -	\$ 126,396,120	\$ 70,758,135	\$ 55,637,985	\$ 55,637,985	-\$ 53,297,068
6	2020	\$ -	\$ 130,819,985	\$ 73,188,470	\$ 57,631,515	\$ 57,631,515	\$ 4,334,447
7	2021	\$ -	\$ 135,398,684	\$ 75,703,866	\$ 59,694,818	\$ 59,694,818	\$ 64,029,265
8	2022	\$ -	\$ 135,398,684	\$ 75,703,866	\$ 59,694,818	\$ 59,694,818	\$ 123,724,083
9	2023	\$ -	\$ 135,398,684	\$ 75,703,866	\$ 59,694,818	\$ 59,694,818	\$ 183,418,901
10	2024	\$ -	\$ 135,398,684	\$ 75,703,866	\$ 59,694,818	\$ 59,694,818	\$ 243,113,718

Se realiza la evaluación financiera del proyecto de generación de pollinaza con una humedad del 40% sin realizar mejoras al interior de las casetas del pollo de engorde, la evaluación se realiza para un horizonte de planeación a 10 años y 25 años con una tasa de descuento del 10% (tasa mínima atractiva de retorno), los resultados se muestran en la Tabla 100.

Tabla 100. Indicadores Financieros de pollinaza del 40% (Sin Mejoras)

Concepto	Cantidad	Cantidad	Unidad
Inversión Inicial	\$ 264,550,652	\$ 264,550,652	Pesos
Horizonte de Planeación	10.00	25.00	Años
Tasa de Descuento (TMAR)	10.00%	10.00%	% TMAR
TIR	12.66%	18.42%	% TIR
Valor Presente	\$ 216,668,412	\$ 391,721,848	Pesos
Valor Presente Neto	\$ 33,771,267	\$ 208,824,703	Pesos



### Escenarios de producción de bioenergía con diferente humedad en la pollinaza.

Los resultados de bioenergía y ceniza que se generan de la combustión de la pollinaza sirven para determinar el valor económico por su utilización energética con 4 diferentes contenidos de humedad de la pollinaza.

Los ingresos económicos del sistema de generación de bioenergía representa el 66% de los ingresos por la venta de excedentes eléctricos y el biofertilizante (cenizas) representa el 33%, sin embargo los costos de la materia prima (pollinaza a precio de mercado actual) representan el 52.7% de los ingresos, estos valores se representan en la Tabla 101.

Existen otros ahorros económicos indirectos como consecuencia de la implementación del sistema de generación que no están considerados en la evaluación, como son la reducción del impacto ambiental por la degradación de la pollinaza en ambientes abiertos no controlados, una reducción en el tiempo de 0.25 ciclos de producción de pollo de engorde por el desalojo más rápido de pollinaza de la granja reduciendo los periodos de desinfección, y los costos asociados por su desalojo forzado.

**Tabla 101. Ingresos y egresos de generación con pollinaza en el año 7 a plena capacidad**

<b>Humedad de la Pollinaza</b>	<b>40%</b>	<b>35%</b>	<b>30%</b>	<b>25%</b>	<b>Unidad</b>
Costo de pollinaza	\$72,131,634	\$72,131,634	\$72,131,634	\$72,131,634	Pesos
Otros costos para energía	\$3,572,233	\$3,815,874	\$4,039,748	\$4,322,919	Pesos
<b>Costos Totales</b>	<b>\$75,703,866</b>	<b>\$75,947,507</b>	<b>\$76,171,381</b>	<b>\$76,454,553</b>	<b>Pesos</b>
Venta de energía	\$90,941,608	\$100,779,457	\$109,819,123	\$121,253,149	Pesos
Venta de Cenizas	\$44,457,077	\$44,457,077	\$44,457,076	\$44,457,076	Pesos
<b>Ventas Totales</b>	<b>\$135,398,684</b>	<b>\$145,236,533</b>	<b>\$154,276,200</b>	<b>\$165,710,225</b>	<b>Pesos</b>
Utilidad bioenergía y biofertilizante	\$59,694,818	\$69,289,026	\$78,104,819	\$89,255,673	Pesos
<b>Beneficios totales</b>	<b>\$59,694,818</b>	<b>\$69,289,026</b>	<b>\$78,104,819</b>	<b>\$89,255,673</b>	<b>Pesos</b>

Para la obtención del valor presente neto de cada escenario se utiliza la Ecuación 1.

En la Tabla 102 se presentan los resultados financieros de la inversión inicial del sistema completo de generación, incluyendo las inversiones requeridas en compra de equipamiento para las granjas

que ayude a reducir el contenido de humedad en la pollinaza a partir de las predicciones del modelo de lógica difusa, y poder lograr una reducción en el contenido de humedad.

**Tabla 102. Índices financieros (con mejoras en las granjas) en el año 7 a plena capacidad**

<b>Escenario</b>	<b>40%</b>	<b>35%</b>	<b>30%</b>	<b>25%</b>	<b>unidad</b>
Inversión por generación	\$264,550,651	\$293,169,120	\$319,465,661	\$352,727,430	Pesos
Inversión Mejoras Reducir humedad	-	\$17,098,301	\$34,196,603	\$51,294,904	Pesos
Inversión Total	\$264,550,651	\$310,267,421	\$353,662,263	\$404,022,334	Pesos
Valor Presente Neto a 10 años	\$33,771,267	\$36,463,461	\$37,613,032	\$43,390,105	Pesos
Valor Presente Neto a 25 años	\$208,824,703	\$239,651,653	\$266,653,299	\$305,129,947	Pesos
Tasa Interna de Retorno a 10 Años	12.66%	12.46%	12.24%	12.16%	% TIR
Tasa Interna de Retorno a 25 Años	18.42%	18.27%	18.11%	18.13%	% TIR
Periodo de recuperación	5.43	5.23	5.09	4.95	Año

\* El periodo de recuperación incluye un año un año más por la duración de construcción de la obra de dos años. Retrasándose un año el arranque de la operación.

\* No incluye ingresos por certificados de reducción de emisiones de efecto invernadero.

Se presenta un escenario adicional que no incluye la inversión de compra de equipos a granjas que ayudan a mejorar la calidad de la pollinaza que permitan reducir su contenido de humedad, en él se refleja la viabilidad del sistema de generación sin realizar mejoras a las granjas, en este escenario solo se incluye la inversión de generación, ver Tabla 103.

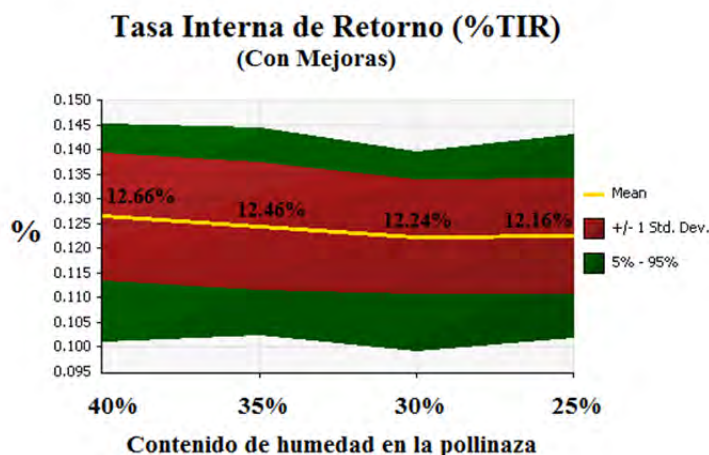
**Tabla 103. Índices financieros (Solo generación, Sin Mejoras en Granjas)**

<b>Escenario</b>	<b>40%</b>	<b>35%</b>	<b>30%</b>	<b>25%</b>	<b>unidad</b>
Inversión por generación	\$264,550,651	\$293,169,120	\$319,465,661	\$352,727,430	Pesos
Inversión Mejoras Reducir humedad	-	-	-	-	Pesos
Inversión Total	\$264,550,651	\$293,169,120	\$319,465,661	\$352,727,430	Pesos
Valor Presente Neto a 10 años	\$33,771,267	\$52,784,567	\$70,255,244	\$92,353,422	Pesos
Valor Presente Neto a 25 años	\$208,824,703	\$255,972,759	\$299,295,510	\$354,093,264	Pesos
Tasa Interna de Retorno a 10 Años	12.66%	13.70%	14.47%	15.27%	% TIR
Tasa Interna de Retorno a 25 Años	18.42%	19.22%	19.82%	20.44%	% TIR
Periodo de recuperación	5.43	5.23	5.09	4.95	Años

Después de analizar los gráficos se puede concluir que la variable que más impacta el valor presente neto es el precio de referencia de la pollinaza, seguido de las producciones de energía a diferentes humedades y las inversiones para mejorar la pollinaza en las granjas.

La decisión de invertir en el sistema de generación con las inversiones adicionales en las mejoras de las granjas tiene menor riesgo, menores ganancias y el sistema es más estable al ayudar a controlar el contenido de humedad de la pollinaza. El escenario sin inversiones en mejoras en las granjas tiene mayor riesgo y mayor ganancia pero en consecuencia mayor probabilidad de fluctuaciones en los parámetros de contenido de humedad en la pollinaza que favorezcan la combustión.

El escenario con el 40% de contenido de humedad requiere menor inversión para la generación, y no se requiere invertir en mejoras en granjas, solo combustionar, sin embargo los escenarios 2, 3 y 4 está influenciado por la inversión de las mejoras en granjas, ver Figura 58 y Figura 59. El escenario más rentable es con el contenido de humedad del 35%.



**Figura 58. Tasa interna de retorno de 4 escenarios de humedad a 10 años (con mejoras)**

El escenario del 25% de humedad es más rentable que el escenario del 40%, pero al inversor le resulta más atractivo el escenario con el 40% que tiene una TIR del 12.66% con un periodo de recuperación de 5.43 años porque no se requiere realizar grandes inversiones en generación y en mejoras con respecto al escenario del 25% con una TIR del 12.16%.

La diferencia entre ambos escenarios con un 25% de humedad es de 2.61% de IRR, una diferencia en el tiempo de recuperación de solo 0.48 años, y una diferencia de 51.24 millones de pesos de inversiones en mejoras más 87.77 millones de pesos de inversión para hacer una planta de generación más grande que sea capaz de combustionar pollinaza del 25% de contenido de humedad.

Al inversionista no le resulta atractivo invertir 139.47 millones de pesos de más si la rentabilidad y periodo de recuperación será similar; esto representa un 52.7% de inversión adicional sobre la Inversión del escenario del 40% sin hacer mejoras, es por eso la importancia de continuar realizando investigaciones en biomasa y bioenergía para desarrollar tecnologías más rentables y eficientes.

**Tasa interna de retorno (% TIR) de los escenarios con diferente humedad (a 10 años)**

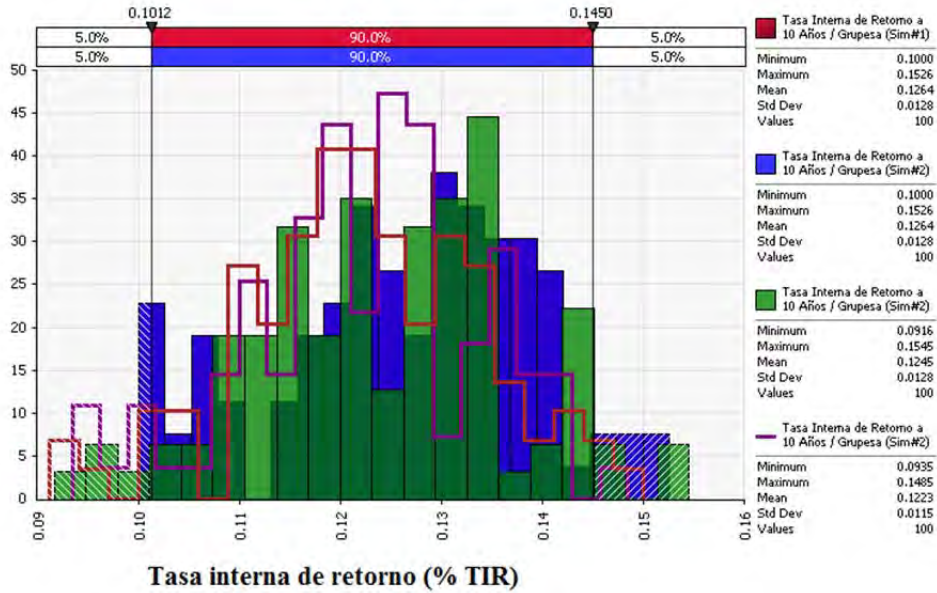


Figura 59. Tasa interna de retorno a 10 años (con mejoras)

Se realizan un análisis sin considerar las inversiones en Mejoras en las granjas. El escenario con el 25% de humedad (sin mejoras), es el mejor debido a que el contenido de humedad es bajo con el 25% de humedad sin realizar inversiones en mejoras adicionales a las granjas, es decir que saliera con esa humedad por sí sola, como se muestra en la Figura 60 y Figura 61.

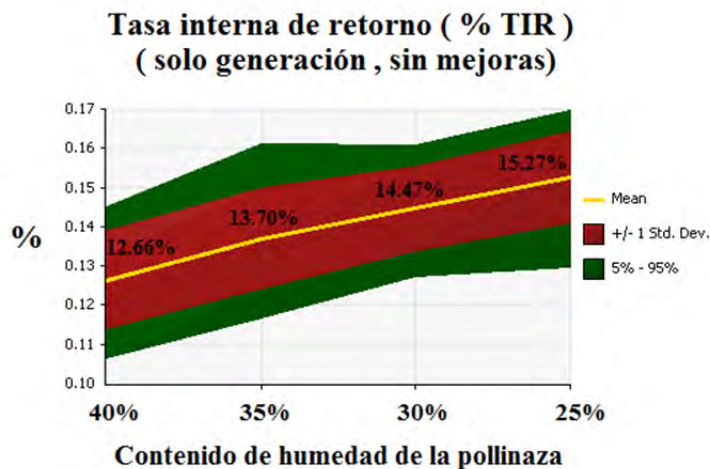
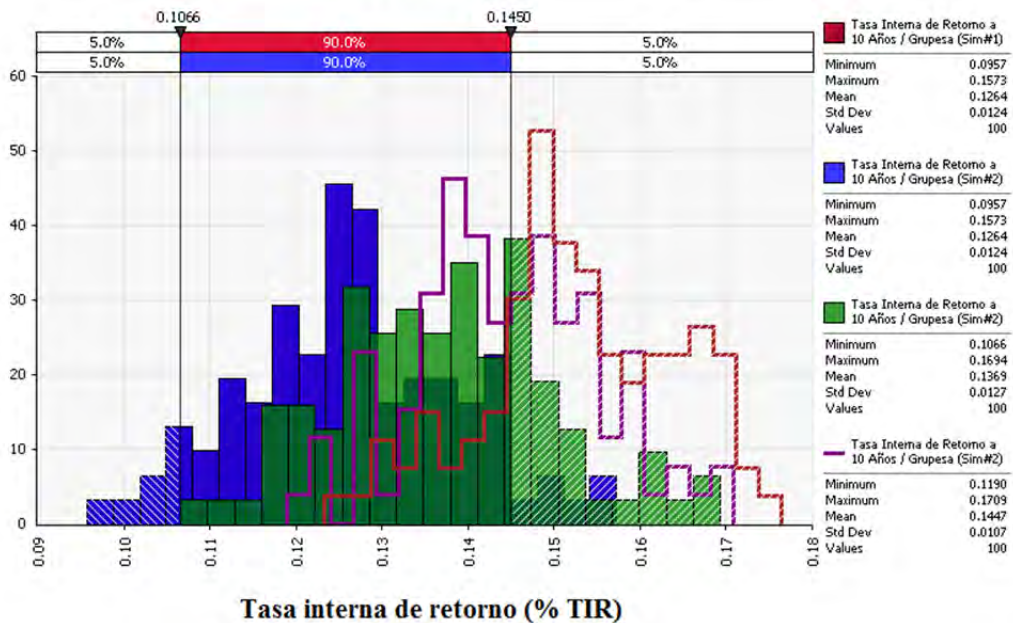


Figura 60. Tasa interna de retorno de 4 escenarios de humedad a 10 años (sin mejoras)

Este escenario es poco probable que ocurra, a menos que la zona donde se desarrolle el proyecto tenga un alto número de horas de insolación, humedad relativa baja, una alta radiación solar, una buena salud digestiva el ave que favorezca una efectiva evaporación del agua en la pollinaza y/o se logre pollinaza de baja humedad por si sola. El contenido de humedad real actual registrado es del 40%.

**Tasa interna de retorno (% TIR) de los escenarios con diferente humedad ( a 10 años )**



**Figura 61. Tasa interna de retorno a 10 años (sin mejoras)**

Con la realización del proyecto se mejorarán las condiciones de vida de los pollos de engorde durante su crecimiento, lo que se verá reflejado en el incremento de los ingresos por venta de pollo de engorde en mejores condiciones físicas, aumento en peso, reducción de quemaduras y salud animal, los ahorros económicos de estos aspectos pueden aumentar la rentabilidad del desarrollo tecnológico

### 3.1.6.1. Alternativas tecnológicas para la pollinaza.

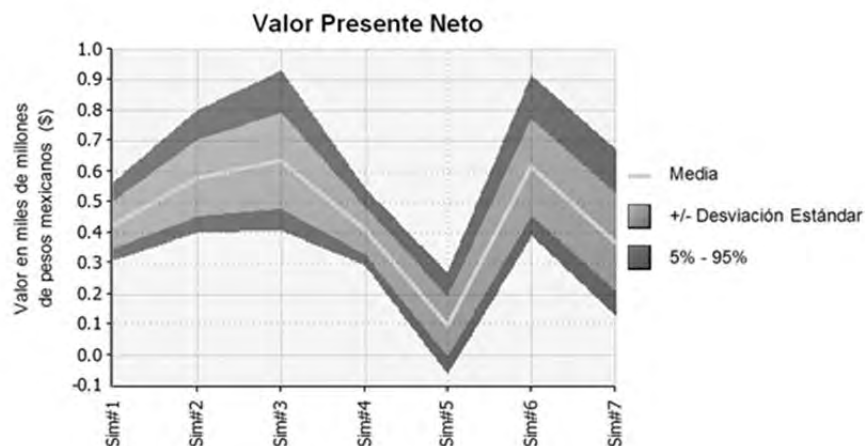
Debido a que se tuvo la interrogante sobre si es más redituable transformar la pollinaza en bioenergía que venderla a granel, se consideró apropiado realizar un análisis de riesgo para determinar que tecnología implementar (digestión anaeróbica, co-digestión anaeróbica o combustión directa de pollinaza) por los altos montos de inversión, es por ello que se decide realizar un análisis de escenarios que no sólo incluya las diferentes opciones de inversión, sino también la incertidumbre de determinadas situaciones, ver el capítulo 2.2.2.1 Selección de tecnología energética para utilizar la pollinaza.

Se emplea el método de simulación Montecarlo, los resultados de la simulación financiera y riesgo se muestran en la Tabla 104.

**Tabla 104. Resultados financieros de los 7 escenarios**

<b>Resultados financieros de 7 Escenarios</b>			
<b>Escenarios</b>	<b>Inversión Inicial y Mejoras</b>	<b>VP</b>	<b>VPN</b>
Escenario 1	\$ -	\$ 426,684,133	\$ 426,684,133
Escenario 2	\$ 77,203,606	\$ 657,840,676	\$ 580,637,069
Escenario 3	\$ 177,582,779	\$ 813,853,141	\$ 636,270,361
Escenario 4	\$ 10,000,455	\$ 416,988,704	\$ 406,988,249
Escenario 5	\$ 126,381,818	\$ 220,006,768	\$ 93,624,950
Escenario 6	\$ 187,583,234	\$ 804,319,438	\$ 616,736,204
Escenario 7	\$ 278,688,234	\$ 650,378,733	\$ 371,690,499
* Pesos Mexicanos			\$ 426,684,133

La simulación se efectúa con 1000 iteraciones para cada uno de los 7 escenarios para determinar la mejor alternativa energética al utilizar pollinaza, con una tasa de descuento del 9% y un horizonte de planeación de 10 años, su comportamiento se aprecia en la Figura 62.



**Figura 62. Rentabilidad de los 7 escenarios utilizando pollinaza.**

Después de analizar los gráficos se puede concluir que la variable que más impacta el valor presente neto es el precio de referencia del combustóleo, seguido de las producciones y mejoras por tipo de pollinaza (Cid-Chama, 2012). Los escenarios donde existe mayor riesgo y ganancias son en los escenarios 3 y 6.

Finalmente se tiene que el escenario que proporciona mayores beneficios a pesar de presentar cierto riesgo es el escenario 3 que es “mejora de la calidad de Pollinaza y combustión de pollinaza” con un valor presente neto (VPN) = \$636 millones de pesos mexicanos; por otro lado, el escenario que le sigue a éste es el escenario 6 “Mejora de la calidad de pollinaza, combustión de pollinaza y biogás usando co-digestión” y escenario 2 “Combustión de pollinaza seca actual”, en consecuencia, mejorarán las condiciones de vida de las aves, lo que se verá reflejado en el incremento de los ingresos por venta de pollo de engorde en mejores condiciones físicas.

La combustión es la alternativa más rentable para la pollinaza, por este motivo se decide evaluar y mejorar toda la pollinaza disponible con la tecnología de combustión.



### 3.1.7. Sustentabilidad ambiental con reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Al combustionar pollinaza del 40% de humedad se mitiga 32,943 toneladas de tCO<sub>2</sub>eq al medio ambiente en un año por la venta de energía excedente, considerando un factor de emisión de 0.4999 tCO<sub>2</sub>eq por MWh. (GEI, 2013), en la Tabla 105 se muestra la equivalencia de gases GEI que podrían ser mitigados al producir energía eléctrica utilizando pollinaza a diferente contenido de humedad. En el análisis económico no considera el valor que representa la posible venta de los certificados de reducción de emisiones de efecto invernadero (CER's), porque actualmente el valor monetario es muy bajo por lo que no es representativo ni hace cambios significativos al estudio (0.125 usd/CER).

**Tabla 105. Reducción de gases efecto invernadero GEI**

<b>Captura de gases efecto invernadero</b>	<b>Pollinaza al 40%</b>	<b>Pollinaza al 35%</b>	<b>Pollinaza al 30%</b>	<b>Pollinaza al 25%</b>
Excedentes de energía eléctrica para la venta (MWh)	65,900	73,029	79,579	87,865
Reducción de emisiones de gases GEI (tCO <sub>2</sub> eq)	32,943	36,507	39,781	43,923

### 3.2. Cadena de valor avícola utilizando lodos residuales

En el eslabón de procesamiento de pollos de engorde es donde se sacrifican los pollos y sus partes se segmentan para venderse en centrales de abasto, supermercados y al detalle, durante el procesamiento se generan los efluentes y se forman de la contribución líquida y sólida de distintas etapas del proceso, como son la sangre proveniente del área de desangrado cuando se mata al ave, el cloro que se adhiere en el lavado e hidratación del pollo, la grasa que se genera en diferentes proporciones durante las etapas del eviscerado, proporciones de plumas que se originan en el área de escaldado etapa en la que se pone al pollo de engorde en agua hirviendo para que se facilite el desplume, entre otros.

Los efluentes son tratados física y químicamente en la planta de tratamiento de aguas residuales para separar el agua tratada para cumplir con las normas ambientales para posteriormente ser vertida en el río, el agua que queda al final del tratamiento tiene un alto contenido de compuestos orgánicos, entre los que destacan los carbohidratos, lípidos, proteínas y químicos artificiales que se encuentran suspendidos generando una alta carga orgánica en ellos y porque no cumplen con la norma de tratamiento, por este motivo se le llama lodo residual y por sus características debe ser confinado para su tratamiento en un relleno sanitario.

En la Figura 63 se presenta el “procesamiento” en él intervienen materias primas e insumos que se muestran a la izquierda, para producir y obtener productos, residuos y mermas que se muestran a la derecha. Los factores y los recursos que afectan a la producción de lodos residuales están determinados por la calidad y cantidad de aves que son procesadas, así como la tecnología y eficiencia de los equipos industriales que se emplean.

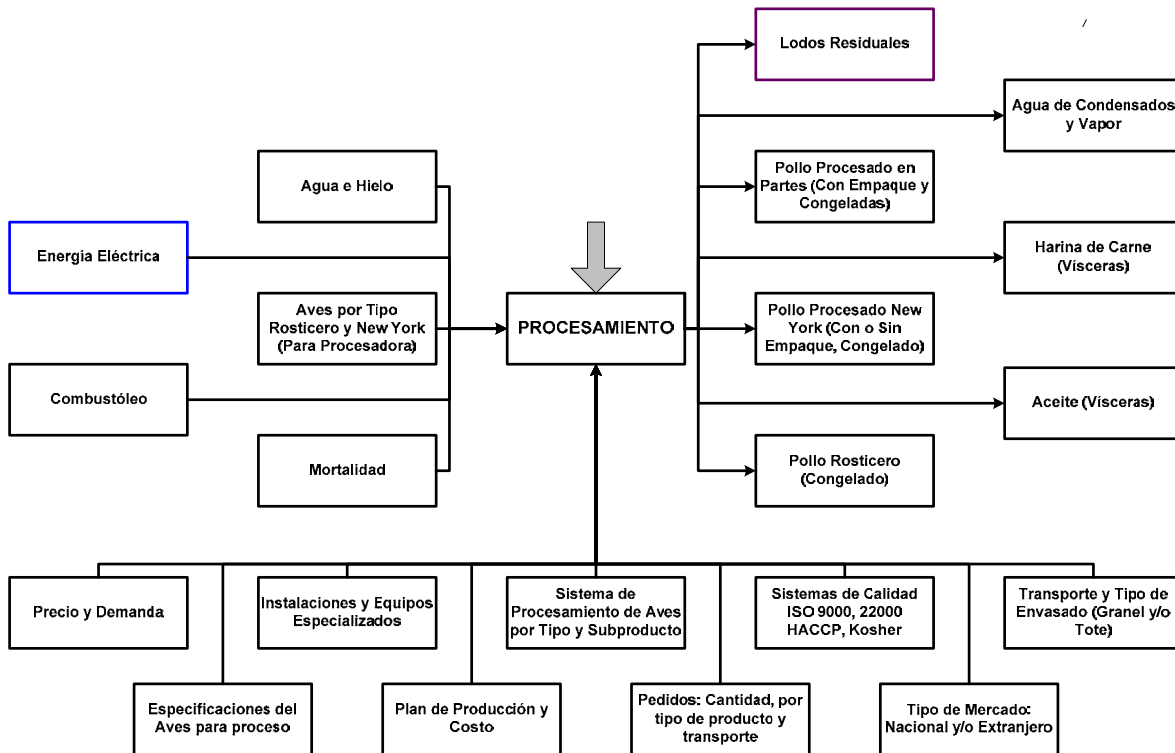


Figura 63. Sistema en el eslabón de procesamiento de la cadena de valor avícola

### 3.2.1. Análisis del sistema de producción de lodos residuales

En México, el manejo actual de lodos residuales municipales e industriales no ha tenido la importancia que merece y son pocas las industrias que cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que disponen de un sistema de tratamiento de lodos, además, las cifras referentes a la cantidad de lodos generados a nivel municipal y sobre todo a nivel industrial son muy escasos o casi nulos.

La planta procesadora de aves es la unidad estratégica de negocios de la cadena de valor avícola y es encargada del procesamiento industrial del pollo de engorde para obtener carne de pollo en partes o diversas presentaciones.

#### Rango de pollos a procesar por día

El análisis del sistema inicia con la asignación de probabilidad para distintos rangos de procesamiento de aves que pueden llegar a ocurrir al día, dependiendo del programa y lotes de producción, ver Tabla 106.

**Tabla 106. Asignación de probabilidad al rango de producción.**

<b>Evento</b>	<b>Rangos</b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Producción diaria</b>
Rango de producción 1	7,594 - 7,867	2.63%	7,730
Rango de producción 2	42,362 - 94,614	97.37%	72,745

Si el rango del programa de producción de pollos de engorde a procesar es un lote pequeño el evento asignado será el evento lote 1 de 7,730 pollos con una probabilidad de 2.65%, y si es el rango grande será el evento lote 2 de 72,745 pollos con una probabilidad de 97.37%, es decir que la planta procesadora de aves regularmente tiene producciones de pollo entre 42,362 pollos y 94,614 pollos. La distribución de probabilidad utilizada para los rangos se encuentra en sección de anexos 2.1.1.1 en la Análisis del sistema de producción de lodos residuales, ver Tabla 38.

#### **Numero de procesos a realizar por día**

El número de procesos por tipo de pollo a realizar por día se determina considerando la frecuencia de los tipos de pollo procesado para cada uno de los 7 rangos de producción definidos. La Tabla 107 indica la proporción del número de procesos por tipo de pollo que serán efectuados al día según el rango de producción de pollos en la planta procesadora.

Existe mayor probabilidad el tipo de pollo a procesar cuando la asignación es la más alta en cada rango. El rango de procesamiento entre 7,868 a 42,361 pollos nunca ocurre, por lo cual no tiene asignado ningún tipo de pollo.

**Tabla 107. Asignación del número de procesos a realizar por réplica de simulación**

<b>LRS</b>	<b>Rango de producción</b>	<b>Tipo de Proceso</b>				<b>Procesos por tipo de pollo</b>	<b>Suma</b>
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>		
7,867	7,594 - 7,867	100.00%	-	-	-	1	100.00%
42,361	7,868 - 42,361	-	-	-	-	-	-
45,411	42,362 - 45,411	-	-	-	100.00%	4	100.00%
46,324	45,412 - 46,324	-	-	-	100.00%	4	100.00%
50,960	46,325 - 50,960	-	100.00%	-	-	2	100.00%
83,149	50,961 - 83,149	-	1.10%	98.90%	-	3	100.00%
94,614	83,150 - 94,614	-	8.33%	91.67%	-	3	100.00%

Los procesos por tipo de pollo a realizar se basan en una distribución discreta utilizando los porcentajes de ocurrencia por el número de procesos en cada rango, se efectúa este proceso para seleccionar el tipo de pollo que será procesado en cada réplica de la simulación equivalente a un día, y se asigna el proceso correspondiente cuando el valor de producción caiga dentro del rango de producción.

Cuando el rango de producción es entre 46,325 y 50,960 pollos al día tenemos la certeza que siempre se realizaran el procesamiento de dos tipos de pollos, y si es entre 42,362 y 45,411 pollos se realizara el procesamiento de 4 tipos de pollos.

### Porcentaje y Tipo de pollo a procesar por día

Una vez que se determina la cantidad de procesos a realizar por día equivalente a una réplica de simulación, se procede a definir el tipo de proceso o mezcla de tipo de procesos que serán realizados al día, en la Tabla 108 se asignan la probabilidad de ocurrencia.

**Tabla 108. Asignación porcentual y tipo de pollo a procesar**

Decisión	Procesos al día (Normalizados)	Asigna	Seco Natural	Hidratado Natural	Hidratado Pintado	Kosher	Probabilidad
2	1	1	100.00%	-	-	-	33.30%
	1	2	-	-	-	100.00%	66.70%
3	2	3	54.30%	-	45.70%	-	50.00%
	2	4	86.00%	-	-	14.00%	50.00%
5	3	5	31.20%	22.20%	46.60%	-	100.00%
6	4	6	40.20%	29.60%	19.10%	11.10%	100.00%

Si el número de procesos a realizar es 1 al día existen la probabilidad que se procesen pollo tipo seco natural con una probabilidad del 33.3% o el pollo tipo kosher con una probabilidad del 66.7%, la decisión en la simulación es procesar el tipo de pollo con la mayor probabilidad de ocurrencia, en este caso la decisión es 2, procesar tipo kosher.

Cuando se procesan dos tipos de pollo al día puede ser que se asigne con la misma probabilidad la mezcla de pollo seco natural con hidratado pintado o seco natural con kosher en diferentes proporciones cada uno, en este caso el número pseudoaleatorio con la mayor proporción en la réplica de simulación fue 3, procesar tipo de pollo hidratado pintado con pollo seco natural.

### Llegada de pollos de engorde por tipo de proceso

La cantidad de pollos a procesar por día tiene una media de 72,745 pollos, ver Tabla 109, el valor fue declarado en el rango de producción 1 de la Tabla 38 y con el uso de la asignación de probabilidad de las Tabla 107 el número de procesos que serán efectuados para ese día.

**Tabla 109. Cantidad de pollos a procesar y numero de procesos a efectuar**

Variable	Valor Estocástico	Unidad
Llegada de pollos de engorde	72,745	pollos/día
Tipos de pollos procesados en el día	3	Procesos al Día

El lote de producción de pollos a procesar es resultado de utilizar la decisión en la asignación del tipo de pollo a procesar para cada replica de simulación, en este caso las proporciones son utilizadas por tipo de pollo provienen de la Tabla 108 y se dividen para procesar 22,729 pollos tipo seco natural, 16,148 pollos tipo hidratado natural, y 33,866 pollos tipo hidratado pintado, ver la Tabla 110.

El modelo de simulación genera diferentes valores para cada réplica de la simulación, la simulación que ha sido utilizada para la redacción de este trabajo de investigación no arroja valores para el proceso de pollo tipo kosher.

**Tabla 110. Procesamiento de aves por tipo de pollo por día**

Programa de Procesamiento	Total	Seco Natural	Hidratado Natural	Hidratado Pintado	Kosher	Unidad
Programa de Procesamiento de Aves	72,745	22,729	16,148	33,866	-	Aves/día
Validación de Programa	100.00%	31.20%	22.20%	46.60%	0.00%	% Aves/día
Rendimiento de Peso de Ave en Pie	2.42	3.08	2.48	1.95	3.08	Kilos/Ave
Programa de Kilos a procesar	175,945	69,916	40,072	65,957	-	Kilos/día

Al analizar los procesos de producción se determinan los kilogramos de carne de pollo que será procesada a partir de los kilogramos que pesa cada tipo de pollo, que es resultado de la multiplicación de los pollos a procesar por su peso, con este análisis se logra determinar la distribución de probabilidad para estimar el peso de cada pollo, el resultado se encuentra en la Tabla 38.

Los 72,745 pollos que llegan a la planta procesadora de aves equivalen a 175.9 toneladas de carne de pollo, de las cuales se les debe de restar la merma o perdidas que existen derivados de pollos ahogados y pollos remolachos que son aquellos que no cumplen con las especificaciones de calidad para ingresar y ser procesados.

### **Mermas de pollo de engorde.**

Cuando el transporte de los pollos de engorde llega a los andenes de descarga se realiza una selección de pollos sobre las condiciones y especificaciones de calidad del pollo antes de ingresar al procesamiento. Este criterio de selección genera un porcentaje de mermas por ahogamiento en 2.79% y por remolachos del 11.91% haciendo una merma total del 14.7% con respecto a los pollos que llegan para ser procesador, en la Tabla 111 se muestran las mermas por tipo de pollo al día.

**Tabla 111. Mermas por tipo de pollo**

<b>Merma de Aves para procesamiento</b>	<b>Total</b>	<b>Seco Natural</b>	<b>Hidratado Natural</b>	<b>Hidratado Pintado</b>	<b>Kosher</b>	<b>Unidad</b>
Mermas de pollos Ahogados	2.79%	0.43%	0.33%	0.85%	1.19%	% pollos/día
Mermas de pollos Remolachos	11.91%	1.01%	0.55%	6.67%	3.67%	% pollos/día
Merma total de pollos	2,995.00	326.24	141.93	2,526.83	-	mermas/día

La merma total al día equivale a 2,995 pollos de engorde que no serán procesados para carne de consumo humano, en cambio estos serán desviados a la planta de rendimientos para elaborar aceite y harina de carne para el mercado del suplementos alimenticios para rumiantes.

### Ingreso de pollos de engorde al procesamiento.

Los pollos que ingresan al procesamiento son el 85.3% de los pollos que llegaron a la planta procesadora de aves, haciendo un total de 69,750 pollos, equivalente a 169 toneladas de carne de ave (López-Andrés, 2012), ver la Tabla 112.

**Tabla 112. Pollos procesados**

<b>Programa de Procesamiento</b>	<b>Total</b>	<b>Seco Natural</b>	<b>Hidratado Natural</b>	<b>Hidratado Pintado</b>	<b>Kosher</b>	<b>Unidad</b>
Aves a procesar	69,750	22,403	16,007	31,340	-	Aves/día
Programa de Kilos a procesar	169,668	68,913	39,720	61,036	-	Kilos/día
Velocidad de Ganchos	8,125	7,763	8,151	8,355	2,332	Ganchos/hr
Ganchos Vacíos	727	1,885	192	204	-	Ganchos/hr
Velocidad de Aves por Hora	7,398	5,878	7,960	8,151	2,332	Aves/hr
Sangre enviada a Harinas y Aceites	3,519	1,398	801	1,319	-	Kg/día

Los pollos procesados viajan a una velocidad de 8,125 ganchos por hora, este valor está definido por la utilización de una cadena continua que recorre de manera constante y en circuito la tres diferentes áreas de la planta procesadora y es la manera de medir los tiempos de procesamiento.

Si a la velocidad que viajan los ganchos se le resta la velocidad de los ganchos que van vacíos se obtiene los ganchos llenos, es decir los gachos que han sido utilizados al colgar el pollo, obteniendo una velocidad ponderada de 7,398 pollos por hora que es la velocidad con la que los pollos son procesados de manera general. La distribución de probabilidad de la velocidad de los ganchos vacíos se encuentra en la Tabla 40.

Para cada tipo de pollo la velocidad es variable, es decir que para procesar una mayor cantidad de pollos tipo hidratado pintado se debe aumentar la velocidad a 8,151 pollos por hora para cumplir con los tiempos de operación del turno de 8 horas más horas extra.



### Tiempos de operación del procesamiento.

Los tiempos de operación de procesamiento de pollo de engorde es 9.9 horas por día, sin considerar los tiempos de preparación, tiempos de espera, tiempos de limpieza, de comida y tiempos perdidos, si agregamos una hora de tiempo perdido el tiempo total de operación es de 11 horas para procesar 69,750 pollos al día.

En la Tabla 113 observamos que el tiempo para procesar pollo hidratado pintado es de 4.12 horas, el tiempo más alto y tiene correlación con los grandes volumen de pollos a procesar.

**Tabla 113. Tiempos de operación para el procesamiento de pollo**

Programa de Procesamiento	Total	Seco Natural	Hidratado Natural	Hidratado Pintado	Kosher	Unidad
Tiempos efectivos	9.99	3.85	2.02	4.12	-	Horas efectivas/Día
Tiempo total	11.08	4.18	2.52	4.37	-	Horas totales

### Tiempos de operación por área de procesamiento.

Cada tipo de pollo pasa por tres áreas para ser procesado 1) la recepción y matanza, 2) el eviscerado y 3) el empaque. Los periodos de tiempo más altos son para los tipos de pollo de mayor producción el seco natural y el hidratado pintado.

**Tabla 114. Tiempos de operación del área de 1 “recepción y matanza” (horas)**

Área 1 - Recepción y Matanza	Seco Natural	Hidratado Natural	Hidratado Pintado	Área 1	Kosher
1. Colgado	0.10	0.05	0.10	1. Sacrificio	-
2. Aturdido	0.05	0.02	0.05	2. Matanza	-
3. Matanza	0.03	0.01	0.03	3. Desangrado	-
4. Desangrado	0.31	0.16	0.33	4. Retiro	-
5. Escaldado 1	0.20	0.11	0.22	5. Retorno Conos	-
6. Escaldado 2	0.20	0.10	0.21	6. Banda Trans.	-
7. Desplumado A	0.12	0.06	0.13	7. Colgado	-
8. Desplumado B	0.09	0.05	0.09	8. Desplumado A	-
9. Corte de Patas	0.00	0.00	0.00	9. Desplumado B	-

10. Caída de Patas	0.11	0.06	0.12	10. Corte de Alas	-
11. Retorno	0.09	0.04	0.09	11. Corte de Patas	-
<b>Tiempo Total</b>	<b>1.28</b>	<b>0.66</b>	<b>1.37</b>	12. Caída de Patas	-
				13. Retorno	-
				<b>Tiempo Total</b>	<b>-</b>

Los tiempos de procesamiento por tipo de pollo son diferentes por área y por tipo de proceso. Es importante mencionar que cada tipo de pollo tiene un proceso diferentes por área, en la etapa de recepción y matanza regularmente son 11 actividades pero al hacer pollo tipo kosher se requieren 13 actividades, ver Tabla 114. Para la etapa 2 eviscerado son 12 actividades para los cuatro tipos de pollo, ver Tabla 115

**Tabla 115. Tiempos de operación del área 2 "eviscerado" (horas)**

Área 2 - Eviscerado	Seco	Hidratado	Hidratado	Kosher
	Natural	Natural	Pintado	
1. Recolgado	0.06	0.03	0.06	-
2. Desangrado	0.21	0.11	0.23	-
3. Corte de Cloaca	0.04	0.02	0.05	-
4. Corte de Pescuezo	0.04	0.02	0.05	-
5. Corte de Abdomen	0.12	0.06	0.12	-
6. Eviscerado	0.05	0.03	0.06	-
7. Inspección Manual	0.14	0.08	0.15	-
8. Pulmonera	0.06	0.03	0.06	-
9. Enjuague Final	0.03	0.02	0.03	-
10. Inspección Final	0.16	0.08	0.17	-
11. Salida	-	-	-	-
12. Retorno	0.37	0.20	0.04	-
<b>Tiempo Total</b>	<b>1.28</b>	<b>0.67</b>	<b>1.37</b>	<b>-</b>

En la etapa 3 empaque las actividades son diferentes para cada tipo de pollo procesado, seco natural requiere de 12 actividades, para hidratado natural son 8 actividades, para hidratado pintado 9 actividades y para kosher son 5 actividades, ver Tabla 116 y Tabla 117.

Tabla 116. Tiempos de operación del área 3 "empaque" – A (horas)

Área 3 - Empaque	Seco Natural	Área 3	Hidratado Natural
1. Rampa	-	1. Prechiller	-
2. Banda Seco	-	2. Chiller	0.01
3. Colgado	0.23	3. Rampa	-
4. Pesadora Maestro	0.20	4. Banda Colgado	-
5. Tumbadores	0.21	5. Colgado	0.34
6. Retorno	0.64	6. Pesadora Maestro	0.10
<b>Tiempo Total</b>	<b>1.28</b>	7. Tumbadores	0.11
		8. Retorno	0.11
		<b>Tiempo Total</b>	<b>0.67</b>

Tabla 117. Tiempos de operación del área 3 "empaque" – B (horas)

Área 3	Hidratado Pintado	Área 3	Kosher
1. Prechiller	-	1. Prechiller	-
2. Chiller	0.01	2. Chiller	-
3. Rampa	-	3. Rampa - Espera	-
4. Banda Colgado	-	4. Salado	-
5. Colgado	0.70	5. Enjuague	-
6. Pesadora Maestro	0.09	<b>Tiempo Total</b>	-
7. Pintado	0.12		
8. Tumbadores	0.23		
9. Retorno	0.23		
<b>Tiempo Total</b>	<b>1.37</b>		

### Elementos en los que se divide el pollo procesado

El pollo que es procesado se divide en 6 elementos principales con pesos distintos porque al mercado al que van a ser comercializados es especializado y exige que procesamiento sea de calidad (López-Andrés, 2012).

El pollo hidratado pintado su peso es de 1.95 kilos porque es un pollo dirigido a rosticerías, este debe ser pequeño y de color naranja el mercado así lo requiere. El pollo seco natural es el pollo que le llaman caliente porque es el que se comercializa el mismo día y no requiere hidratación. La hidratación es para que el pollo tenga más vida de anaquel, recupere algo de peso que perdió durante el procesamiento, facilite su congelación y reduzca la velocidad de deterioro. La suma de los pesos de los pollos de la Tabla 118 coincide con los pesos de la Tabla 110.

**Tabla 118. Proporción del pollo en 6 elementos**

% de pollo	Segmentación del pollo	Seco Natural	Hidratado Natural	Hidratado Pintado	Kosher	unidad
2.00%	Sangre	0.06	0.05	0.04	-	Kg Pollo
10.00%	Plumas	0.31	0.25	0.19	-	Kg Pollo
4.40%	Patas	0.14	0.11	0.09	-	Kg Pollo
6.90%	Cabeza	0.21	0.17	0.13	-	Kg Pollo
10.00%	Vísceras	0.31	0.25	0.19	-	Kg Pollo
66.70%	Carne en Canal	2.05	1.66	1.30	-	Kg Pollo
<b>100.0%</b>	<b>Peso del pollo</b>	<b>3.08</b>	<b>2.48</b>	<b>1.95</b>	-	<b>Kg Pollo</b>
	carne de pollo hidratado	-	1.88	1.47	-	Kg Pollo
	Absorción de agua	-	0.22	0.18	-	Kg agua/Pollo
	<b>Peso de pollo hidratado</b>	<b>3.08</b>	<b>2.70</b>	<b>2.13</b>		<b>Kg Pollo</b>
	Absorción de agua / día	-	3.59	5.51	-	M3 Agua/Día

Cuando se hidrata el pollo la carne absorbe agua, y es considerada agua que se utiliza en el proceso. Regularmente al procesar pollo hidratado natural se absorbe 3.6 m<sup>3</sup> de agua al día y en el proceso del hidratado pintado requiere de 5.5 m<sup>3</sup> de agua al día, esta absorción hace que el pollo incremente su peso un 9 %.

### 3.2.2. Control de variables para mejorar la calidad de lodos residuales

Los residuos industriales líquidos provenientes del sacrificio de las aves son generados a partir de la combinación de elementos orgánicos, no orgánicos y agua de uso industrial, estos se van mezclando con agua industrial a lo largo del procesamiento del pollo, a esta mezcla de residuos se les llama efluentes.

El pollo durante su procesamiento produce sangre, plumas, grasa proveniente del eviscerado y del corte de la piel y pedazos pequeños de carne provocado por los cortes en las maquinas, que son elementos difíciles de recuperar en su totalidad, principalmente por lo pequeño que pueden llegar a ser. Las mermas que pueden ser recuperadas se envían a la planta rendimiento.

El agua y los elementos resultantes del procesamiento del pollo que no fueron recuperados son considerados merma no recuperable y es enviada a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), los elementos que si son recuperables en la rejilla de mermas solidas se dirigen a la planta de rendimientos para elaborar aceite y harinas de pollo.

Para saber la cantidad de residuos que son generados a lo largo del proceso es importante estimar y separar el consumo de agua industrial en la totalidad de la planta procesadora y el agua utilizada solo para el procesamiento de pollos.

Para realizar la medición del agua en la planta procesadora de aves se instalaron medidores de flujo para que se pudieran medir la utilización del agua en la planta, posteriormente se realizan estimaciones aproximadas ara cada etapa del procesamiento.

#### **Consumo de agua.**

Actualmente la planta procesadora de aves consume 1,570 m<sup>3</sup> de agua al día, y son utilizados en 12 áreas diferentes que incluye el proceso, los servicios, la planta de hielo, en la planta de rendimientos, para el lavado y limpieza en toda la unidad industrial, este consumo equivalente a 22.5 litros de agua cada vez que se procesa un pollo.

El 50% del agua de uso industrial que es obtenida de pozo profundo es utilizada en el procesamiento de aves, es decir que utilizan 784 m<sup>3</sup> de agua por día, equivalente a 11.25 litros de agua por cada pollo que es procesado, ver Tabla 119.

Tabla 119. Consumo de agua por pollo procesado

Consumo de Agua por Área	Litros/pollo procesado	Litros/Producción de pollos	% de consumo
1) Proceso PPA	11.25	784,976	50.00%
2) Fábrica de Hielo	1.92	134,193	8.50%
3) Lavado de Jaulillas	1.78	124,015	7.90%
4) Canastillas	1.66	116,058	7.40%
5) Servicios	0.38	26,375	1.70%
6) Gases	0.55	38,184	2.40%
7) Planta de rendimiento de harinas	0.46	32,122	2.00%
8) PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales)	1.30	90,896	5.80%
9) Calderas	0.69	48,184	3.10%
10) Sanitización	1.84	128,499	8.20%
11) North Star (Embarques)	0.44	30,444	1.90%
12) No asignable o Fugas	0.23	16,061	1.00%
<b>Total de Consumo</b>	<b>22.51</b>	<b>1,570,007</b>	<b>100.00%</b>

En la Tabla 120 se observan los litros de agua utilizados para el procesamiento y los utilizados con respecto a toda la unidad industrial.

Tabla 120. Litros de agua utilizados para el procesamiento de aves

Consumo de Agua	Cantidad	Unidad
Consumo real por pollo procesado	11.25	Litros/pollo procesado
Consumo real por pollo procesado	22.51	Litros/pollo en la Planta
Consumo real en proceso PPA	784.98	M3/día Proceso PPA
Consumo real en planta total	1,570.01	M3/día Planta Industrial

El tipo de pollo que más demanda agua para el tipo de proceso y por requerimiento de sus especificaciones es el pollo tipo hidratado pintado, requiriendo un 54% del agua utilizada por día, ver Tabla 121.

Tabla 121. Litros de agua por tipo de pollo procesado

<b>Consumo de Agua por tipo de proceso</b>	<b>Total</b>	<b>Seco Natural</b>	<b>Hidratado Natural</b>	<b>Hidratado Pintado</b>	<b>Kosher</b>	<b>unidad</b>
% de Consumo por tipo de pollo	100.0%	22.7%	23.1%	54.2%	0.0%	% consumo/tipo Pollo
Consumo de agua en proceso	11.25	2.55	2.60	6.10	-	lt. Agua/pollo procesado
Consumo de agua en la planta procesadora	22.51	5.11	5.19	12.21	-	lt. Agua/pollo en la Planta
Consumo de agua por día	784.98	178.08	181.16	425.74	-	lt. Agua/día para el proceso
Consumo Total por hora	239.18	46.25	89.58	103.34	-	lt. Agua/por hora efectiva

Los residuos generados en el procesamiento de aves se adicional al agua utilizada para el proceso los 784 m<sup>3</sup> de agua.

#### **Consumo de agua por elemento derivado del pollo.**

Se realiza una estratificación del consumo de agua en cada área del procesamiento de pollo por tipo de elemento y/o parte del pollo.

Se tomaron muestras de consumo de agua en el punto del proceso donde se utiliza grandes cantidades de agua o se usa de manera continua (López-Andrés, 2012). El muestreo de flujo de agua del proceso se utilizaron medidores de flujo colocándose en las tuberías que abastecen al proceso y muestran el consumo de agua por segundo (lt/segundo) logrando que el totalizador lleva una medición continua de los metros cúbicos de agua utilizados en el proceso.

El consumo de agua es imprescindible en el proceso de obtención de carne de pollo, este recurso se utiliza para limpiar el pollo durante su procesamiento, sanitizarlo e hidratarlo; también se utiliza para arrastrar todos los residuos fuera del proceso. Actualmente no se puede realizar el procesamiento de pollos sin el uso de agua. Para atender este problema se debe tener muy en cuenta que una disminución en la cantidad de agua utilizada puede afectar en cierta manera a la calidad de la carne final.

En la Tabla 122 se presentan los valores de consumo de agua por día en cada área y los consumos por hora relacionados con cada actividad en el área.

**Tabla 122. Consumo de agua por proceso y por hora.**

<b>Consumo de agua por área</b>	<b>Total</b>	<b>Seco Natural</b>	<b>Hidratado Natural</b>	<b>Hidratado Pintado</b>	<b>Kosher</b>	<b>unidad</b>
<b>Área 1 - Recepción y matanza (Total)</b>	<b>123,304</b>	<b>43,949</b>	<b>23,067</b>	<b>56,287</b>	<b>-</b>	<b>lt/por día</b>
m <sup>3</sup> de agua en proceso del área 1	12.34	11.42	11.41	13.66	-	m <sup>3</sup> / hr.
<b>Área 2 - Eviscerado (Total)</b>	<b>187,384</b>	<b>70,575</b>	<b>41,035</b>	<b>75,775</b>	<b>-</b>	<b>lt/por día</b>
m <sup>3</sup> de agua en proceso del área 2	57.00	18.33	20.29	18.39	-	m <sup>3</sup> / hr.
<b>Área 2 - Eviscerado para pollo</b>	<b>115,575</b>	<b>42,261</b>	<b>24,698</b>	<b>48,615</b>	<b>-</b>	<b>lt/por día</b>
Eviscerado para Pollo	35.00	10.98	12.21	11.80	-	m <sup>3</sup> / hr.
<b>Área 2 - Empaque para menudencias</b>	<b>71,809</b>	<b>28,313</b>	<b>16,337</b>	<b>27,159</b>	<b>-</b>	<b>lt/por día</b>
Empaque para Menudencias	22.00	7.35	8.08	6.59	-	m <sup>3</sup> / hr.
No Asignable por Fugas, limpieza, etc.	5.00	2.06	2.18	0.90	-	m <sup>3</sup> / hr.
Patas	2.00	0.49	0.54	0.52	-	m <sup>3</sup> / hr.
Cabezas	1.00	0.44	0.49	0.47	-	m <sup>3</sup> / hr.
Vísceras	2.00	0.65	0.72	0.70	-	m <sup>3</sup> / hr.
Hígados	1.00	0.44	0.49	0.47	-	m <sup>3</sup> / hr.
Mollejas	10.00	3.28	3.65	3.52	-	m <sup>3</sup> / hr.
<b>Área 3 - Empaque (Total)</b>	<b>268,767</b>	<b>1,610</b>	<b>85,001</b>	<b>182,155</b>	<b>-</b>	<b>lt/por día</b>
m <sup>3</sup> de agua en proceso del área 3	87.00	0.42	42.03	44.22	-	m <sup>3</sup> / hr.



<b>Área 3 - Empaque para Pollo</b>	<b>205,521</b>	<b>61,947</b>	<b>32,053</b>	<b>111,521</b>	<b>-</b>	<b>lt/por día</b>
Empaque para Menudencias	59.01	16.09	15.85	27.07	-	m <sup>3</sup> / hr.
No Asignable por Fugas, limpieza, etc.	9.63	0.78	3.27	5.58	-	m <sup>3</sup> / hr.
Cabezas y Pescuezos	13.27	4.11	3.38	5.78	-	m <sup>3</sup> / hr.
Hígados	20.39	6.29	5.21	8.90	-	m <sup>3</sup> / hr.
Mollejas	15.72	4.91	3.99	6.82	-	m <sup>3</sup> / hr.

El área 3 del procesamiento demanda mayor consumo de agua porque se encuentran ubicados el prechiller y chiller, responsables del enfriamiento parcial del pollo, lavado, desinfección e hidratación. El resumen de consumo de agua por área del procesamiento se muestra en la Tabla 123.

**Tabla 123. Consumo de agua por área de procesamiento.**

<b>Resumen de Agua en Residuos</b>	<b>Total</b>	<b>Seco Natural</b>	<b>Hidratado Natural</b>	<b>Hidratado Pintado</b>	<b>Kosher</b>	<b>unidad</b>
área 1 - Recepción y Matanza	123.26	43.91	23.07	56.29	-	m <sup>3</sup> /día
área 2 - Eviscerado	115.58	42.26	24.71	48.61	-	m <sup>3</sup> /día
área 2 - Eviscerado - menudencias	71.81	28.31	16.34	27.16	-	m <sup>3</sup> /día
área 3 - Empaque	268.77	1.61	85.00	182.16	-	m <sup>3</sup> /día
área 3 - Empaque - menudencias	205.52	61.95	32.05	111.52	-	m <sup>3</sup> /día
<b>Total</b>	<b>784.93</b>	<b>178.04</b>	<b>181.17</b>	<b>425.73</b>	<b>-</b>	<b>M3/día</b>

El agua utilizada en el proceso es de 784 m<sup>3</sup>, por día. El análisis sobre la utilización del agua fue requerido hacerse para determinar la cantidad de efluentes y lodos residuales son generados, porque ambos residuos llevan agua que se combina con los elementos del proceso.

### **Generación de residuos en la procesadora de aves.**

Los elementos que forman los residuos de la procesadora de aves son la utilización del agua en todos los procesos en mezcla con la sangre que se obtiene del desangrado del pollo y los escurrimientos generados durante el corte y eviscerado. Los residuos también contienen heces y alimento contenido en los intestinos y estomago del ave que son expuestos durante el eviscerado y que constantemente se tiene que lavar para garantizar la inocuidad del proceso, la grasa y pedacería que es resultado de los cortes en la piel del pollo durante la segmentación de las partes del pollo, las plumas obtenidas del escaldado y desplumado del ave.

Se hace uso de colorantes naturales a partir de xantofilas amarillas o naranjas para darle el color característico del pollo, los elementos mencionados anteriormente forman a lo que llamaremos carga orgánica y son diversos para cada tipo de pollo que se procesa derivado de las especificaciones de producción, ver Tabla 124.

Existen otros elementos no orgánicos como el cloro que se usa para desinfectar el pollo en los chillers. Ambos tipos de elementos son residuos sólidos y líquidos del procesamiento de pollo de engorde.

Se tomaron muestras de la generación de residuos en el punto del proceso donde se genera el residuo (*Leal – Hernández, 2013*), para determinar la composición del efluente en el proceso. Para ello se requirió identificar los puntos de muestreo, y realizar análisis químicos para obtener las proporciones de cargas sólidas.

Las muestras del agua en mezcla con los residuos de todas las áreas designadas se vertieron en recipientes de 1 litro para realizar pruebas fisicoquímicas en laboratorio y determinar la carga orgánica en la muestra para determinar las proporciones de material que contribuye a formar el efluente.



**Imagen 47. Muestras de la composición de la carga orgánica de los residuos**

El método para la obtención de las muestras realizó directamente en el proceso, existiendo variación de un tipo de ave a otro debido a la diferencia de peso que hay entre ellos y a la cantidad de aves que se procesan por hora, no siendo igual en ninguno de los casos.

Se utilizó la decantación como método para separar los residuos y así poder determinar la cantidad de cada uno de éstos individualmente.

La decantación es un método en el cual se aprovecha la fuerza de gravedad que imprime a las partículas un movimiento descendente, cuya velocidad depende de la densidad y del líquido, y del tamaño, forma y densidad de la partícula.

**Tabla 124. Residuos líquidos y sólidos resultantes del procesado de pollo**

Residuos por área	Total	Seco natural	Hidratado Natural	Hidratado Pintado	Kosher	Unidad
<b>área 1 - Recepción y Matanza</b>						
Consumo de Agua	123.2	43.91	23.07	56.29	-	m3/día
Sangre	1.08	0.38	0.20	0.49	-	m3/día
Heces y residuo alimento	0.14	0.05	0.03	0.07	-	m3/día
Grasa y Pedacería	0.29	0.11	0.06	0.13	-	m3/día
Plumas	22.09	7.86	4.13	10.10	-	m3/día
Colorante natural	-	-	-	-	-	m3/día
<b>Carga Orgánica</b>	<b>23.60</b>	<b>8.41</b>	<b>4.41</b>	<b>10.78</b>	-	<b>m3/día</b>
Cloro	0.31	0.11	0.06	0.14	-	m3/día
<b>Efluente</b>	<b>147.1</b>	<b>52.42</b>	<b>27.54</b>	<b>67.21</b>	-	<b>m3/día</b>

<b>área 2 - Eviscerado</b>						
Consumo de Agua	187.3	70.57	41.05	75.77	-	m3/día
Sangre	0.32	0.12	0.07	0.13	-	m3/día
Heces y residuo alimento	-	-	-	-	-	m3/día
Grasa y Pedacería	6.95	2.72	1.45	2.78	-	m3/día
Plumas	0.04	0.01	0.01	0.02	-	m3/día
Colorante	-	-	-	-	-	m3/día
<b>Carga Orgánica</b>	<b>7.31</b>	<b>2.85</b>	<b>1.53</b>	<b>2.92</b>	<b>-</b>	<b>m3/día</b>
Cloro	0.47	0.18	0.10	0.19	-	m3/día
<b>Efluente</b>	<b>195.1</b>	<b>73.60</b>	<b>42.68</b>	<b>78.88</b>	<b>-</b>	<b>m3/día</b>
<b>área 3 - Empaque</b>						
Consumo de Agua	474.2	63.56	117.05	293.68	-	m3/día
Sangre	0.02	0.01	-	0.01	-	m3/día
Heces y residuo alimento	-	-	-	-	-	m3/día
Grasa y Pedacería	0.57	0.23	0.12	0.23	-	m3/día
Plumas	-	-	-	-	-	m3/día
Colorante	0.07	-	-	0.07	-	m3/día
<b>Carga Orgánica</b>	<b>0.65</b>	<b>0.23</b>	<b>0.12</b>	<b>0.30</b>	<b>-</b>	<b>m3/día</b>
Cloro	9.06	0.16	2.54	6.36	-	m3/día
<b>Efluente</b>	<b>484.0</b>	<b>63.95</b>	<b>119.71</b>	<b>300.24</b>	<b>-</b>	<b>m3/día</b>

En el área de recepción y matanza se generan 147 m<sup>3</sup> de residuos, en el área de eviscerado se generan 195 m<sup>3</sup> de residuos y en el área de empaque 484 m<sup>3</sup> de residuos de tipo líquido y sólido, haciendo un total de 826 m<sup>3</sup> de residuos por día, ver Tabla 127.

Para el manejo de residuos en el interior del proceso se utilizan canales para retirar los residuos sólidos y líquidos y puedan ser enviados a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), al final del canal existe una rejilla de retención para separar los residuos sólidos de los residuos líquidos y puedan ser enviados a la planta de rendimiento.

Los índices de recuperación en la rejilla de retención se encuentran en la Tabla 125, se puede observar que las heces y los residuos de alimento así como las plumas son los elementos que tienen

mayor recuperación precisamente porque resulta difícil que pasen a través de los espacios de la rejilla, y caso contrario pasa con los residuos líquidos que resulta difícil retener la sangre o la grasa disuelta en el agua.

**Tabla 125. Residuos sólidos retenidos del proceso**

<b>Residuos Sólidos Retenidos</b>	<b>% Retenido</b>
Consumo de Agua	1.00%
Sangre	0.00%
Heces y residuo alimento	97.00%
Grasa y Pedacería	0.00%
Plumas	95.00%
Colorante	1.00%
Cloro	1.00%

Los residuos líquidos que no pudieron recuperarse son enviados a la planta de tratamiento de agua residuales, a lo largo del trayecto antes de llegar a su destino se combinan con agua proveniente de diversas áreas operativas de la planta procesadora de aves, es en este momento que se utiliza el termino de efluentes industriales.

Los residuos líquidos que logran pasar son 124 m<sup>3</sup> del área de recepción y matanza, 193 m<sup>3</sup> del área de eviscerado y 479 m<sup>3</sup> del área de empaque para un total de 797 m<sup>3</sup> de residuos/día, ver Tabla 126.

**Tabla 126. Residuos líquidos del procesado de pollo enviados a la PTAR**

<b>Residuos líquidos enviados a la PTAR</b>	<b>Total</b>	<b>Seco natural</b>	<b>Hidratado Natural</b>	<b>Hidratado Pintado</b>	<b>Kosher</b>	<b>Unidad</b>
<b>área 1 - Recepción y Matanza</b>						
Consumo de Agua	122.0	43.47	22.83	55.72	-	m3/día
Sangre	1.08	0.38	0.20	0.49	-	m3/día
Heces y residuo alimento	-	-	-	-	-	m3/día
Grasa y Pedacería	0.29	0.11	0.06	0.13	-	m3/día
Plumas	1.10	0.39	0.21	0.50	-	m3/día
Colorante	-	-	-	-	-	m3/día
<b>Carga Orgánica</b>	<b>2.47</b>	<b>0.88</b>	<b>0.46</b>	<b>0.13</b>	<b>-</b>	<b>m3/día</b>

Cloro	-	-	-	-	-	m3/día
<b>Efluente</b>	<b>124.5</b>	<b>44.35</b>	<b>23.30</b>	<b>56.85</b>	<b>-</b>	<b>m3/día</b>
<b>área 2 - Eviscerado</b>						
Consumo de Agua	185.5	69.87	40.64	75.01	-	m3/día
Sangre	0.32	0.12	0.07	0.13	-	m3/día
Heces y residuo alimento	-	-	-	-	-	m3/día
Grasa y Pedacería	6.95	2.72	1.45	2.78	-	m3/día
Plumas	-	-	-	-	-	m3/día
Colorante	-	-	-	-	-	m3/día
<b>Carga Orgánica</b>	<b>7.27</b>	<b>2.84</b>	<b>1.52</b>	<b>2.91</b>	<b>-</b>	<b>m3/día</b>
Cloro	0.46	0.17	0.10	0.19	-	m3/día
<b>Efluente</b>	<b>193.2</b>	<b>72.88</b>	<b>42.26</b>	<b>78.10</b>	<b>-</b>	<b>m3/día</b>
<b>área 3 - Empaque</b>						
Consumo de Agua	469.5	62.92	115.88	290.74	-	m3/día
Sangre	0.02	0.01	-	0.01	-	m3/día
Heces y residuo alimento	-	-	-	-	-	m3/día
Grasa y Pedacería	0.57	0.23	0.12	0.23	-	m3/día
Plumas	-	-	-	-	-	m3/día
Colorante	0.07	-	-	0.07	-	m3/día
<b>Carga Orgánica</b>	<b>0.65</b>	<b>0.23</b>	<b>0.12</b>	<b>0.30</b>	<b>-</b>	<b>m3/día</b>
Cloro	8.97	0.16	2.51	6.30	-	m3/día
<b>Efluente</b>	<b>479.1</b>	<b>63.31</b>	<b>118.51</b>	<b>297.34</b>	<b>-</b>	<b>m3/día</b>

Los residuos resultantes tienen una alta carga orgánica con alto potencial de ser utilizados como biomasa para producir biogás a partir de un tratamiento de digestión anaeróbica termofílica.

La obtención de lodo de buena o mala calidad puede afectar el rendimiento de biogás. Un lodo de mala calidad tendrá un bajo rendimiento y un lodo de mejor calidad un mayor rendimiento, el uso y consumo de agua industrial en cada etapa del proceso ayuda a concentrar mejor el lodo residual.

La generación de residuos sólidos y líquidos en el procesamiento de aves es inevitable, pues se requiere del uso de agua, cloro, desinfectantes y demás sustancias, para mantener la inocuidad del producto, además de las mermas y residuos que se generan directamente, como lo son las vísceras, sangre, grasas y colorantes, todos ellos impactan directamente al medio ambiente, pero un manejo eficiente tanto en su recolección, procesamiento y usos, disminuye notablemente el daño que ocasionan.

El manejo correcto de sólidos y líquidos, permitirá la disminución del aporte contaminante al agua (químicos), microorganismos patógenos y materia orgánicas suspendida, además de que al utilizar residuos que van a parar directamente a la red municipal, en un proceso productivo se está generando un nuevo producto (biogás) y aportando agua tratada que cumple con la Norma Oficial Mexicana vigente NOM-004-SEMARNAT-2004.

Trabajar directamente con el lodo residual resultante del proceso, sin conocer las etapas que contribuyen en su formación traerá provoca una variación significativa en cuanto a la calidad, pues no siempre se realizan las mismas actividades dentro del proceso porque dependen directamente del tipo de pollo que se esté procesando, por lo tanto la cantidad de biogás que se produzca no siempre será la óptima, es por esto que es necesario estratificar el proceso y cada una de sus etapas, estudiando a fondo qué se está utilizando en cada una de ellas, qué residuos o mermas se están generando y en que volúmenes y porcentajes aportan a los efluentes finales, para realizar un mejor control del procesamiento y reducir los factores que afectan la calidad del lodo residual.

### 3.2.3. Producción de lodos residuales considerando el inhibidor de rendimiento energético (contenido de humedad, cloro y colorantes)

Los residuos generados en el procesamiento del pollo de engorde son 826 m<sup>3</sup> de los cuales se recuperan 29 m<sup>3</sup> de residuos sólidos para producir aceite y harina de carne. En la Tabla 127 se encuentra el saldo de 797 m<sup>3</sup> de residuos líquidos compuestos por 10.3 m<sup>3</sup> de residuos con alta carga orgánica, de 70 litros de colorante, de 9.7 m<sup>3</sup> de cloro utilizado para el lavado y desinfección en el proceso de hidratación en los chillers y 777 m<sup>3</sup> de agua industrial que deberá ser tratada física y químicamente antes de ser desaloja de la planta procesadora.

Tabla 127. Residuo inhibidor de rendimiento energético.

Descripción	Volumen del Proceso	Volumen Harinas	Volumen PTAR	Unidad
Residuos Orgánicos*	31.49	21.15	10.33	m <sup>3</sup> /día
Colorante natural	0.07	0.01	0.07	m <sup>3</sup> /día
Cloro	9.83	0.10	9.74	m <sup>3</sup> /día
Agua del proceso	784.93	7.85	777.08	m <sup>3</sup> /día
Agua de otras áreas de la planta procesadora de aves	-	-	784.99	m <sup>3</sup> /día
Agua total utilizada	-	-	1,562.07	m <sup>3</sup> /día
Efluentes totales a PTAR	826.33	-	1,582.20	m <sup>3</sup> /día
Retenido para harinas	-	29.11	-	m <sup>3</sup> /día

El cloro y el colorante son los principales inhibidores del rendimiento energético del lodo residual para generar biogás. Para facilitar la generación de biogás el efluente y los lodos residuales no deben ser mezclados con cloro o usar agua clorada, ya que en el biogás hay colonias de microorganismos que pueden morir o disminuir su actividad metabólica por la acción del cloro.

El grado de inhibición de biogás aumenta en compuestos que contienen cloro y disminuye su efecto cuando se aumenta la proporción de biosólidos en la carga orgánica al rebajarse proporcionalmente el contenido de cloro (*Droste et al., 1998*). El incremento en la concentración de colorante genera una disminución en la remoción provocando una reducción en la actividad biológica en la biodegradación del colorante y afectando al rendimiento de biogás (*González-Duque et al., 2010*).

El incremento del volumen de agua usada automáticamente afecta el incremento de los efluentes que salen del procesamiento y que deben ser tratados en una planta de tratamiento de aguas residuales.

El agua que es utilizada para la limpieza o para el proceso entra en contacto con los cadáveres de los pollos procesados, con los subproductos derivados de su procesamiento y con residuos de menor tamaño de tipo líquido, semisólido o sólido a través de todas las etapas del proceso: 1) recepción de aves, 2) lavado de jaulas, 3) desangrado, 4) escaldado, 5) evisceración y corte, 6) lavado y clorado, 7) cámara fría, 8) agua para lavar y sanitizar los equipos del proceso y el afluente proveniente



contiene una carga de material orgánico degradable que puede ser un costo de oportunidad bioenergética (Formentini, et al., 2011).

Es importante destacar que los residuos líquidos se mezclan con 784 m<sup>3</sup> de agua proveniente de otras áreas operativas de la planta, como son el área de lavado de jaulas y plataformas para el transporte del pollo de engorde, de la planta de hielo para producir escarcha de hielo que es colocada en el interior de las cajas secas de los tractocamiones que transportan el pollo procesado a las centrales de abasto u otras áreas de servicio.

Los efluentes tratados son 1,582 m<sup>3</sup> al día, incluida una proporción de 9.7 m<sup>3</sup> de cloro la cual es importante conocer para evitar su uso excesivo para mejorar el rendimiento de biogás. Cada día se producen 0.15 litros residuos orgánicos por cada pollo que es procesado y 0.29 litros de efluentes por pollo procesado, ver la Tabla 128.

**Tabla 128. Generación de residuos y efluentes por pollo procesado**

<b>Composición de Efluentes</b>	<b>Efluentes enviados a la PTAR</b>	<b>Unidad</b>
Sangre	1.41	m <sup>3</sup> /día
Heces y residuo alimento	-	m <sup>3</sup> /día
Grasas y pedacería	7.81	m <sup>3</sup> /día
Colorante	0.07	m <sup>3</sup> /día
Plumas	1.11	m <sup>3</sup> /día
Agua	1,562.07	m <sup>3</sup> /día
Cloro	9.74	m <sup>3</sup> /día
Total de Efluentes	1,582.20	m <sup>3</sup> /día
Residuos Orgánicos por pollo	0.15	lt/pollo
Efluentes por pollo	0.29	lt/pollo

La Planta de tratamiento instalada en la planta procesadora de aves utiliza un proceso primario avanzado (físicoquímico) para tratar los efluentes, este proceso se realiza principalmente una acción bactericida, llevando al bloqueo temporal de fermentaciones ácidas.

Los efluentes que son tratados en planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son 10.33 m<sup>3</sup> de orgánicos sin incluir el agua, colorante y el cloro, se recupera el 99% de las plumas contenido en los

efluentes para dar 9.24 m<sup>3</sup> de residuos orgánicos a tratar con el mínimo de plumas, es decir solo las mermas derivadas del pollo que llegan hasta la PTAR sin colorante ni cloro.

Los residuos que resultantes del tratamiento de los efluentes se les llama lodos residuales. En base al conocimiento de los expertos responsables de la operación de la planta de tratamiento de aguas se estima la incertidumbre de la proporción existente de contenido orgánico en los lodos residuales, ver Tabla 41.

Después de haber sido tratados 1,582 m<sup>3</sup> de efluentes en la planta de aguas residuales obtenemos 1,528.33 m<sup>3</sup> de aguas tratadas física y químicamente para ser vertidas al río y se obtienen 52.78 m<sup>3</sup> de lodos residuales (1,582.2 m<sup>3</sup> - 1,528.33 - (10.33 m<sup>3</sup> - 9.24 m<sup>3</sup>)).

De los 52.78 m<sup>3</sup> de lodos residuales obtenidos, el 17.5% son elementos orgánicos equivalentes a 9.24 m<sup>3</sup> y la diferencia del 82.5% son 43.54 m<sup>3</sup> de agua tratada que está contenida en los lodos residuales que no puede ser separada con la tecnología de tratamiento actual. Esto quiere decir que los lodos residuales están en un estado líquido o que tiene muy alto contenido de humedad.

#### 3.2.4. Balance de materia y energía utilizando digestión anaeróbica.

Una alternativa posible para la generación de bioenergéticos es la digestión anaerobia de efluentes y residuos orgánicos; es una tecnología que gestiona residuos orgánicos para generar energía renovable en forma de biogás y posteriormente energía eléctrica.

La digestión anaeróbica permite cerrar el ciclo de reciclaje de residuos orgánicos provenientes de procesos agroindustriales, al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la generación de biofertilizantes orgánicos utilizables para el mejoramiento de suelos o incluso en suelos agrícolas.

La industria avícola produce lodos residuales con altos compuestos orgánicos, carbohidratos, lípidos y proteínas (Ruiz-Espinoza *et al.* 2012) mezclados con alto contenido de agua (Méndez *et al.*, 2008). Se tiene registro que se ha separado y recuperado los residuos orgánicos de un matadero de aves y posteriormente diluidos en agua para facilitar su tratamiento energético y de inactivación de organismos patógenos con tecnología de digestión anaeróbica (Salminen *et al.*, 2002).

Para obtener energía de los lodos residuales en forma de biogás es preferible utilizar la digestión anaeróbica por la capacidad de tratamiento de desechos agroindustriales con alto contenido de agua,

esta composición hace susceptible al lodo residual ser productor de energía en condiciones anaerobias.

Se propone la implementación de la tecnología “digestión anaerobia-térmica con dualidad de operación” de residuos avícolas para la generación innovadora de bioenergéticos y biosólidos a escala industrial. (Méndez-Contreras et al. 2012), proyecto No.182647 presentado en el año 2012 ante el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) en el programa de estímulos a la innovación (PEI) en la categoría Innovatec.

El desarrollo de este proyecto permite evaluar el potencial energético de los lodos residuales producidos por la planta procesadora de aves. La generación de Biogás será a partir del tratamiento adecuado de los desechos (lodos residuales) de producción de la planta procesadora de aves tipo inspección federal (PPA TIF), contribuyendo a un desarrollo sostenible por la reutilización de residuos para generar bioenergéticos (biogás para generar energía eléctrica) y biofertilizantes (biosólidos obtenidos después del tratamiento de lodos en condiciones anaerobias), que serán reincorporados a la cadena de valor de otras empresas.

La estabilización de los lodos residuales en la cadena de valor avícola, depende varios factores como: la cantidad y calidad de lodos a tratar, las condiciones particulares del sitio y, el volumen y calidad de procesamiento de aves, entre otros.

#### **Caracterización de los lodos residuales.**

La composición de los siguientes productos se realizó en base a la caracterización del lodo residual fisicoquímico y las metodologías de análisis con base a la NOM-004-SEMARNAT 2002 y análisis de Standard Methods en el laboratorio del Instituto Tecnológico de Orizaba, utilizando un reactor ovoide a nivel laboratorio (8000 mL) y estimar el rendimiento de biogás producido.

- Lodo residual físico-químico crudo

El lodo residual fue muestreado de la salida de los tanques espesadores que conducen al reactor de digestión aerobia de la PTAR, la Tabla 129 muestra el rango de valores de los parámetros fisicoquímicos, bioquímicos y microbiológicos del lodo residual crudo. Los valores de pH oscilan en un rango de 6.5 -7.1, este parámetro es muy importante para poder llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia (6.5-7.2), la concentración de sólidos totales a la salida de los tanques espesadores aún es baja, ya que lo idóneo es obtener un lodo entre 2.5 y 3%, la materia orgánica

presente en los lodos está cuantificada por medio de los sólidos volátiles obteniendo un rango de 65-73% lo que representa un buen porcentaje de materia biodegradable para la digestión anaerobia.

Tanto el nitrógeno amoniacal como el fosforo en los valores altos del rango se considera al lodo residual como rico en estos nutrientes, los cuales son benéficos para su aprovechamiento después de la estabilización del lodo. Cabe señalar que dentro de los parámetros bioquímicos obtenidos las concentraciones de lípidos (8-12.32 g/L) y proteínas (18.23-21.2 %) son altos debido a que el lodo residual contiene lípidos de la matanza y proteínas de restos del alimento para las aves.

**Tabla 129. Caracterización del lodo residual fisicoquímico.**

<b>Fisicoquímicos</b>	<b>Lodo crudo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Método</b>
pH	6.5 -7.1		Potenciométrico
Sólidos Totales	1.5-2	% m/m	2540B SM
Sólidos Totales Volátiles	65-73	% m/m	2540E SM
Nitrógeno amoniacal	4.49-20.27	g/Kg ST	4500-NH <sub>3</sub> B SM
Fósforo	0.75-8.61	g/kg ST	4500-P B, E SM
<b>Bioquímicos</b>		<b>Unidad</b>	
Carbohidratos	0.57-0.8	g/L	Antrona-sulfurico
Lípidos	8-12.32	g/L	Extraccion Soxlet
Proteínas	18.23-21.2	%	NTK
<b>Microbiológicos</b>		<b>Unidad</b>	
Coliformes fecales	2.9*10 <sup>10</sup>	NMP/g ST	9221 E.1 SM
<i>Salmonella</i> spp.	2.6*10 <sup>8</sup>	NMP/g ST	9260 B SM
Huevos de helmintos	0	HH/g ST	NOM-004

Dentro de los parámetros microbiológicos los lodos residuales contienen una alta concentración de microorganismos patógenos tales como los coliformes fecales (10 UL) y la salmonella spp (8 UL), estas concentraciones sobrepasan los límites máximos permisibles por la normatividad oficial mexicana y deben ser inactivadas por procesos de pre o pos-tratamiento, lo cual justifica el pre-tratamiento térmico del lodo durante el proceso. Cabe señalar la ausencia de huevos de helmintos en los lodos residuales esto puede deberse a la implementación de un control sanitario en la industria avícola.

- Biogás

La digestión anaerobia de lodos residuales resulta en la producción de una mezcla de gases comúnmente denominada biogás. Dentro de la mezcla de gases sólo el metano representa un valor económico debido a que es una fuente de combustible. El metano es inodoro y puede quemarse limpiamente.

El metano puro tiene un poder calorífico de 1,000 BTU/ft<sup>3</sup> y biogás tiene un poder calorífico de 650 BTU/ft<sup>3</sup>, sin embargo en el biogás el metano está mezclado con CO<sub>2</sub> y esto disminuye significativamente su poder calorífico.

La Tabla 130 muestra la cromatografía de gases del biogás obtenido por la digestión anaerobia de lodo residual, típicamente el biogás contiene de un 50-75% de metano, como se puede apreciar el rango de 70-80% de metano obtenido en el biogás representa un valor alto de metano y este es susceptible de aprovechamiento como fuente de energía.

Sin embargo la cromatografía arroja un 1% de ácido sulfhídrico, el cual es altamente corrosivo para las tuberías y el quemador por lo que es necesario aplicar un tratamiento de lavado del biogás para remover este contaminante.

**Tabla 130 .Cromatografía de gases del biogás obtenido de la digestión de lodo fisicoquímico**

	Metano	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Biogás	70-80%	19-29%	1%

### **Rendimiento de biogás**

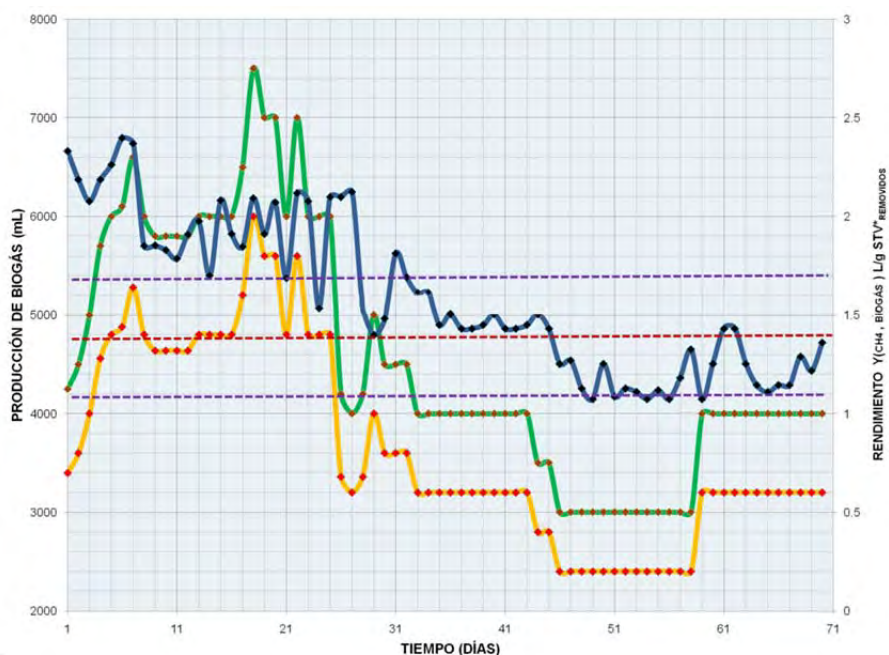
En las pruebas de laboratorio durante los primeros 30 días de operación mesofílica semicontinua del reactor ovoide con una carga de alimentación de 1kg STV/m<sup>3</sup>d y con una temperatura de 35±1°C, se obtuvo un rendimiento de 2.14 litros de biogás por cada gramo de solido total volátil removido (1/g STV<sub>rem</sub>) equivalente a 1.75 litros de metano/g STV<sub>rem</sub>, ver Imagen 48.



**Imagen 48. Reactor de digestión ovoide piloto**

Para estimar el rendimiento a nivel industrial se realizan modificaciones al diseño de la prueba, y se modificó la etapa térmica al hacerla termofílica a una temperatura de 80°C durante dos horas al día durante la digestión anaeróbica.

Los resultados fueron una reducción del tiempo de residencia hidráulica (TRH) para estabilizar los lodos residuales de 35-38 días a 21-27 días para cumplir con la NOM-004-SEMARNAT-2002 que establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes y microorganismos en los lodos y biosólidos proveniente de plantas de tratamiento de aguas residuales, y una reducción del 27.1% en el rendimiento de litros de biogás del 0.58 litros para llegar a 1.56 l biogás/g  $STV_{rem}$  después del día 40, ver Figura 64.



**Figura 64. Criterio de estabilidad % remoción STV en el proceso semicontinuo**

Para efectos de estimación del rendimiento de biogás a escala industrial se utiliza una distribución de probabilidad triangular ubicada en la Tabla 41, los resultados son 1.56 litros de biogás /g  $STV_{rem}$  como límite superior para efectos de simulación, el valor esperado resultante es de 1.25 l biogás/g  $STV_{rem}$  y es utilizada para el modelo.

El comportamiento de la distribución del porcentaje (%) de sólidos totales, % de sólidos totales volátiles, % de eficiencia de remoción, y % de concentración de metano por unidad de biogás, se presentan en la Tabla 41, es importante destacar que la suma de lodos residuales por tipo es de 52.78 m<sup>3</sup> de lodos residuales obtenidos.

La variación del 1% en el cloro y un 30% en el colorante afectan el rendimiento medio de litros de biogás/kg  $STV_{Rem}$  haciendo bajar el rendimiento de litros de biogás/kg  $STV_{Rem}$  por tipo de pollo, los valores se muestran en la Tabla 131.

El rendimiento del pollo seco disminuye un 0.55% generando 1.25 litros de biogás, el pollo hidratado pintado disminuye un 3.35% generando 1.21 litros de biogás y para el pollo hidratado pintado disminuye en un 10.76% generando 1.12 litros de biogás, las distribuciones de probabilidad utilizadas se describen en la Tabla 41.

Tabla 131. Balance de materia y energía en el proceso de digestión anaeróbica

Descripción	Seco	Hidratado	Hidratado	Unidad
		Natural	Pintado	
Lodos residuales generados	20.23	10.76	21.79	m <sup>3</sup> de Lodos Residuales/Día
Solidos Totales	2.50%	2.50%	2.50%	% Solidos Totales
Volumen de solidos totales generados	505.64	269.02	544.75	Kg de Solidos Totales
Agua del proceso utilizada para la digestión	19,719	10,491	21,245	Litros de agua
Solidos totales volátiles	80.00%	80.00%	80.00%	% de solidos volátiles
kg de solidos totales volátiles/m <sup>3</sup>	404.51	215.21	435.80	kg de solidos totales volátiles
Eficiencia de remoción (55% - 60%) NOM 38% Remoción	57.50%	57.50%	57.50%	% de eficiencia de remoción
kg de solidos totales volátiles /m <sup>3</sup> removido	232.59	123.75	250.58	kg de solidos totales volátiles/m <sup>3</sup> REM
m <sup>3</sup> rendimiento de biogás/kg STV <sub>Rem</sub>	1.25	1.21	1.12	m <sup>3</sup> biogás /kg STV <sub>Rem</sub>
Rendimiento m <sup>3</sup> de biogás	289.91	149.91	280.26	Rendimiento m <sup>3</sup> de biogás por día
Rendimiento m <sup>3</sup> de biogás por Lodos producidos	14.33	13.93	12.86	m <sup>3</sup> biogás /m <sup>3</sup> de Lodo producido
Concentración de Metan (CH <sub>4</sub> ) en biogás	75.00%	75.00%	75.00%	Porcentaje

\* No se incluye pollo tipo kosher por su baja representatividad y frecuencia de ocurrencia en el modelo de incertidumbre.

Para determinar las kilocalorías contenidas en un metro cubico de biogás se utiliza una distribución del comportamiento calorífico en BTU's (British Thermal Unit) de la Tabla 41 y se realiza la conversión de unidades calorífica a kilocalorías, en la Tabla 132.



**Tabla 132. Poder calorífico de 1 m<sup>3</sup> de biogás**

Descripción	Cantidad	Unidad
Poder calorífico BTU's/m <sup>3</sup> biogás al 75% (Volumen)	27,596.48	BTU's/m <sup>3</sup> biogás al 75%CH <sub>4</sub>
Poder calorífico en BTU's	19,871,525	BTU's de biogás/día
Poder calorífico en Kcal	5,010,891	Kcal biogás/día
Poder calorífico BTU's/m <sup>3</sup> biogás al 75% (En masa)	17,196.17	BTU's/kg biogás al 75%CH <sub>4</sub>
Poder calorífico BTU's/m <sup>3</sup> biogás al 75% (En masa)	17,196,166.73	BTU's/Ton biogás al 75%CH <sub>4</sub>

Los 52.78 m<sup>3</sup> de lodos residuales producidos por la planta procesadora son capaces de generar 5,010,891 kilocalorías de energía térmica en forma de biogás.

#### **Proceso de obtención de lodos residuales**

Como resultado de la remoción de contaminantes, en los procesos de tratamiento se producen diferentes subproductos, siendo el más importante los lodos. Los lodos provienen de las etapas de tratamiento primario y tratamiento secundario, y sus características dependen del proceso donde se originaron y del tratamiento que han recibido. El volumen y masa de éstos también depende del proceso.

Los lodos producidos en una planta de tratamiento deben cumplir principalmente con la norma oficial mexicana NOM – 004 – SEMARNAT – 2002 se especifican los límites máximos permitidos de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final donde se produjeron.

Para poder cumplir con lo especificado en la normatividad, los lodos deben ser tratados antes de disponerse, lo cual trae consigo diferentes tipos de problemáticas ambientales.

La etapa más importante del tratamiento de lodos es la estabilización, durante la cual se reduce la masa y volumen y se reducen los organismos patógenos, olores y la atracción de vectores. Los métodos más utilizados son la digestión aerobia y anaerobia.

Los lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales dependen del tipo de planta de tratamiento y de la operación de ésta. En una planta de aguas residuales, los lodos se generan en las etapas de tratamiento primario y tratamiento secundario.

Los lodos primarios se producen en la sedimentación primaria, en la cual se remueven sólidos sedimentables. La cantidad depende de la carga superficial o tiempo hidráulico de retención. En la sedimentación primaria con químicos se produce más lodo, producto de una mayor remoción y de la precipitación química de la materia coloidal.

Los lodos secundarios se producen en procesos de tratamiento biológicos que convierten residuos o sustratos solubles en biomasa. También incluyen la materia particulada que permanece en el agua después de la sedimentación primaria y que se incorpora en la biomasa. La cantidad producida depende de varios factores: eficiencia del tratamiento primario, relación de SST a DBO, cantidad de sustrato soluble, remoción de nutrientes y criterios de diseño del tratamiento.

Los lodos secundarios se producen en los reactores biológicos y se sedimentan o separan del agua en los sedimentadores secundarios son almacenados y concentrados los lodos sedimentados. La extracción del lodo sedimentado se efectúa por carga hidráulica y por el accionamiento mecánico para su extracción.

Los lodos pueden ser aprovechados como fuente de energía durante la etapa de digestión anaerobia en la que se produce biogás como subproducto del proceso. El biogás puede ser alimentado a una máquina de cogeneración para generar energía eléctrica y calorífica.

La energía eléctrica se usa para satisfacer parte de los requerimientos de energía de la PTAR y la energía calorífica para calentar el digester hasta su temperatura de operación.

Además de la producción de energía, la cogeneración presenta la ventaja de reducir la emisión de gases de efecto invernadero al ambiente.

Los lodos estabilizados o biosólidos, también pueden ser utilizados como mejoradores de suelo en la agricultura. Éstos mejoran las características del suelo y proveen nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal como nitrógeno, fósforo, níquel, zinc y cobre. Debido a sus ventajas, los biosólidos pueden utilizarse como sustituto de fertilizantes químicos.

### **Reactores de digestión anaeróbica.**

Existen diferentes tipos de reactores de digestión anaeróbica y configuraciones para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia, a través del tiempo el diseño de los reactores se ha ido mejorando, avanzando hacia un mejor desempeño del proceso a continuación se detallan algunos tipos.

Los Digestores anaeróbicos ovoides termofílicos con dualidad de operación, es la tecnología utilizada para digerir los lodos residuales provenientes de la planta procesadora de aves, y fueron diseñados en forma de huevo a partir de estudios de mecánica de fluidos, su constitución presenta un fondo muy inclinado lo que elimina la acumulación de sólidos eliminando su limpieza, este tipo de digestores tienen mezcladores modernos eliminando gastos innecesarios en consumo de energía por mezclado, casi no generan espuma y evitan zonas muertas que presentan los otros modelos. Su forma ovoide permite una mejor captación del biogás generado, ver Imagen 49, Imagen 50, Imagen 51e Imagen 52.

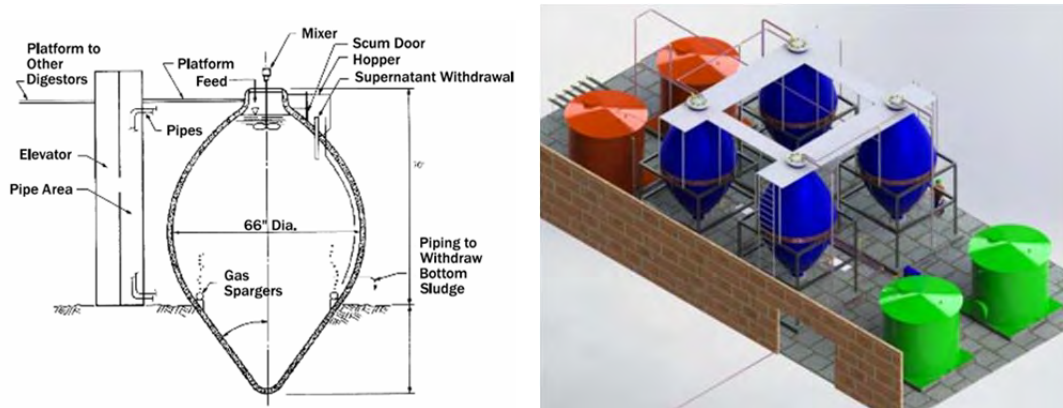


Imagen 49. Digestores anaeróbicos ovoides



Imagen 50. Planta de digestión anaeróbica con reactores ovoides



**Imagen 51. Almacenamiento de biogás para su combustión con moto generador**



**Imagen 52. Motogenerador a gas con generador eléctrico.**

### 3.2.5. Producción de energía térmica (biogás) y eléctrica

La cadena de valor avícola en su eslabón del procesamiento de pollo de engorde utiliza  $52 \text{ m}^3$  de residuos agroindustriales por día en forma de lodos residuales, para producir un valor esperado de  $720 \text{ m}^3$  de biogás a partir de su digestión para combustionarlos en un motogenerador a gas para producir electricidad ver Tabla 133, y se obtiene un valor esperado de  $52.25 \text{ m}^3$  de biosólidos previamente digerido que cumple con las normas de remoción de organismos patógenos y contaminantes para ser utilizado como biofertilizante en cultivos agrícolas de otra cadena de valor.

Tabla 133. Producción de biogás y biosólidos por día

Descripción	Cantidad	Unidad
Producción de lodos residuales	52.78	m <sup>3</sup> de Lodos Residuales/Día
Producción de biogás.	720.07	m <sup>3</sup> Biogás/Día
Rendimiento de biofertilizante liquido digerido	99.00%	% de biofertilizante producido/lodos residuales
Producción biofertilizante	52.25	m <sup>3</sup> de biofertilizante/Día
Producción biofertilizante	16,353.75	m <sup>3</sup> de biofertilizante/Año

Todos los residuos poseen masa y volumen, la masa de diferentes sustancias ocupan distintos volúmenes y en consecuencia la energía que está presente en cada unidad de medida es diferente, por este motivo en la Tabla 134 se muestran las equivalencias de energía que contiene un m<sup>3</sup> de biogás y una tonelada de biogás determinados por su peso específico. Al final del día debe ser la misma energía producida.

Tabla 134. Producción de bioenergía al año proveniente del tratamiento de lodos residuales

Descripción	Cantidad	Unidad en Volumen	Cantidad	Unidad en Masa
Generación de Biogás al:	75.00%	de Metano	75.00%	de Metano
Poder Calorífico (BTU's)	27,596.48	BTU's/m <sup>3</sup>	17,196,166.7	BTU's/Ton
Producción diaria de biogás al 75% de CH <sub>4</sub>	720.07	m <sup>3</sup> /Día	1.16	Ton/Día
Producción anual de biogás al 75% de CH <sub>4</sub>	225,383.38	m <sup>3</sup> /Año	361.70	Ton/Año
Oferta Diaria en BTU's	19,871,525	BTU's/Día	19,871,525	BTU's/Día
Oferta Anual en BTU's	6,219,787,343	BTU's/Año	6,219,787,343	BTU's/Año

El tiempo de operación en la planta procesadora de aves es 313 días resultado de operar 6 días a la semana durante 52 semanas que tiene un año. En este tiempo se producen 225,383m<sup>3</sup> de biogás y 16,353 m<sup>3</sup> de biofertilizante a partir del aprovechamiento energético del lodo residual, ver Tabla 135.

**Tabla 135. Producción anual de biogás y biofertilizante proveniente de lodos residuales**

<b>Descripción</b>	<b>Producción anual</b>	<b>Unidad en Volumen</b>
Producción diaria de biogás al 75% de CH <sub>4</sub>	720.07	m <sup>3</sup> /día
Producción anual de biogás al 75% de CH <sub>4</sub>	225,383.38	m <sup>3</sup> /año
Producción de biofertilizante	52.25	m <sup>3</sup> /día
Producción de biofertilizante	16,353.7	m <sup>3</sup> /año

### 3.2.6. Análisis de riesgo para estimar la rentabilidad económica del uso de lodos residuales

La producción anual de bioenergía estimada es de 225,383 m<sup>3</sup> de biogás que es combustionado con dos motogeneradores de 29.6 kW de capacidad durante 22 horas al día cada uno, dando un rendimiento de 1.87 kW por m<sup>3</sup> de biogás utilizado.

Se estima que la generación de energía eléctrica en un año es de 422 mil kWh a un precio de 1.38 pesos el kilowatt-hora, el comportamiento del precio del kWh en los últimos 24 meses se encuentra en la Figura 37.

La generación eléctrica representa un 9.0% con respecto a la energía utilizada en los equipos eléctricos instalados en el proceso de la planta procesadora de aves, por este motivo es mejor utilizarla como energía para autoconsumo y dejar de consumir o comprar energía eléctrica de la red nacional, generando un ahorro económico para la cadena de valor.

Los ahorros estimados son 582 mil pesos que es energía que se deja de comprar a la comisión federal de electricidad CFE, ver la Tabla 136.

**Tabla 136. Producción anual de energía eléctrica utilizando biogás de la digestión de lodos residuales.**

Concepto	Cantidad	Unidad
Producción anual de biogás al 75% de CH <sub>4</sub>	225,383.3	m <sup>3</sup> Biogás/año
Oferta diaria de biogás	720.07	m <sup>3</sup> Biogás/día
Capacidad de generación	29.67	kW
Consumo del motogenerador	15.83	m <sup>3</sup> Biogás/hora
Rendimiento eléctrico del Motogenerador	1.87	kW/m <sup>3</sup> biogás
Tiempo de generación al día	45.48	horas
Motogeneradores a utilizar	2	Motogeneradores
Horas de operación por motogenerador	22.74	horas
Generación	1,349.19	kWh/día
Generación anual	422,297.2	kWh/año
Precio de kWh	1.38	\$/kWh
Ahorros Eléctricos	\$ 582,770.2	Pesos/año
Ahorro eléctrico mensual	\$ 48,564.1	Pesos/mes
Precio dólar	\$ 13.38	Pesos/dólares

Derivado de la generación de biogás se producen biosólidos que cumplen con la norma NOM-004-SEMARNAT 2002 que son utilizados como biofertilizantes para cultivos de caña de azúcar, por floricultores de la zona y para cultivos nativos de la región como chayote, papa, limón entre otros.

El precio estimado de un m<sup>3</sup> de biofertilizante es de 103.33 pesos, ver la Tabla 137, y representa 1.6 millones de pesos su venta derivado de la producción de biosólidos anualmente.

**Tabla 137. Producción anual de biosólidos resultantes de la digestión de lodos residuales.**

Concepto	Generación	Unidad
Precio m <sup>3</sup> de biofertilizante líquido	\$ 103.33	Pesos/m <sup>3</sup>
Oferta diaria de biofertilizante	52.25	m <sup>3</sup> biofertilizante/día
Oferta anual biofertilizante	16,353.75	m <sup>3</sup> biofertilizantes/año
Ingresos por biofertilizante	\$ 1,689,887.30	Pesos/Año

Los beneficios anuales por la utilización de lodos residuales con fines energéticos generan un valor esperado de 2.2 millones de pesos, ver Tabla 138.

**Tabla 138. Beneficios económicos derivados de la utilización energética utilizando lodos residuales.**

<b>Tabla de Resultados</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Ahorros eléctricos por combustión de biogás y generación de energía eléctrica	\$ 582,770.23	Pesos anuales/autoconsumo eléctrico
Ingresos por venta de biofertilizante	\$ 1,689,887.30	Pesos anuales/venta de biofertilizantes
Beneficios totales del bionegocio	\$ 2,272,657.53	Pesos totales al año

La inversión inicial para el proyecto Conacyt No.182647 fue para tratar 23 m<sup>3</sup> el 44% del volumen que se genera actualmente, para ello se requirió una inversión de 6,853,538 pesos de los cuales el gobierno federal otorgo un subsidio de 3,278,981 pesos que representa el 47% de la inversión total.

Para estimar la inversión inicial para tratar los 52 m<sup>3</sup> de lodos se proyecta la inversión a 16,821,739 pesos, desglosados en la Tabla 139, para el análisis económico también se considera un 47% de subsidio.

**Tabla 139. Desglose de la inversión de la planta de digestión anaeróbica**

<b>Desglose de la Inversión Inicial</b>	<b>Importes para 52 m<sup>3</sup>/día</b>
Presentación del proyecto de bioenergía (biogás)	\$ -
Diseño y desarr. tecnol. con ingeniería de detalle	\$ -
Preliminares de adecuación del terreno	\$ 18,062.05
Canalización de líneas actuales y futuras	\$ 34,421.42
Cimentación tanques y reactores	\$ 907,683.12
Acondicionamiento de área del sistema	\$ 767,513.72
Reactores digestores, tanques de hidrólisis con temperatura	\$ 8,012,217.79
Bombas especiales sólidos y gas	\$ 230,167.27
Válvulas manejo sólidos y gas	\$ 227,394.37
Indicadores de niveles y presión	\$ 30,646.26
Tubería PVC hidráulico del sistema	\$ 67,582.10



Estructura metálica para soporte de tubería	\$	94,097.64
Línea de vapor y serpentín	\$	1,346,511.55
Línea de retorno de condensados	\$	1,699,696.91
Equipo de aprovechamiento de biogás	\$	170,831.11
Instalación eléctrica fuerza	\$	1,071,726.78
Instalación eléctrica iluminación	\$	102,172.79
Generadores eléctricos a gas	\$	2,041,014.10
<b>Inversión total</b>	<b>\$</b>	<b>16,821,739.00</b>

Se realiza el flujo un flujo de efectivo a 10 años y en la columna de acumulado se aprecia que en el año 3 el valor cambia de signo indicando el año en que se paga la inversión.

**Tabla 140. Flujo de efectivo de la inversión la digestión anaeróbica de lodos residuales.**

Año	Año	Inversión Inicial	Biogás + Biosólidos y Subsidio CONACYT	Flujo de Efectivo	Flujo de Efectivo Acumulado
0	2015	-\$ 16,821,739	\$ 8,074,435	-\$ 8,747,304	-\$ 8,747,304
1	2016		\$ 2,272,658	\$ 2,272,658	-\$ 6,474,647
2	2017		\$ 2,272,658	\$ 2,272,658	-\$ 4,201,989
3	2018		\$ 2,272,658	\$ 2,272,658	-\$ 1,929,332
4	2019		\$ 2,272,658	\$ 2,272,658	\$ 343,326
5	2020		\$ 2,272,658	\$ 2,272,658	\$ 2,615,983
6	2021		\$ 2,272,658	\$ 2,272,658	\$ 4,888,641
7	2022		\$ 2,272,658	\$ 2,272,658	\$ 7,161,298
8	2023		\$ 2,272,658	\$ 2,272,658	\$ 9,433,956
9	2024		\$ 2,272,658	\$ 2,272,658	\$ 11,706,613
10	2025		\$ 2,272,658	\$ 2,272,658	\$ 13,979,271

Se utiliza una tasa del 10% de descuento para estimar la ganancia mínima que se espera recuperar al desarrollar la inversión y se compara con la tasa de rendimiento del proyecto que es 23%, se concluye que al ser mayor la TIR que la TREMA se determina el proyecto es atractivo económicamente, en la Tabla 141.

**Tabla 141. Indicadores financieros del rendimiento energético de los lodos residuales.**

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Tasa de Descuento	10.00%	% TREMA
Tasa Interna de Retorno	23.00%	% TIR
Valor Presente	\$ 13,964,497	Pesos
Valor Presente Neto	\$ 5,217,192	Pesos
Periodo de Recuperación	44.190	Meses
Periodo de Recuperación	3.680	Años

El valor presente neto de la inversión es de 5.2 millones de pesos con un periodo de recuperación de 3.6 años.

### 3.2.7. Sustentabilidad ambiental con reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

El factor de emisión del año 2013 de la tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO<sub>2</sub>eq) para México es de 0.4999 tCO<sub>2</sub>eq por MWh. (GEI, 2013), al digerir el lodo residual de manera anaeróbica se logra mitigar 211.11 toneladas de tCO<sub>2</sub>eq al medio ambiente en un año por generación de energía a partir de la combustión del biogás en un motogenerador eléctrico.

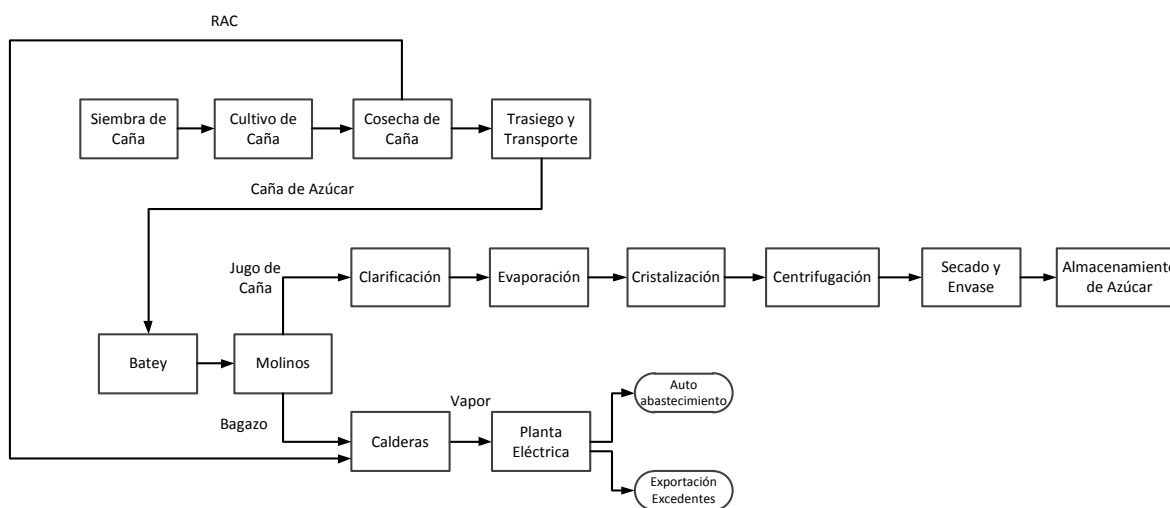
En el análisis económico no considera el valor que representa la posible venta de los certificados de reducción de emisiones de efecto invernadero (CER's), porque actualmente el valor monetario de 0.125 usd por CER es muy bajo por lo que no es representativo, ni representa cambios significativos al estudio económico.

### 3.3. Cadena de valor cañero-azucarera utilizando residuos agrícolas de cosecha (RAC) y bagazo

En la cadena de Valor agroindustrial cañero-azucarera se generan dos tipos de residuo el Bagazo y el residuo agrícola de cosecha (RAC) de la caña de azúcar (ambos son Biomasa sólida).

El RAC es el subproducto de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar, y está formado por hojas, puntas secas y trozos del tallo, a este conjunto se llama biomasa cañera.

La cadena de valor Cañero-Azucarera está integrada por 4 eslabones o etapas que intervienen para cultivar y cosechar caña de azúcar en el área de “Campo”, esta materia prima es la que sirve para producir Azúcar de caña en el área de “Fábrica” a través de 10 eslabones, pero que son parte de una línea continua de transformación, llamada cadena “Cañero-Azucarera”, en la Figura 65 se aprecian las 14 etapas a las que hacemos referencia.



**Figura 65. Cadena de valor cañera-azucarera**

En el eslabón de cosecha de caña de azúcar se efectúan operaciones de mecanización agrícola, donde intervienen cosechadoras de caña, equipo de alta flotación para el trasiego de la caña, equipo de alta capacidad de carga para el transporte de la caña, y el residuo agrícola se queda en el campo reintegrándose a la tierra como materia orgánica, desperdiciándose al no darle uso energético.

Gran parte de este residuo agrícola excede la cantidad de materia orgánica que debe ser devuelta a la tierra originada por los parámetros de cosecha mecanizada.

Para que se pueda producir el residuo agrícola de cosecha de caña es necesario cultivar y cosechar la caña, en la Figura 66 se aprecia a la izquierda las operaciones que se deben realizar para lograr

caña de buena calidad, y a la derecha se obtiene caña en distintas calidades y subproductos cuando se cosecha, entre los que destacan los residuos agrícolas de cosecha de caña. En la parte inferior los recursos y factores que afectan el desarrollo y producción de la caña y sus residuos.

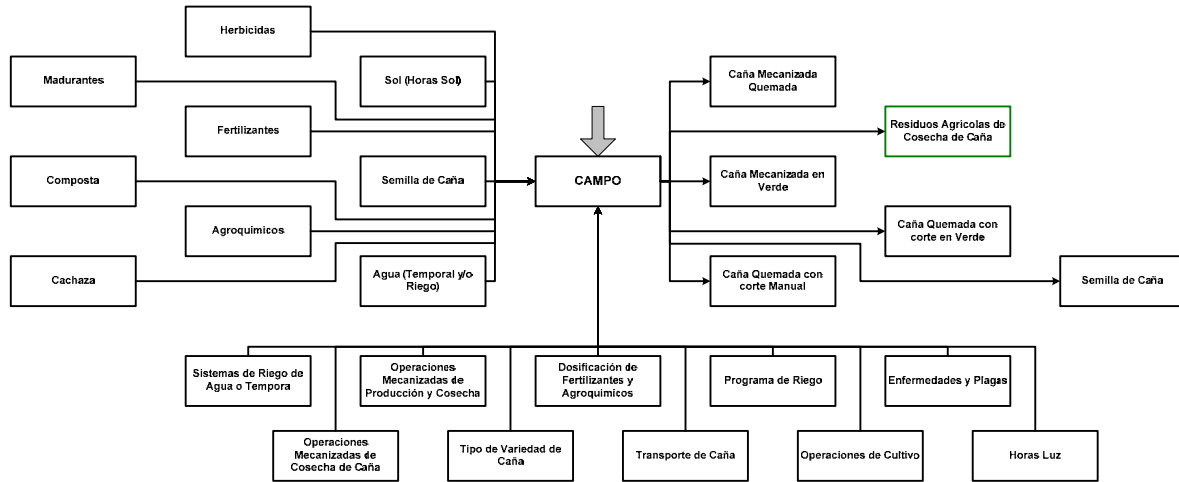


Figura 66. Residuos agrícolas de cosecha de caña

El bagazo es un residuo que se obtiene en el eslabón de molinos donde se realiza la extracción del jugo de caña de azúcar y se efectúa la separación del bagazo al 50% de contenido de humedad para ser utilizado como biomasa en el área de calderas del ingenio, ver Figura 67.

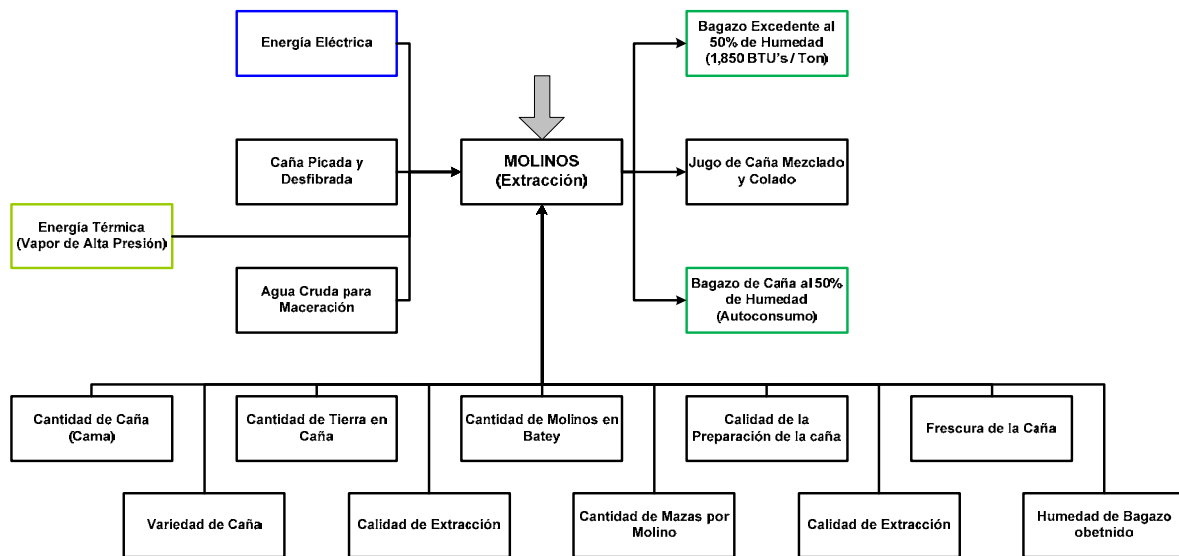


Figura 67. Residuos agroindustriales del procesamiento de caña

Para efectos de investigación en el desarrollo de la red de valor se evalúan las cadenas de tres ingenios azucareros que integran al grupo corporativo formado por el ingenio de Huixtla (HX) que

procesa 1, 290,421 toneladas de caña para producir 131,081 toneladas de azúcar está ubicado en el municipio de Huixtla en el estado de Chiapas, el ingenio San Pedro (SP) que procesa 1, 364,000 toneladas de caña para producir 139,128 toneladas de azúcar está ubicado en el Municipio de Ciudad Lerdo de Tejada, en el estado de Veracruz y el ingenio Santa Clara (SC) que procesa 719,270 toneladas de caña para producir 82,564 toneladas de azúcar está ubicado en el Municipio de Los Reyes en el estado de Michoacán

Los tres ingenios representan el 5.73% del volumen de caña y el 5.25% de volumen de azúcar de la producción nacional. Las tres fábricas de azúcar cuentan con más de 2,063 Colaboradores directos en las unidades industriales durante la zafra.

En últimos 10 años los Ingenios Azucareros de la división Azúcar, ha mantenido un crecimiento en la producción de azúcar estándar, logrando un volumen de 352.8 mil en la zafra 12/13 ver Figura 68, equivalente a un crecimiento del 134% con respecto a la zafra 02/03.

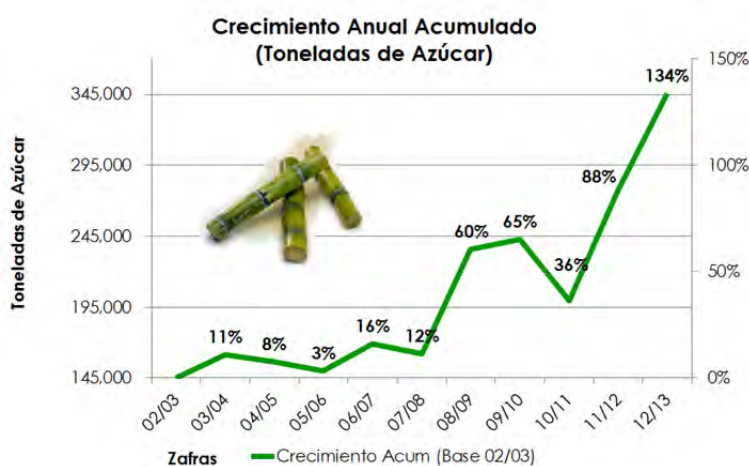


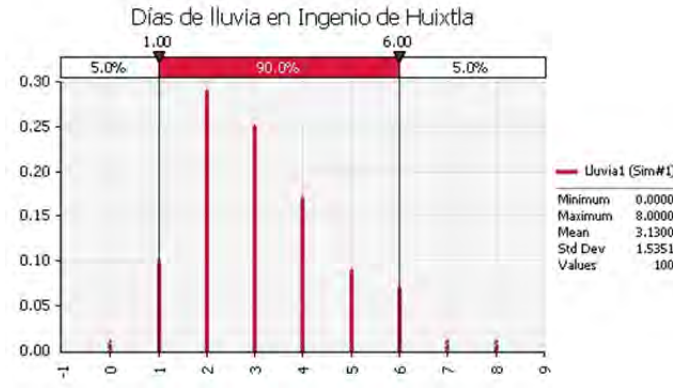
Figura 68. Crecimiento de toneladas de azúcar

### 3.3.1. Análisis del sistema de producción de residuos agrícolas de cosecha (RAC) y bagazo

En la etapa de análisis se consideran evaluar las tres cadenas cañero – azucareras para referirnos a ellas se nombrara al ingenio respectivo. La primera cadena de valor incluye el ingenio de Huixtla con la empresa agrícola Fomento Azucarero ubicados en Huixtla, Chiapas, la segunda cadena de valor incluye al Ingenio San Pedro con la empresa agrícola Excelencia Cañera ubicados en Cd. Lerdo de tejada, Veracruz y la tercera cadena de valor incluye al ingenio Santa Clara con la empresa agrícola Cañaverales Mexicanos.

**Días de lluvia en la cadena de valor.**

Los días de lluvia afectan al rendimiento de recolección de residuos agrícolas de cosecha, para cada cadena de valor los días de lluvia son distintos, ver Figura 69, Figura 70, y Figura 71.



**Figura 69. Días de lluvia en Huixtla**

De los 160 días de zafra que tiene Huixtla se deben restar 3 días por lluvia quedando un periodo de operación de 157 días para realizar la recolección del RAC.



**Figura 70. Días de lluvia en San Pedro**

Para el caso del ingenio San Pedro la recolección es la cadena de valor con menos días de recolección al estar afectado por 20 días de tiempo perdido por lluvia quedando solo 140 días para realizar la recolección de RAC con la calidad requerida.



**Figura 71. Días de lluvia en Santa Clara**

Para el ingenio Santa Clara los días por tiempo perdido son 9 días resultando en un periodo de recolección de 151 días.

La lluvia genera un tiempo perdido asociado al nivel de precipitación, en zonas donde la lluvia es más constante el tiempo de operación se reducirá, el punto de decisión del experto para determinar si detiene o no las operaciones por condiciones de precipitación pluvial es un valor superior a 7.6mm por día.

### **Producción de Caña y Residuo Agrícola de cosecha (RAC)**

A continuación se presenta el plan estratégico de crecimiento en producción de caña que está sujeto al aumento en el rendimiento de toneladas de caña por hectárea y superficie disponible por tipo de cosecha mecanizada. El volumen de recolección de residuos de cosecha y del bagazo a obtener dependerá del volumen de caña a cosechar.

Los casos son particulares para cada cadena de valor que lo integra el ingenio azucarero junto con la empresa agrícola que provee de caña al ingenio.

## 1. Cadena de valor en el Ingenio de Huixtla

La producción de caña para cosechar y los rendimientos de recolección de RAC están dados por la estimación del rendimiento de caña por hectárea por tipo de cosecha que se efectúa, se muestran en la Tabla 142.

**Tabla 142. Rendimiento por tipo de cosecha de caña del Ingenio de Huixtla**

Año	Cosecha Manual Quemada	Cosecha Manual en Verde	Cosecha mecanizada quemada	Mecanizado en Verde	Unidad
2014/15	82.00	82.00	82.00	82.00	toneladas/ha
2015/16	85.00	85.00	85.00	85.00	toneladas/ha
2016/17	85.00	85.00	85.00	85.00	toneladas/ha
2017/18	85.00	85.00	85.00	85.00	toneladas/ha
2018/19	85.00	85.00	85.00	85.00	toneladas/ha
2019/20	85.00	85.00	85.00	85.00	toneladas/ha
2020/21	85.00	85.00	85.00	85.00	toneladas/ha
2021/22	85.00	85.00	85.00	85.00	toneladas/ha
2022/23	85.00	85.00	85.00	85.00	toneladas/ha
2023/24	85.00	85.00	85.00	85.00	toneladas/ha
2024/25	85.00	85.00	85.00	85.00	toneladas/ha

La superficie disponible para Huixtla es de hasta 18 mil hectáreas de las cuales solo el 17% es caña mecanizada en verde, que es la superficie requerida para realizar la recolección del RAC.

La cosecha quemada ya sea manual o mecanizada representa un valor bajo de residuos agrícolas de cosecha porque ha sido quemada y no produce RAC suficiente para que sea atractivo ser recolectado, es por esto que para determinar el volumen de RAC no se consideran la hectáreas para este tipo de cosecha quemada de manera mecanizada y manual, y el tipo de cosecha manual en verde tampoco se considera porque es muy bajo la cantidad de residuos alojados en campo. Solo tomamos en consideración la cosecha mecanizada en verde, ver Tabla 143.

Para la recolección del RAC solo se utilizan las hectáreas de cosecha mecanizada en verde.



**Tabla 143. Hectáreas disponibles en la cadena de valor en el ingenio de Huixtla por tipo de cosecha**

<b>Año</b>	<b>Manual Quemada</b>	<b>Manual Verde</b>	<b>Mecanizada Quemada</b>	<b>Mecanizada verde</b>	<b>Hectáreas Totales</b>
2014/15	7,909	30	6,438	1,476	15,854
2015/16	7,429	28	6,543	1,800	15,800
2016/17	7,517	28	6,825	2,100	16,471
2017/18	7,600	28	7,130	2,300	17,059
2018/19	7,725	29	7,193	2,700	17,647
2019/20	7,725	29	7,381	3,100	18,235
2020/21	7,725	29	7,381	3,100	18,235
2021/22	7,725	29	7,381	3,100	18,235
2022/23	7,725	29	7,381	3,100	18,235
2023/24	7,725	29	7,381	3,100	18,235
2024/25	7,725	29	7,381	3,100	18,235

El volumen de caña producir para la zafra actual es de 1.3 millones de toneladas de caña hasta alcanzar 1.55 millones de toneladas de caña para después del año 4, ver Tabla 144.

**Tabla 144. Producción de caña por tipo de cosecha en Huixtla**

<b>Año</b>	<b>t caña Manual Quemada</b>	<b>t caña Manual en verde</b>	<b>t caña Mecanizada Quemada</b>	<b>t caña Mecanizada en verde</b>	<b>Toneladas de caña</b>	<b>Rendimiento ponderado de t caña/ha</b>
2014/15	648,573	2,421	527,939	121,067	1,300,000	82.00
2015/16	631,510	2,358	556,150	153,000	1,350,000	85.44
2016/17	638,958	2,385	580,156	178,500	1,400,000	85.00
2017/18	646,052	2,412	606,036	195,500	1,450,000	85.00
2018/19	656,628	2,451	611,421	229,500	1,500,000	85.00
2019/20	656,628	2,451	627,421	263,500	1,550,000	85.00
2020/21	656,628	2,451	627,421	263,500	1,550,000	85.00
2021/22	656,628	2,451	627,421	263,500	1,550,000	85.00
2022/23	656,628	2,451	627,421	263,500	1,550,000	85.00
2023/24	656,628	2,451	627,421	263,500	1,550,000	85.00

2024/25	656,628	2,451	627,421	263,500	1,550,000	85.00
---------	---------	-------	---------	---------	-----------	-------

La superficie cosechada de manera mecanizada de caña en verde tiene 1,476 hectáreas con un potencial de hasta 3,100 hectáreas, este volumen da un estimado de RAC disponible en campo de 12,678 toneladas, menos el efecto de tres días de lluvia por zafra queda un 1,449 hectáreas con un saldo de 12,440 toneladas de RAC en el año 0 y de hasta 26,119 toneladas de RAC en el año 5 con posibilidades de ser recolectado por zafra, ver Tabla 145.

**Tabla 145, Producción de RAC incluyendo lluvia en Huixtla**

<b>Año</b>	<b>has en Verde/día</b>	<b>Has en verde incluye Lluvia</b>	<b>Ton RAC/día</b>	<b>Ton RAC Sin Lluvia</b>	<b>Ton RAC incluye Lluvia</b>
2014/15	9	1,449	79	12,678	12,440
2015/16	11	1,766	97	15,456	15,166
2016/17	13	2,061	113	18,032	17,694
2017/18	14	2,257	123	19,749	19,379
2018/19	17	2,649	145	23,184	22,749
2019/20	19	3,042	166	26,619	26,119
2020/21	19	3,042	166	26,619	26,119
2021/22	19	3,042	166	26,619	26,119
2022/23	19	3,042	166	26,619	26,119
2023/24	19	3,042	166	26,619	26,119
2024/25	19	3,042	166	26,619	26,119

## 2. Cadena de valor en el Ingenio San Pedro

El rendimiento de cosecha de caña de azúcar está dado por la eficiencia de las actividades de cosecha y de las labores de producción durante el cultivo de la caña que aumentan con el tonelaje producido y cosechado por hectárea. En la Tabla 146 se aprecia el rendimiento de la cosecha mecanizada de caña verde y caña quemada es similar, y la de mayor rendimiento es la cosecha manual en verde.

**Tabla 146. Rendimiento por tipo de cosecha de caña del Ingenio San Pedro**

<b>Año</b>	<b>Cosecha Manual Quemada</b>	<b>Cosecha Manual en Verde</b>	<b>Cosecha mecanizada quemada</b>	<b>Mecanizado en Verde</b>	<b>Unidad</b>
2014/15	64.00	72.03	64.00	64.18	toneladas/ha
2015/16	69.00	75.79	68.00	70.56	toneladas/ha
2016/17	74.00	78.87	72.00	77.32	toneladas/ha
2017/18	79.00	81.80	78.00	83.10	toneladas/ha
2018/19	84.00	86.41	86.50	86.73	toneladas/ha
2019/20	84.00	86.41	86.50	86.73	toneladas/ha
2020/21	84.00	86.41	86.50	86.73	toneladas/ha
2021/22	84.00	86.41	86.50	86.73	toneladas/ha
2022/23	84.00	86.41	86.50	86.73	toneladas/ha
2023/24	84.00	86.41	86.50	86.73	toneladas/ha
2024/25	84.00	86.41	86.50	86.73	toneladas/ha

El ingenio San Pedro utiliza 20 mil hectáreas durante una zafra de 160 días. El rendimiento es multiplicado por la superficie en hectáreas por tipo de cosecha, para obtener la producción de caña por zafra que será utilizada por el ingenio para producir azúcar, ver la Tabla 147.

Tabla 147. Hectáreas disponibles en la cadena de valor en el ingenio San Pedro por tipo de cosecha

Año	Has Manual Quemada	Has Manual Verde	Has Mecanizada Quemada	Has Mecanizada verde	Hectáreas Totales
2014/15	14,291	2,432	654	2,623	20,000
2015/16	13,472	2,442	1,152	2,933	20,000
2016/17	12,794	2,465	1,500	3,245	20,003
2017/18	12,200	2,444	1,807	3,555	20,005
2018/19	12,237	2,520	1,688	3,555	20,000
2019/20	12,237	2,520	1,688	3,555	20,000
2020/21	12,237	2,520	1,688	3,555	20,000
2021/22	12,237	2,520	1,688	3,555	20,000
2022/23	12,237	2,520	1,688	3,555	20,000
2023/24	12,237	2,520	1,688	3,555	20,000
2024/25	12,237	2,520	1,688	3,555	20,000

La producción de caña se muestra en la Tabla 148, indicando se logran cosechar hasta 308 mil toneladas de caña de forma mecanizada en verde.

Tabla 148. Producción de caña por tipo de cosecha en San Pedro

Año	t caña Manual Quemada	t caña Manual en verde	t caña Mecanizada Quemada	t caña Mecanizada en verde	Toneladas de caña	Rendimiento ponderado de t caña/ha
2014/15	914,629	175,199	41,866	168,306	1,300,000	65.00
2015/16	929,599	185,082	78,355	206,964	1,400,000	70.00
2016/17	946,720	194,410	107,980	250,889	1,500,000	74.99
2017/18	963,783	199,904	140,909	295,404	1,600,000	79.98
2018/19	1,027,870	217,752	146,042	308,336	1,700,000	85.00
2019/20	1,027,870	217,752	146,042	308,336	1,700,000	85.00
2020/21	1,027,870	217,752	146,042	308,336	1,700,000	85.00
2021/22	1,027,870	217,752	146,042	308,336	1,700,000	85.00
2022/23	1,027,870	217,752	146,042	308,336	1,700,000	85.00
2023/24	1,027,870	217,752	146,042	308,336	1,700,000	85.00

2024/25	1,027,870	217,752	146,042	308,336	1,700,000	85.00
---------	-----------	---------	---------	---------	-----------	-------

Solo se considera la recolección potencial sobre los residuos de la superficie de cosecha mecanizada de caña verde, es decir sobre 2,623 hectáreas en el año 0 hasta llegar a 3,555 hectáreas en el año 3 y años posteriores.

El rendimiento de residuos agrícolas de cosecha (RAC) está afectado por los periodos de lluvia. Considerando 2,623 hectáreas de cosecha mecanizada en verde entre 160 días se obtiene un rendimiento de cosecha de 16 hectáreas al día, multiplicado por 20 días que llueve durante la zafra en San Pedro se obtiene un saldo de 2,295 hectáreas disponibles para recolectar RAC.

El rendimiento de recolección es del 87% es decir que de las 22,519 toneladas de RAC disponible en campo solo 19,704 toneladas de RAC pueden ser recolectadas, la diferencia no es recolectada porque es afectada por la lluvia, dañando su calidad para fines energéticos.

**Tabla 149. Producción de RAC incluyendo lluvia en San Pedro**

<b>Año</b>	<b>has en Verde/día</b>	<b>Has en verde con Lluvia</b>	<b>Ton RAC/día</b>	<b>Ton RAC Sin Lluvia</b>	<b>Ton RAC con Lluvia</b>
2014/15	16	2,295	141	22,519	19,704
2015/16	18	2,566	157	25,185	22,037
2016/17	20	2,839	174	27,864	24,381
2017/18	22	3,111	191	30,526	26,710
2018/19	22	3,111	191	30,526	26,710
2019/20	22	3,111	191	30,526	26,710
2020/21	22	3,111	191	30,526	26,710
2021/22	22	3,111	191	30,526	26,710
2022/23	22	3,111	191	30,526	26,710
2023/24	22	3,111	191	30,526	26,710
2024/25	22	3,111	191	30,526	26,710

El crecimiento estimado de recolección de RAC llega a 26,710 toneladas por zafra.

### 3. Cadena de valor en el Ingenio Santa Clara

En la cadena de valor de Santa Clara, no existen operaciones de cosecha manual en verde, el rendimiento de toneladas por hectáreas es más alto por las condiciones climáticas de la zona y por la alta estandarización de las operaciones,

**Tabla 150. Rendimiento por tipo de cosecha de caña del Ingenio Santa Clara**

<b>Año</b>	<b>Cosecha Manual Quemada</b>	<b>Cosecha Manual en Verde</b>	<b>Cosecha mecanizada quemada</b>	<b>Mecanizado en Verde</b>	<b>Unidad</b>
2014/15	99.50	-	99.50	99.50	toneladas/ha
2015/16	100.00	-	100.00	100.00	toneladas/ha
2016/17	100.00	-	100.00	100.00	toneladas/ha
2017/18	100.00	-	100.00	100.00	toneladas/ha
2018/19	100.00	-	100.00	100.00	toneladas/ha
2019/20	100.00	-	100.00	100.00	toneladas/ha
2020/21	100.00	-	100.00	100.00	toneladas/ha
2021/22	100.00	-	100.00	100.00	toneladas/ha
2022/23	100.00	-	100.00	100.00	toneladas/ha
2023/24	100.00	-	100.00	100.00	toneladas/ha
2024/25	100.00	-	100.00	100.00	toneladas/ha

Las tablas de los estimados de producción son factor clave para estimar la caña a producir y en consecuencia el RAC y bagazo a obtener, en la Tabla 151 se aprecia que el ingenio Santa Clara es la cadena que tiene la menor superficie de caña mecanizada en verde porque Cañaverales Mexicanos renta las hectáreas y por la dificultad de conseguirlas en la zona de Michoacán por el tipo de terreno quebrado que impiden operaciones de cosecha mecanizada.

Tabla 151. Hectáreas disponibles en la cadena de valor en el ingenio Santa Clara por tipo de cosecha

<b>Año</b>	<b>Manual Quemada</b>	<b>Manual Verde</b>	<b>Mecanizada Quemada</b>	<b>Mecanizada verde</b>	<b>Hectáreas Totales</b>
2014/15	3,326.41	-	1,610	2,200	7,136
2015/16	3,410.53	-	1,624	2,165	7,200
2016/17	3,435.29	-	1,610	2,254	7,300
2017/18	3,431.88	-	1,609	2,359	7,400
2018/19	3,453.24	-	1,619	2,428	7,500
2019/20	3,568.35	-	1,673	2,509	7,750
2020/21	3,657.14	-	1,771	2,571	8,000
2021/22	3,657.14	-	1,771	2,571	8,000
2022/23	3,657.14	-	1,771	2,571	8,000
2023/24	3,657.14	-	1,771	2,571	8,000
2024/25	3,657.14	-	1,771	2,571	8,000

El ingenio Santa Clara al ser más pequeño tienen una menor capacidad instalada de molinera horaria, y en consecuencia el volumen de caña a procesar por zafra también es menor en comparación de los otros dos ingenios, en la Tabla 152 se muestra una molinera de hasta 800 mil toneladas por zafra.

Tabla 152. Producción de caña por tipo de cosecha en Santa Clara

<b>Año</b>	<b>t caña Manual Quemada</b>	<b>t caña Manual en verde</b>	<b>t caña Mecanizada Quemada</b>	<b>t caña Mecanizada en verde</b>	<b>Toneladas de caña</b>	<b>Rendimiento ponderado de t caña/ha</b>
2014/15	330,977	-	160,150	218,872	710,000	99.50
2015/16	341,053	-	162,406	216,541	650,000	90.28
2016/17	343,529	-	161,029	225,441	730,000	100.00
2017/18	343,188	-	160,870	235,942	740,000	100.00
2018/19	345,324	-	161,871	242,806	750,000	100.00
2019/20	356,835	-	167,266	250,899	775,000	100.00
2020/21	365,714	-	177,143	257,143	800,000	100.00
2021/22	365,714	-	177,143	257,143	800,000	100.00

2022/23	365,714	-	177,143	257,143	800,000	100.00
2023/24	365,714	-	177,143	257,143	800,000	100.00
2024/25	365,714	-	177,143	257,143	800,000	100.00

De las 2,200 hectáreas disponibles de cosecha mecanizada en verde con un potencial de 18,888 toneladas de RAC, las cuales se deben reducir por el efecto de la lluvia que ronda los 9 días, este evento ambiental reduce las hectáreas que pueden ser recolectadas en 2,076 has y el volumen de toneladas a recolectar en 17,826 toneladas de RAC en condiciones para ser utilizadas como biocombustible, ver Tabla 153.

**Tabla 153 Producción de RAC incluyendo lluvia en Santa Clara**

<b>Año</b>	<b>has en Verde/día</b>	<b>Has en verde con Lluvia</b>	<b>Ton RAC/día</b>	<b>Ton RAC Sin Lluvia</b>	<b>Ton RAC con Lluvia</b>
2014/15	14	2,076	118	18,888	17,826
2015/16	14	2,044	116	18,594	17,548
2016/17	14	2,128	121	19,358	18,269
2017/18	15	2,227	127	20,259	19,120
2018/19	15	2,291	130	20,849	19,676
2019/20	16	2,368	135	21,544	20,332
2020/21	16	2,427	138	22,080	20,838
2021/22	16	2,427	138	22,080	20,838
2022/23	16	2,427	138	22,080	20,838
2023/24	16	2,427	138	22,080	20,838
2024/25	16	2,427	138	22,080	20,838



### 3.3.2. Control de variables para mejorar la calidad de residuos agrícolas de cosecha y bagazo

#### Hilerado de residuo agrícola de cosecha (RAC)

El turno de operación de hilerado y enfardado es de 8 horas, de los cuales existe un tiempo perdido por la preparación de los equipos, mantenimiento correctivo y tiempos de comida, los cuales tienen una media de 2 horas, quedando solo 6 horas de operación efectiva, ver Tabla 154.

**Tabla 154. Tiempos de operación del hilerado y enfardado**

Concepto	Cantidad	Unidad
T. Perdido Durante la Operación	2.00	horas
Operación efectiva de hilerado	6.00	horas
Turno	8.00	horas
Rastrillo Hilerador	2.90	has/hr



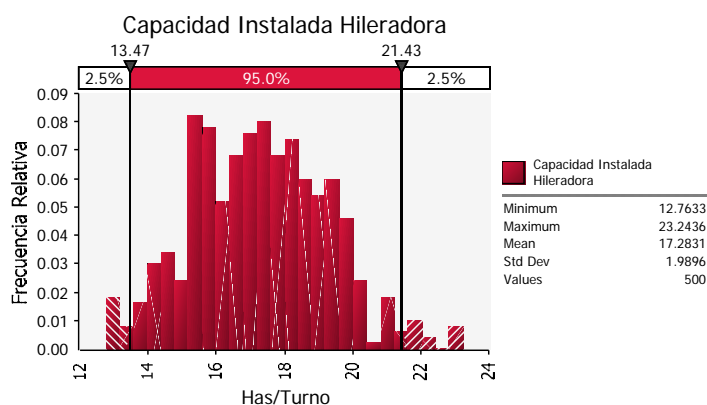
**Figura 72. Tiempos perdidos en operación de recolección**

El tractor con el implemento para hiliar alinea 2,220 metros de RAC en surcos en una hectárea de superficie, a una velocidad de 6.45 km por hr, esto da un rendimiento de operación de 17.2 hectáreas en un turno, es decir que trabaja a un ritmo de 2.9 hectáreas por hora, ver Tabla 155.

**Tabla 155. Capacidad instalada de operación del hilerador**

Concepto	Cantidad	Unidad
Hileras de Trabajo	2.22	km/ha
Velocidad de Hilerador	6.45	km/hr
Tiempo por Ha	0.34	hr/ha
Tiempo por Ha	20.68	min/ha
Capacidad Instalada	17.40	has/turno
Capacidad Utilizada Simulada	17.25	has/turno

Los valores de la simulación indican que la capacidad de la hileradora es de 17.2 hectáreas por turno, esto indica que es muy rápida su operación en comparación al enfardado.



**Figura 73. Rendimiento de la Hileradora**

### Enfardado de residuo agrícola de cosecha (RAC)

Se realizó un análisis para determinar el mejor tamaño del fardo a elaborar en el campo de 1 m, de 1.25 m y de 1.5 m de diámetro, dando como resultado que el fardo con mayor rendimiento por hectárea es el de 1.25 metros de diámetro, ver Figura 74, Tabla 156 y Tabla 157.

**Tabla 156. Rendimiento por tamaño de fardo de RAC**

Enfardador	mts/enfardado	fardos/ha	ton/ha	km/hr
1.00 M	47.53	46.75	7.01	1.61
1.25 M	51.76	42.93	<b>8.59</b>	1.55
1.50 M	80.00	27.78	8.33	1.81



Figura 74. Diámetro del fardo con mayor capacidad de acarreo

Con la evaluación se puede observar que el mejor rendimiento por hectárea se encuentra al operar con un enfardador de 1.25 metros (Valdés, 2013), con una media de 8.59 toneladas por hectárea.

Tabla 157. Capacidad instalada de operación del enfardador

Concepto	Cantidad	Unidad
Hileras de Trabajo	2.22	km/ha
Velocidad de Enfardado de 1.25 mts diam.	1.55	km/hr
Tiempo por ha	1.43	hr/ha
Tiempo por ha	85.87	min/ha
Capacidad Instalada	<b>4.19</b>	has/turno
Capacidad Utilizada Simulada	<b>4.14</b>	has/turno
Mínimo	3.1993	has/turno
Media	4.1367	has/turno
Máximo	5.1968	has/turno

El rendimiento medio de recolección por tractor con enfardadora es de 4.1 hectáreas por turno, en la Figura 75 se aprecia el comportamiento de la enfardadora por tractor.

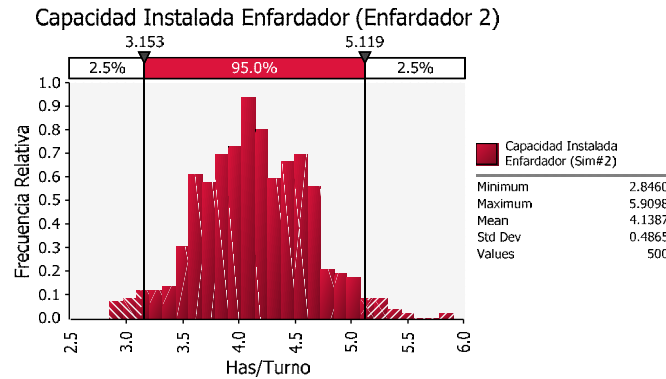


Figura 75. Rendimiento de la enfardadora

**Programa para la sincronización de operación entre el hilerador y el enfardador.**

Cada vez que la lluvia se hace presente las actividades se detienen, por lo que el ciclo alineado-enfardado-alce debe comenzar nuevamente, la sincronización de las operaciones del sistema con 2 tractores.

La operación de hilerado al ser más rápida tiene mayor holgura, permitiendo ocupar el tractor para las operaciones de enfardado, con solo cambiar el implemento agrícola. Se realiza este intercambio de implemento por que las operaciones de enfardado son más lentas y con esto se evita se genere un cuello de botella.

En la Tabla 158 se puede observar cuando un día es lluvioso se asigna un “1” y el enfardado diario resulta en cero, porque no se realizaron operaciones de recolección, también se observa que el enfardado diario sube y baja porque es el efecto de intercambiar los tractores con diferentes implementos agrícolas.

Tabla 158. Sincronización de operaciones con dos tractores para hilarar y enfardar

Hectáreas al día		Tractor 1		Tractor 2		
Día con Lluvia	Saldo del Día anterior	Hileradora	Enfardadora	Enfardadora	Saldo	Enfardado Diario
0	6.18	17.33	-	4.47	19.04	<b>4.47</b>
0	19.04	-	4.94	4.72	9.38	<b>9.66</b>
0	9.38	-	3.47	4.34	1.57	<b>7.81</b>
0	1.57	15.14	-	3.27	13.44	<b>3.27</b>
1	13.44	-	-	-	-	-
0	-	18.10	-	5.06	13.04	<b>5.06</b>
0	13.04	-	3.64	4.56	4.84	<b>8.20</b>
1	4.84	-	-	-	-	-
0	-	21.38	-	3.77	17.60	<b>3.77</b>
0	17.60	-	4.10	4.38	9.12	<b>8.49</b>
0	9.12	-	3.73	4.68	0.71	<b>8.40</b>

Tabla 159. Rendimiento de operaciones de enfardado por día de RAC

Día de zafra	has/día acum.	Tons RAC/día	Fardos RAC de 1.25m Acum.	fardos/día
1	29.29	37.98	1,239.07	189.06
2	38.95	82.07	1,647.60	408.53
3	46.76	66.37	1,977.98	330.38
4	50.03	27.81	2,116.40	138.42
5	50.03	-	2,116.40	-
6	55.09	43.00	2,330.47	214.07
7	63.29	69.65	2,677.19	346.71
8	63.29	-	2,677.19	-
9	67.06	32.06	2,836.80	159.61
10	75.55	72.11	3,195.79	359.00
11	83.95	71.41	3,551.30	355.51
<b>Promedio</b>		<b>51.51</b>		<b>282.18</b>

### Alce y acarreo de residuo agrícola de cosecha (RAC).

El alce es la actividad de alzar los fardos que deja en campo el enfardador. Para realizar esta actividad es necesario utilizar alzadoras, para las cuales también se debe determinar su capacidad, con el objetivo de obtener el número óptimo de ellas a adquirir.

Esta capacidad se mide en la cantidad de fardos que puede recolectar la alzadora con respecto a los fardos que produce la enfardadora por turno. El tiempo que requiere una alzadora para recorrer un hectárea tiene una media de 1.69 horas/ha a una velocidad de media hectárea por hora (0.59 Ha/Hora) en la Tabla 160 se ven estos resultados.

**Tabla 160. Velocidades de la Alzadora**

Concepto	Cantidad	Unidad
Tiempo de Cargadora	0.46	min
Distancia de Cargadora	10.00	mts
Velocidad de Cargadora	21.95	mts/min
Velocidad de Cargadora	101.23	min/ha
Velocidad de Cargadora	1.69	hr/ha
Velocidad de Cargar Fardo	2.36	min/fardo
Velocidad de Cargadora	0.59	ha/hr
Velocidad de Cargadora	3.56	ha/turno
Velocidad de Cargadora media	3.51	ha/turno
Velocidad de Cargar Fardo	0.42	fardos/min

Por último se presenta en la tabla, la capacidad de la alzadora a un turno de operación con tiempo perdido en campo, tiene un valor de 3.56 has/turno y presenta una media de 3.51 has/turno, ver Figura 76.

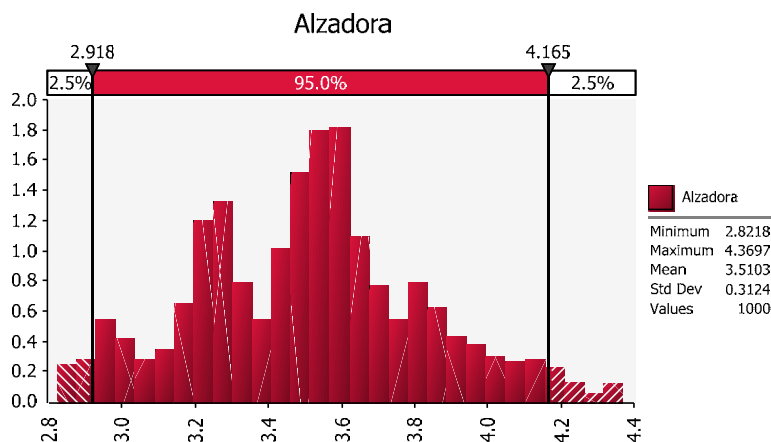


Figura 76. Rendimiento de alzadora

**Transporte y descarga de residuo agrícola de cosecha (RAC).**

El transporte consiste en trasladar el RAC desde el campo hasta el ingenio. Las distancias entre campo e ingenio son variables de una a otra, el valor más probable es de 70 km del circuito total, es decir, 35 kilómetros entre campo e ingenio. La velocidad que lleva el tractocamión en full depende directamente del peso de la carga y de las condiciones del camino, ver Tabla 161.

Tabla 161. Capacidad instalada del transporte y acarreo

Concepto	Cantidad	Unidad
Dist. Ingenio-Zona de Abasto	70.00	Kilómetros
Velocidad de Tractocamión	31.67	Km/Hr
T. de Recorrido de Tractocamión	2.21	Horas
T. de carga de Tractocamión	1.33	Horas
Tiempo de ciclo	3.54	Horas
Jornada Laboral	8	Horas
Vueltas al día por Tractocamión	2.26	Vueltas/Día
Holgura (para descarga)	0.26	Vueltas
Vueltas al día por Tractocamión	2.00	Vueltas/Día

En este caso la jornada laboral efectiva no depende directamente del tiempo perdido en campo debido a que el transporte tiene su propia distribución de tiempo perdido, un tractocamión en full

puede dar 2.40 vueltas al día, de las cuales el 0.40 de esas vueltas (1.33 horas) se utilizarían para la descarga del RAC en los ingenios, también considerado algunos tiempos perdidos que se pueden absorber con esta holgura.

La mayor parte de las veces (53.13%) sólo será necesaria utilizar dos tractocamiones con vueltas a full, y solo una parte (15.63%) se necesitarán hasta tres tractocamiones.

### **Recolección de residuo agrícola de cosecha (RAC) con dos turnos.**

Las capacidades para un segundo turno de operación tienen el mismo comportamiento, por lo que para calcular la capacidad del paquete tecnológico sólo se duplicaron estas cantidades, tomando en consideración todas las variables de riesgo e incertidumbre, en la Tabla 162 se aprecian los tiempos de operación.

**Tabla 162. Capacidad instalada de recolección de RAC a dos turnos**

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Duración de Zafra	160	Días
Duración de Zafra	3,840	Horas
Tiempo perdido por lluvias	20	Días
Duración Efectiva (Campo)	140	Días
Duración Efectiva (Campo)	3,360	Horas
Capacidad Instalada (Sin lluvia)	2,120	Has/Zafra
Producción (Por Paq. Tecnológico)	1,792	Has/Zafra
Producción (Por Paq. Tecnológico)	15,454	Ton/Zafra
Producción (Por Paq. Tecnológico)	77,269	Fardos/Zafra
Turnos de Trabajo del Paq. Tecnológico	2	Turno/día
Eficiencia	84.89%	

Como puede notarse, ahora la capacidad de operación sin considerar la lluvia es de 2,120 Has/Zafra y la producción ya considerando este tiempo perdido es de 1,792 Has/Zafra.



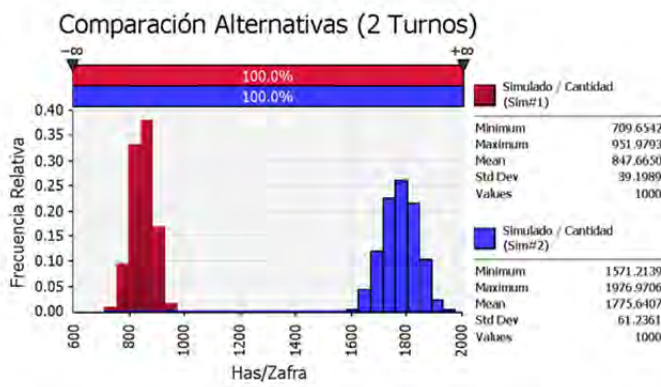


Figura 77. Capacidad de Recolección de RAC en 1 y 2 turnos

El valor esperado de la operación a dos turnos es de 1,785 Has/Turno con lo cual se obtendrían alrededor de 15,454 Ton/Zafra. Esta cantidad también puede variar pues se ha considerado una distribución de los datos como se mostró en el cálculo realizado en el punto de cálculos generales.

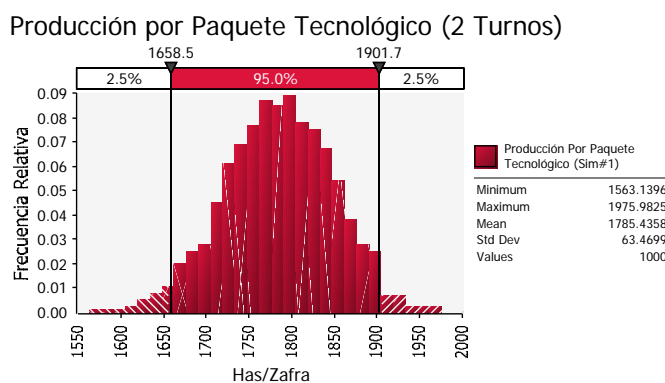


Figura 78. Capacidad de Recolección de RAC en 2 Turnos

Los residuos de la caña de azúcar son una fuente de energía renovable para sustituir energía fósil que se consume en los ingenios azucareros para producir vapor y energía eléctrica, el bagazo de caña es obtenido a 50% de humedad durante la extracción de jugo de caña en el tándem de molinos, y el residuo agrícola de cosecha (RAC) se obtiene durante el proceso de cosecha mecanizada de caña verde en el campo, y los restos que se alojan sobre la superficie, estos residuos son recuperados mecánicamente a través de un sistema logístico de recolección para que puedan llevarse al ingenio azucarero y ser utilizados como biocombustible.

El RAC puede ser preparado, molido y dosificado en mezcla con el bagazo hacia el interior de la caldera con forme vaya llegando al ingenio para sustituir los déficit de bagazo o para mejorar la combustión en las calderas. El bagazo que no fue utilizado o parcialmente sustituido se emplea al

final de la zafra para continuar la cogeneración en el ingenio en no zafra. Para efectos de este trabajo de investigación se propone el uso del RAC para cogeneración en periodo de No zafra, para dar claridad al momento de presentar las evaluaciones y resultados. Es importante señalar que con el uso del Bagazo el ingenio produce la energía térmica y eléctrica suficiente para realizar la zafra.

### 3.3.3. Producción de residuos agrícolas de cosecha y bagazo considerando el inhibidor de rendimiento energético (contenido de humedad)

En la cadena de valor cañero – azucarera la biomasa aprovechable energéticamente es el bagazo y los residuos agrícolas cañeros (RAC), ambos son necesarios para elevar la competitividad energética de un sistema de cogeneración al generar la mayor cantidad de energía posible como sea posible.

El uso de los RAC como combustible depende ante todo de la posibilidad de su recolección y la disponibilidad del RAC en el Campo depende de la cantidad de caña de azúcar que se cosecha por zafra.

#### **1. Cadena de valor Ingenio de Huixtla**

El estimado de recolección para la cadena de valor del ingenio de Huixtla está considerando una capacidad instalada de 1,500,000 toneladas de caña, como se aprecia en la Tabla 163.

Esta investigación propone la utilización del bagazo durante 160 días para generar la energía para mover sus equipos eléctricos al interior para su proceso de elaboración de azúcar y para generar excedentes para la venta, al considerar equipos eficientes de cogeneración queda bagazo al final de la zafra para ser utilizado aun después de haber terminado la zafra y el residuo agrícola de cosecha (RAC) es utilizado después de haberse utilizado la biomasa de bagazo para lograr seguir cogenerando inclusive en periodo de no zafra.

En la Tabla 163 se aprecia que la operación de la cogeneración es durante 160 días con bagazo, después de haber terminado la zafra se sigue generando energía eléctrica durante 29 días con el bagazo que se ahorró en la zafra por efecto de la alta eficiencia del sistema, y se sigue operando por 45 días más después de zafra con la combustión del RAC recolectado y que fue almacenado en el ingenio para utilizarse para continuar la operación a lo largo de 250 días, con 1.5 millones de toneladas de caña cosechada para industrializar para obtener 401 mil toneladas de Bagazo en zafra, 29 mil toneladas de bagazo en no zafra y 229 mil toneladas de cosecha mecanizada de caña en verde para obtener 22 toneladas de RAC en zafra para ser utilizados en no zafra.

Tabla 163. Capacidad instalada de operación en Zafra en Huixtla

Concepto	Bagazo en Zafra	Bagazo en no Zafra	RAC en no Zafra	Unidad
Caña disponible en Zafra	1,500,000	-	-	t caña/zafra
Días de zafra	160	29.6	45.6	días en zafra
Tiempo perdido	8.41%	8.41%	8.41%	% T.P.
Caña por día	9,375	-	-	t caña/día
Capacidad de molienda de caña por día	10,235	-	-	t caña/día efectivo
Capacidad de molienda de caña por hora	426.48	-	-	t caña/h
Bagazo en caña	26.77%	-	-	% bagazo en caña
Biomasa total	401,500	29,470	22,746	t biomasa/zafra
Biomasa p/vapor de proceso	191,028	-	-	t biomasa/zafra
Biomasa p/vapor turbosgener.	210,472	29,470	22,746	t biomasa/zafra

La superficie disponible en Huixtla y más probable para el cultivo de caña es de 17.6 mil hectáreas solo es posible cosechar de forma mecanizada 225 mil toneladas de caña en verde, de los cuales se obtiene un potencial de RAC de 62 mil toneladas que es un 27% de la cosecha de caña mecanizada en verde, el 13% del RAC no se pueden recolectar todas por políticas de sustentabilidad y reincorporación de residuos nuevamente al campo, 5% se fue junto con la caña cosechada y solo el 10% es RAC que será recolectado y utilizado en el ingenio con fines energéticos, ver Tabla 164.

El 5% del RAC aprovechado es producto del rendimiento de recolección del paquete tecnológico que es de 8.5 toneladas de RAC recolectado por hectárea.

Tabla 164. Disponibilidad de RAC para Huixtla en el año 4 (el más probable)

Concepto	Cantidad	Unidad
Área Disponible	17,647	Has
Rendimiento de t caña / ha	85.00	t caña/ha
Caña Disponible	1,500,000.00	t caña
Área Disponible Mecanizada en verde	2,649	Has

Rendimiento de t caña / ha	85.00	t caña/ha
Caña Disponible Mecanizada en verde	225,196.88	t caña/zafra
Residuos RAC de Cosecha	27.667%	% Residuo de Cosecha RAC
Rendimiento de t residuos/ ha	62,304.47	t residuos RAC/zafra
Residuos RAC se queda en Campo	13.351%	% Residuo en campo
Residuos RAC llega al ingenio	5.000%	% Residuo en campo
Residuos RAC Recolectado-Utilizado	10.101%	% Residuo recolectado
t Residuos RAC se queda en Campo	30,065.35	t residuos RAC/zafra
t Residuos RAC llega al ingenio	11,259.84	t residuos RAC/zafra
t Residuos RAC Recolectado-Utilizado	22,746.33	t residuos RAC/zafra
Rendimiento de RAC por Ha	8.59	t Residuos RAC/ha

Se efectúa un flujo de recolección de RAC y de bagazo disponibles basados en la planeación estratégica de la cadena de valor en Huixtla, en la Tabla 165 se encuentra la biomasa disponible en diferentes periodos.

**Tabla 165. Programa de caña de azúcar en la cadena de valor de ingenio de Huixtla**

Año	Zafra	Ton Caña	Has Totales	Bagazo	Ton Caña Mecanizado en Verde	Has Mecanizada en Verde	RAC Total en No Zafra
0	2014/15	1,300,000	15,854	347,967	121,067	1,476	33,495
1	2015/16	1,343,017	15,800	359,481	153,000	1,800	42,330
2	2016/17	1,400,000	16,471	374,733	178,500	2,100	49,385
3	2017/18	1,450,000	17,059	388,117	195,500	2,300	54,088
4	2018/19	1,500,000	17,647	401,500	229,500	2,700	63,495
5	2019/20	1,550,000	18,235	414,883	263,500	3,100	72,902
6	2020/21	1,550,000	18,235	414,883	263,500	3,100	72,902
7	2021/22	1,550,000	18,235	414,883	263,500	3,100	72,902
8	2022/23	1,550,000	18,235	414,883	263,500	3,100	72,902
9	2023/24	1,550,000	18,235	414,883	263,500	3,100	72,902
10	2024/25	1,550,000	18,235	414,883	263,500	3,100	72,902

En la Tabla 166 se encuentra la biomasa disponible después del efecto de la lluvia que deteriora el RAC y no debe ser considerado con fines energéticos, es decir que la lluvia ocasiona una merma de RAC.

**Tabla 166. Biomasa disponible en la cadena de valor de Ingenio de Huixtla**

<b>Año</b>	<b>Zafra</b>	<b>Ton Caña</b>	<b>Bagazo en Zafra (p/elaboración)</b>	<b>Bagazo en Zafra</b>	<b>Bagazo en No Zafra</b>	<b>RAC en No Zafra incluye lluvia</b>
0	2014/15	1,300,000	140,017	182,409	25,541	12,439.84
1	2015/16	1,343,017	144,650	188,445	26,386	15,166.15
2	2016/17	1,400,000	150,787	196,441	27,505	17,693.84
3	2017/18	1,450,000	156,173	203,456	28,488	19,378.97
4	2018/19	1,500,000	161,558	210,472	29,470	22,749.23
5	2019/20	1,550,000	166,943	217,488	30,452	26,119.48
6	2020/21	1,550,000	166,943	217,488	30,452	26,119.48
7	2021/22	1,550,000	166,943	217,488	30,452	26,119.48
8	2022/23	1,550,000	166,943	217,488	30,452	26,119.48
9	2023/24	1,550,000	166,943	217,488	30,452	26,119.48
10	2024/25	1,550,000	166,943	217,488	30,452	26,119.48

## **2. Cadena de valor Ingenio San Pedro**

La cadena de valor cañero – azucarera en San Pedro tiene una molienda de 1.6 millones de toneladas de caña en un periodo de 160 días, más 33 días de bagazo sobrante para utilizarlo en no zafra y de 45 días de generación adicional utilizando RAC en no zafra, para operar un total de 238 días al año, ver Tabla 167.

De las 470 mil toneladas de bagazo obtenidas en la zafra, se utilizan 224 mil toneladas para generar vapor para el proceso de azúcar, y 246 mil toneladas para generar el vapor de alta presión que va a los turbogeneradores para la generación eléctrica.

Tabla 167. Capacidad instalada de operación en Zafra en San Pedro

Concepto	Bagazo en Zafra	Bagazo en no Zafra	RAC en no Zafra	Unidad
Caña disponible en Zafra	1,600,000	-	-	t caña/zafra
Días de zafra	160	33	45.5	días en zafra
Tiempo perdido	8.41%	8.41%	8.41%	% T.P.
Caña por día	10,000	-	-	t caña/día
Capacidad de molienda de caña por día	10,918	-	-	t caña/día efectivo
Capacidad de molienda de caña por hora	454.91	-	-	t caña/h
Bagazo en caña	29.43%	-	-	% bagazo en caña
Biomasa total	470,933	38,383	26,718	t biomasa/zafra
Biomasa p/vapor de proceso	224,050	-	-	t biomasa/zafra
Biomasa p/vapor turbosgener.	246,883	38,383	26,718	t biomasa/zafra

El escenario más probable es la utilización de 1,7 millones de toneladas de caña de las cuales se obtienen 264 mil toneladas de caña cosechada en verde obteniendo un disponible de hasta 73 mil toneladas de RAC disponibles de los cuales el 5% se fue junto con la caña cosechada y solo el 10% es RAC que será recolectado equivalente a 26 mil toneladas de RAC, ver Tabla 168.

Tabla 168. Disponibilidad de RAC para San Pedro en el año 4 (el más probable)

Concepto	Cantidad	Unidad
Área Disponible	20,000	Has
Rendimiento de t caña / ha	85.00	t caña/ha
Caña Disponible	1,700,000.00	t caña
Área Disponible Mecanizada verde	3,111	Has
Rendimiento de t caña / ha	85.00	t caña/ha
Caña Disponible Mecanizada verde	264,403.13	t caña/zafra
Residuos RAC de Cosecha	27.67%	% Residuo de Cosecha RAC
Rendimiento de t residuos/ ha	73,151.53	t residuos RAC/zafra

Residuos RAC se queda en Campo	11.557%	% Residuo en campo
Residuos RAC llega al ingenio	5.00%	% Residuo en campo
Residuos RAC Recolectado-Utilizado	10.105%	% Residuo recolectado
t Residuos RAC se queda en Campo	30,557.20	t residuos RAC/zafra
t Residuos RAC llega al ingenio	13,220.16	t residuos RAC/zafra
t Residuos RAC Recolectado-Utilizado	26,718.71	t residuos RAC/zafra
Rendimiento de RAC por Ha	8.59	t Residuos RAC/ha

El flujo de toneladas de caña, toneladas de caña mecanizada en verde, de toneladas de residuos agrícolas de caña con sus hectáreas correspondientes se presentan en la Tabla 169.

**Tabla 169. Programa de caña de azúcar en la cadena de valor de ingenio San Pedro**

<b>Año</b>	<b>Zafra</b>	<b>Ton Caña</b>	<b>Has Totales</b>	<b>Bagazo</b>	<b>Ton Caña Mecanizado en Verde</b>	<b>Has Mecanizadas en Verde</b>	<b>RAC Total en No Zafra</b>
0	2014/15	1,300,000	20,000	382,633	168,306	2,623	46,565
1	2015/16	1,400,000	20,000	412,067	206,964	2,933	57,260
2	2016/17	1,500,000	20,003	441,500	250,889	3,245	69,413
3	2017/18	1,600,000	20,005	470,933	295,404	3,555	81,728
4	2018/19	1,700,000	20,000	500,367	308,336	3,555	85,306
5	2019/20	1,700,000	20,000	500,367	308,336	3,555	85,306
6	2020/21	1,700,000	20,000	500,367	308,336	3,555	85,306
7	2021/22	1,700,000	20,000	500,367	308,336	3,555	85,306
8	2022/23	1,700,000	20,000	500,367	308,336	3,555	85,306
9	2023/24	1,700,000	20,000	500,367	308,336	3,555	85,306
10	2024/25	1,700,000	20,000	500,367	308,336	3,555	85,306

Se efectúa un balance de materia para ser utilizado en la elaboración de azúcar y para la generación eléctrica en zafra y no zafra, también se determina la merma de RAC ocasionada por la lluvia, ver Tabla 170.

Tabla 170. Biomasa disponible en la cadena de valor de Ingenio San Pedro

Año	Zafra	Ton Caña	Bagazo en Zafra (p/elaboración)	Bagazo en Zafra	Bagazo en No Zafra	RAC en No Zafra incluye lluvia
0	2014/15	1,300,000	150,855	200,592	31,186	19,704.36
1	2015/16	1,400,000	162,459	216,022	33,585	22,037.06
2	2016/17	1,500,000	174,063	231,452	35,984	24,380.69
3	2017/18	1,600,000	185,668	246,883	38,383	26,709.81
4	2018/19	1,700,000	197,272	262,313	40,782	26,709.81
5	2019/20	1,700,000	197,272	262,313	40,782	26,709.81
6	2020/21	1,700,000	197,272	262,313	40,782	26,709.81
7	2021/22	1,700,000	197,272	262,313	40,782	26,709.81
8	2022/23	1,700,000	197,272	262,313	40,782	26,709.81
9	2023/24	1,700,000	197,272	262,313	40,782	26,709.81
10	2024/25	1,700,000	197,272	262,313	40,782	26,709.81



### 3. Cadena de valor Ingenio Santa Clara

La cadena de valor en Michoacán es la que tienen el menor volumen de biomasa, tiene una molienda de 0.75 millones de toneladas de caña para un periodo de 160 días, un periodo de 33 días después de zafra con bagazo y de 70 días para usar RAC después de zafra, ver Tabla 171.

**Tabla 171. Capacidad instalada de operación en Zafra en Santa Clara**

Concepto	Bagazo en Zafra	Bagazo en no Zafra	RAC en no Zafra	Unidad
Caña disponible en Zafra	750,000	-	-	t caña/zafra
Días de zafra	160	33	70	días en zafra
Tiempo perdido	8.41%	8.41%	8.41%	% T.P.
Caña por día	4,688	-	-	t caña/día
Capacidad de molienda de caña por día	5,118	-	-	t caña/día efectivo
Capacidad de molienda de caña por hora	213.24	-	-	t caña/h
Bagazo en caña	29.87%	-	-	% bagazo en caña
Biomasa total	224,000	18,257	19,683	t biomasa/zafra
Biomasa p/vapor de proceso	106,570	-	-	t biomasa/zafra
Biomasa p/vapor turbosgener.	117,430	18,257	19,683	t biomasa/zafra

Se utilizan 19.6 mil toneladas de RAC para ser utilizados en el ingenio con un rendimiento de 8.5 toneladas de RAC por hectárea, ver Tabla 172.

**Tabla 172. Disponibilidad de RAC para Santa Clara en el año 4 (el más probable)**

Concepto	Cantidad	Unidad
Área Disponible	7,500	Has
Rendimiento de t caña / ha	100.00	t caña/ha
Caña Disponible	750,000.00	t caña
Área Disponible Mecanizada verde	2,291	Has
Rendimiento de t caña / ha	100.00	t caña/ha

Caña Disponible mecanizada verde	229,147.93	t caña/zafra
Residuos RAC de Cosecha	27.67%	% Residuo de Cosecha RAC
Rendimiento de t residuos/ zafra	63,397.59	t residuos RAC/zafra
Residuos RAC se queda en Campo	11.517%	% Residuo en campo
Residuos RAC llega al ingenio	5.00%	% Residuo en campo
Residuos RAC Recolectado-Utilizado	8.59%	% Residuo recolectado
t Residuos RAC se queda en Campo	26,391.08	t residuos RAC/zafra
t Residuos RAC llega al ingenio	11,457.40	t residuos RAC/zafra
t Residuos RAC Recolectado-Utilizado	19,683.81	t residuos RAC/zafra
Rendimiento de RAC por Ha	8.59	t Residuos RAC/ha

En la Tabla 173 se presenta un flujo de biomasa de acuerdo al plan estratégico de crecimiento de la cadena de valor en Santa Clara.

**Tabla 173. Programa de caña de azúcar en la cadena de valor de ingenio Santa Clara**

Año	Zafra	Ton Caña	Has Totales	Bagazo	Ton Caña Mecanizado en Verde	Has Mecanizadas en Verde	RAC Total en No Zafra
0	2014/15	710,000	7,136	212,053	218,872	2,200	60,555
1	2015/16	720,000	7,200	215,040	216,541	2,165	59,910
2	2016/17	730,000	7,300	218,027	225,441	2,254	62,372
3	2017/18	740,000	7,400	221,013	235,942	2,359	65,277
4	2018/19	750,000	7,500	224,000	242,806	2,428	67,176
5	2019/20	775,000	7,750	231,467	250,899	2,509	69,415
6	2020/21	800,000	8,000	238,933	257,143	2,571	71,143
7	2021/22	800,000	8,000	238,933	257,143	2,571	71,143
8	2022/23	800,000	8,000	238,933	257,143	2,571	71,143
9	2023/24	800,000	8,000	238,933	257,143	2,571	71,143
10	2024/25	800,000	8,000	238,933	257,143	2,571	71,143

En la Tabla 174 se efectúa el balance de biomasa considerando el efecto de la lluvia que afecta a la recolección de RAC.

Tabla 174. Biomasa disponible en la cadena de valor de Ingenio Santa Clara

<b>Año</b>	<b>Zafra</b>	<b>Ton Caña</b>	<b>Bagazo en Zafra (p/elaboración)</b>	<b>Bagazo en Zafra</b>	<b>Bagazo en No Zafra</b>	<b>RAC en No Zafra incluye lluvia</b>
0	2014/15	710,000	83,603	111,167	17,283	17,825.74
1	2015/16	720,000	84,781	112,733	17,527	17,547.73
2	2016/17	730,000	85,958	114,299	17,770	18,268.94
3	2017/18	740,000	87,136	115,864	18,013	19,119.89
4	2018/19	750,000	88,313	117,430	18,257	19,676.11
5	2019/20	775,000	91,257	121,344	18,865	20,331.98
6	2020/21	800,000	94,201	125,259	19,474	20,837.93
7	2021/22	800,000	94,201	125,259	19,474	20,837.93
8	2022/23	800,000	94,201	125,259	19,474	20,837.93
9	2023/24	800,000	94,201	125,259	19,474	20,837.93
10	2024/25	800,000	94,201	125,259	19,474	20,837.93

### 3.3.4. Balance de materia y energía utilizando combustión.

Para desarrollar el balance y la conversión de materia a energía se utilizan ecuaciones de Mollier y de Regnault para determinar los valores más probables de la entalpía del vapor y de calor latente de vaporización, ver la sección de anexos 2.2.1 Calculo del poder calorífico de la biomasa. Se utilizan los resultados de poder calorífico de las muestras de residuos agrícolas de cosecha y bagazo obtenidas en el laboratorio.

Las muestras de los residuos de RAC fueron reducidas de tamaño a través de un molino eléctrico de cuchillas y se utilizó un tamiz malla 40 para obtener un tamaño de partícula menor a 0.42 mm.



**Imagen 53. Preparación de las muestras de RAC**

Los análisis químico utilizan la metodología ASTM (American Section of the International Association for Testing Materials) a partir de 4 muestras de residuo agrícola de cosecha de caña (RAC) con el 8% de contenido de humedad fueron evaluadas para determinar su poder calorífico con un calorímetro automático isoperbólico modelo Parr 6400, también realizado en colaboración del laboratorio de investigación en química del Instituto Tecnológico de Orizaba.

Los resultados del análisis próximo de las muestras se ubican en la Tabla 175 e indican que el RAC en base seca contiene más de 82.9% de materia volátil y 7.5% de cenizas (Alvarado-García, 2013), esto favorece su combustión por su alto contenido de materia volátil y un bajo contenido de ceniza.

**Tabla 175. Resultados de análisis elemental y próximo del residuo agrícola de cosecha (RAC).**

<b>Humedad</b>	<b>Cenizas</b>	<b>Material Volátil</b>	<b>Carbón Fijo</b>
8.54% ± 0.11% DS	7.56% ± 0.18% DS	82.98% ± 0.04 DS	0.92% ± 0.25 DS
ASTM D2867-99	ASTM E1755-01	ASTMD2866-83	Por diferencia
<b>% C</b>	<b>% H</b>	<b>% O</b>	
38.34%	5.19%	39.77%	

\* DS = Desviación estándar

Los resultados del poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) de las muestras de RAC en base seca de las muestras (ver Tabla 176), el PCI que es el valor más probable de ocurrir cuando la biomasa sea aplicada en calderas industriales de alta presión de lecho fluido, por el efecto en la fluctuación no controlada en el contenido de humedad en el RAC. La definición de los diferentes niveles de poder calorífico se encuentra en la sección de anexos 2.2.1 Calculo del poder calorífico de la biomasa

**Tabla 176. Muestras de poder calorífico en la RAC base seca**

<b>Poder calorífico en kcal/kg de RAC base seca</b>						
<b>RAC</b>	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>	<b>Muestra 4</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desv. Est.</b>
P.C.S. al 8% Húm.	3,962.38	3,950.10	3,936.51	4,020.87	3,967.47	± 31.05
Medio al 8% Húm.	3,687.64	3,676.21	3,663.57	3,742.08	3,692.37	± 34.56
P.C.I. al 8% Húm.	3,412.90	3,402.33	3,390.62	3,463.28	3,417.28	± 35.82

Los resultados del poder calorífico del RAC combustionado en condiciones estándar, presenta un enorme potencial para ser usado energéticamente, al ser el RAC un derivado de la caña al igual que el bagazo, el poder calorífico del bagazo tienen el mismo poder calorífico que el RAC en las mismas condiciones de contenido de humedad, es diferente cuando la humedad es distinta en cada uno de ellos.

Se presenta la composición elemental del RAC con el 8% de humedad proveniente de los resultados de laboratorio ver la Tabla 177 y se proyecta el comportamiento elemental del RAC con el 20% de humedad, y en la Tabla 178 el del bagazo con el 50% de humedad.

Tabla 177. Composición elemental del RAC base seca

<b>Composición del RAC base seca</b>	<b>Volumen RAC Base Seca al 8%</b>	<b>Volumen de RAC al 20%</b>
C =	38.34%	33.42%
H =	5.19%	4.53%
O <sub>2</sub> =	39.78%	34.67%
Cenizas =	7.56%	6.59%
Carbón Fijo =	0.92%	0.8%
Sub-total =	91.79%	80.0%
Humedad de la Muestra al 8% =	8.21%	20.0%
Total =	100.00%	100.00%

Tabla 178. Composición elemental del Bagazo base seca

<b>Composición del Bagazo base seca</b>	<b>Volumen Bagazo Base Seca al 8%</b>	<b>Volumen de Bagazo al 50%</b>
C =	38.34%	20.56%
H =	5.19%	2.78%
O <sub>2</sub> =	39.78%	21.33%
Cenizas =	7.56%	4.05%
Carbón Fijo =	0.92%	0.49%
Sub-total =	91.79%	49.21%
Humedad de la Muestra al 8% =	8.21%	50.79%
Total =	100.00%	100.00%

Se aplican las ecuaciones de la sección de anexos 2.2.1. Cálculo del poder calorífico de la biomasa a diferente contenido de humedad del RAC y del Bagazo para proyectar el poder calorífico superior (alto), inferior (bajo) y medio.

Para efectos de evaluación se utiliza el poder calorífico medio para el Bagazo y bajo para el RAC porque recomendaciones del especialista energético que indica que el Bagazo es más noble para combustionarlo por el alto contenido de materia volátil que tiene, y porque ya está comprobada su efectividad, y el RAC es bajo por ser un proceso nuevo que se va a incorporar al sistema.

Este es un escenario conservador, si en la práctica resultaran valores más altos de poder calórico afectados por el comportamiento de la humedad en el RAC o el Bagazo se beneficiaría aún más el proyecto.

Este escenario conservador utiliza el poder calórico medio para dar expectativas razonables de producción de energía sin que se ponga en riesgo la rentabilidad del mismo, en la Tabla 179 se muestran estos valores.

**Tabla 179. Comportamiento del poder calórico de la RAC y Bagazo**

<b>Concepto</b>	<b>RAC al 20%</b>	<b>Bagazo al 50%</b>	<b>Unidad</b>
Contenido de humedad en la biomasa	20.00%	50.79%	% de Humedad
Valor calórico alto base seca	16.64	16.64	MJ/kg
1Mj a kcal	238.8	238.8	kcal/MJ
Valor calórico alto base seca al 8%	3,974.9	3,974.9	kcal/kg
Valor calórico alto de biomasa húmeda	3,179.9	1,956.1	kcal/kg
Valor calórico medio de biomasa húmeda	3,119.9	1,734.7	kcal/kg
Valor calórico bajo de biomasa húmeda	3,059.9	1513.3	kcal/kg
Escenario Calórico de la biomasa	bajo	Medio	

Con este valor calórico se diseña la caldera de alta presión, se determinan los parámetros de operación y capacidad de generación de vapor, en la Tabla 180 se presentan las características de operación.

**Tabla 180. Diseño de la caldera de alta presión para combustión del Bagazo**

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Eficiencia de la caldera moderna con calentador de aire y economizador	83.00%	% eficiencia
Presión del vapor	63.30	kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura del vapor	475.00	°C
Entalpía de la temperatura del vapor	802.28	kcal/kg
Presión agua alimentar	24.00	kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura agua alim.	155.00	°C

Entalpía de la temperatura del agua de alimentación	156.39	kcal/kg
Salto de entalpía	645.89	kcal/kg

La eficiencia de generación de vapor en la caldera es de 83% afectado por la calidad del RAC y del Bagazo derivados de la humedad derivado de los picos y valles de generación de vapor en la caldera. Las entalpías de entrada y de salida provienen de las ecuaciones de Mollier.

En este punto es importante mencionar que la planta de cogeneración en las cadenas de valor cañero–azucarera tienen distintos rendimientos en diferentes periodos de operación.

El bagazo utilizado en zafra tiene un rendimiento de producción de 2.2 kilos de vapor por cada kilo de bagazo, en no zafra tiene 1.9 kilos de vapor por cada kilo de bagazo y el RAC utilizado en no zafra 3.8 kilos de vapor por cada kilogramo de RAC. Ver la Tabla 181 para ver los índices de consumo de vapor para producir energía eléctrica.

Las distribuciones de probabilidad utilizadas para determinar los índices se presentan en la sección de anexos 2.1.3

**Tabla 181. Balance de materia y energía usando Bagazo y RAC como combustible**

<b>Concepto</b>	<b>Bagazo al 50% hum. en Zafra</b>	<b>Bagazo al 50% hum. en No Zafra</b>	<b>RAC al 20% de hum. en No Zafra</b>	<b>Unidad</b>
Producción de vapor	2.20	1.90	3.80	kg vapor/kg biomasa
Consumo de vapor (0% extracción y 100% condensación)	-	4.00	4.00	kg vapor/kWh
Consumo de vapor (al 80% de extracción y 20% condensación)	6.00	-	-	kg vapor/kWh
1 kg vapor consume:	0.4545	0.5263	0.2631	kg biomasa/kg vapor
1 kg vapor produce:	-	0.25	0.25	kWh/kg vapor
1 kg vapor produce:	0.1666	-	-	kWh/kg vapor



Para diseñar la capacidad de la caldera de alta presión y los dos turbogeneradores de contrapresión y condensación ambos con extracción que se deben comprar se debe realizar un estimado de generación de energía considerando las 3.8 millones de toneladas de caña de las cuales 1.5 millones son en Huixtla para obtener 401 mil toneladas de bagazo, 1.6 millones de toneladas de caña en San Pedro para obtener 470 mil toneladas de bagazo y de 0.75 millones de toneladas de caña en Santa Clara para obtener 224 mil toneladas de bagazo, ver Tabla 182.

**Tabla 182. Demanda de biomasa para determinar el flujo de vapor y diseño de caldera por cadena de valor.**

<b>Concepto</b>	<b>Cadena de Valor Huixtla</b>	<b>Cadena de valor San Pedro</b>	<b>Cadena de Valor Santa Clara</b>	<b>Unidad</b>
Toneladas de caña para el diseño de caldera y turbogen.	1,500,000	1,600,000	750,000	Ton caña/zafra
% bagazo en Caña	26.77%	29.43%	29.87%	% bagazo/ton Caña
Bagazo disponible anual	401,500	470,933	224,000	ton/zafra
Horas de operación por zafra	3,517	3,517	3,517	Horas por zafra
Bagazo a combustionar por hora	114.15	133.89	63.69	Ton bagazo/h
Energía liberada por hora	198,021,540	232,226,360	110,477,771	kcal/hr
Vapor producido por hora	254,467	298,473	148,882	Kilos vapor/hora
Vapor producido por hora neto	254.4	298.4	148.8	Ton vapor/hora
Índice de Seguridad para cubrir picos de generación en la caldera	35.00%	35%	35%	% seguridad en Capacidad Instalada.
Diseño de caldera	343.53	402.94	200.99	Ton vapor/h
% vapor para proceso (Autoconsumo)	40.24%	39.43%	39.43%	% Vapor para proceso
Vapor neto para proceso (Autoconsumo)	121 a 122.8	142 a 143.9	70.8 a 75.35	Ton vapor/h
Vapor neto para turbogeneradores (para generación eléctrica)	131.6 a 133.4	154.4 a 156.4	73.45 a 78.0	Ton vapor/h

El diseño de la caldera se debe cubrir de los picos de vapor generados con un índice de seguridad del 35% para tener una holgura en la producción de vapor cuando la pollinaza tenga mejora calidad

o se encuentre más seca, para el caso de la cadena de valor de Huixtla se debe adquirir una caldera de 343 ton de vapor por hora, para San Pedro una caldera de 402 toneladas de vapor por hora y para santa clara una caldera de 200 toneladas de vapor por hora.

Para el diseño de los turbogeneradores modernos a comprar se debe considerar solo el flujo de vapor para generar electricidad, y restar el vapor que se utiliza para el proceso de elaboración de azúcar, ver la Tabla 183.

**Tabla 183. Consumo de vapor para el diseño del turbogenerador por cadena de valor.**

<b>Concepto</b>	<b>Cadena de Valor Huixtla</b>	<b>Cadena de valor San Pedro</b>	<b>Cadena de Valor Santa Clara</b>	<b>Unidad</b>
Vapor enviado a Turbogeneradores	52.42%	52.42%	52.42%	% de Vapor a Turbogeneradores
Vapor enviado a Turbogeneradores	133.4	156.47	78.05	Ton vapor/hr
Consumo específico en zafra	6	6	6	Ton vapor/MWh
Energía a producir	22.23	26.08	13.01	MWh
% de aprovechamiento del turbo	92.33%	92.33%	92.33%	%
Capacidad del turbo a comprar	24.08	28.24	14.09	MWh

Si el consumo de vapor del turbogenerador disminuye después de zafra a 4 toneladas de vapor por hora al no requerir vapor para autoconsumo para el proceso de elaboración de azúcar, no se debe comprar un turbogenerador de mayor tamaño, lo que se hace es disminuir la dosificación de biomasa a combustionar en la caldera para reducir el flujo de vapor y en consecuencia el periodo de generación se alarga.

El balance de materia y energía de la cadena de valor en el Ingenio de Huixtla para los tres periodos de operación se encuentran en la Tabla 184. La oferta de bagazo es de 114.15 toneladas por hora, de las cuales se ocupan 105.7 toneladas en zafra, 45.9 toneladas de bagazo por hora se utilizan para producir vapor que requiere el proceso de elaboración de azúcar, este vapor no es utilizado por los turbogeneradores porque se va directo a proceso, solo 59.84 toneladas de vapor se van a los turbogeneradores para producir la energía eléctrica, la diferencia de 8.37 toneladas de bagazo por

hora que sobran se van acumulando durante 3,517 hr. que dura la zafra para ser utilizado en no zafra durante 722 hr por este motivo se incrementa a 45.28 toneladas de vapor por hora en no zafra.

**Tabla 184. Balance de materia y energía en la cadena de valor Huixtla.**

<b>Cadena de valor Ingenio de Huixtla</b>	<b>Bagazo al 50% hum. en zafra</b>	<b>Bagazo al 50% hum. en no zafra</b>	<b>RAC al 20% hum. en no zafra</b>	<b>unidad</b>
Biomasa Disponible	105.77	45.28	22.66	t de biomasa/hr
Biomasa para proceso de azúcar	45.9	-	-	t de biomasa/hr
Biomasa para generación eléctrica	59.84	45.28	22.66	t de biomasa/hr
Vapor total producido	232.70	86.03	86.11	t de vapor/hr
% de Autoconsumo de vapor	40.24%	-	-	t de vapor/hr
Autoconsumo de vapor p/proceso	101.05	-	-	t de vapor/hr
Vapor para Turbogeneradores	131.65	86.03	86.11	t de vapor/hr
Perdida de Vapor	2.02%	-	-	% Perdida de vapor
Generación de vapor neto	128.99	86.03	86.11	t de vapor/hr
Generación eléctrica	21.5	21.51	21.53	MWh
% de Autoconsumo eléctrico	46.51%	10%	10%	MWh
Autoconsumo eléctrico	10.00	2.15	2.15	MWh
Excedentes eléctricos para la venta	11.50	19.36	19.37	MWh

El balance de materia y energía de la cadena de valor Ingenio San Pedro para los tres periodos de operación se encuentran en la Tabla 185, la oferta de bagazo es de 133.89 toneladas por hora, de las cuales se ocupan 122.98 toneladas en zafra, 52.79 toneladas de bagazo por hora se utilizan para producir vapor que requiere el proceso de elaboración de azúcar este vapor no es utilizado por los turbogeneradores porque se va directo a proceso, solo 70.19 toneladas de vapor se van a los turbogeneradores para producir la energía eléctrica, la diferencia de 8.37 toneladas de bagazo por hora que sobra y se va acumulando durante 3,517 hr. que dura la zafra para ser utilizado en no zafra durante 722 hr por este motivo se incrementa a 53.19 toneladas de vapor por hora en no zafra.

Tabla 185. Balance de materia y energía en la cadena de valor San Pedro.

<b>Cadena de valor Ingenio San Pedro</b>	<b>Bagazo al 50% hum. en zafra</b>	<b>Bagazo al 50% hum. en no zafra</b>	<b>RAC al 20% hum. en no zafra</b>	<b>unidad</b>
Biomasa Disponible	122.98	53.19	26.71	t de biomasa/hr
Biomasa para proceso de azúcar	52.79	-	-	t de biomasa/hr
Biomasa para generación eléctrica	70.19	53.19	26.71	t de biomasa/hr
Vapor total producido	270.56	101.07	101.52	t de vapor/hr
% de Autoconsumo de vapor	39.43%	-	-	t de vapor/hr
Autoconsumo de vapor p/proceso	116.14	-	-	t de vapor/hr
Vapor para Turbogeneradores	154.43	101.07	101.52	t de vapor/hr
Perdida de Vapor	2.02%	-	-	% Perdida de vapor
Generación de vapor neto	151.30	101.07	101.52	t de vapor/hr
Generación eléctrica	25.22	25.27	25.38	MWh
% de Autoconsumo eléctrico	46.51%	10%	10%	MWh
Autoconsumo eléctrico	11.73	2.53	2.54	MWh
Excedentes eléctricos para la venta	13.49	22.74	22.84	MWh

El balance de materia y energía de la cadena de valor en el Ingenio Santa Clara para los tres periodos de operación se encuentran en la Tabla 186. La oferta de bagazo es de 63.69 toneladas por hora, de las cuales se ocupan 58.50 toneladas en zafra, 25.11 toneladas de bagazo por hora se utilizan para producir vapor que requiere el proceso de elaboración de azúcar, este vapor no es utilizado por los turbogeneradores porque se va directo a proceso, solo 33.39 toneladas de vapor se van a los turbogeneradores para producir la energía eléctrica, la diferencia de 5.19 toneladas de bagazo por hora que sobran y se van acumulando durante 3,517 hr. que dura la zafra para ser utilizado en no zafra durante 722 hr por este motivo se incrementa a 25.30 toneladas de vapor por hora en no zafra.

Tabla 186. Balance de materia y energía en la cadena de valor Santa Clara.

<b>Cadena de valor Ingenio Santa Clara</b>	<b>Bagazo al 50% hum. en zafra</b>	<b>Bagazo al 50% hum. en no zafra</b>	<b>RAC al 20% hum. en no zafra</b>	<b>unidad</b>
Biomasa Disponible	58.50	25.30	12.75	t de biomasa/hr
Biomasa para proceso de azúcar	25.11	-	-	t de biomasa/hr
Biomasa para generación eléctrica	33.39	25.30	12.75	t de biomasa/hr
Vapor total producido	128.69	48.07	48.43	t de vapor/hr
% de Autoconsumo de vapor	39.43%	-	-	t de vapor/hr
Autoconsumo de vapor p/proceso	55.24	-	-	t de vapor/hr
Vapor para Turbogeneradores	73.45	48.07	48.43	t de vapor/hr
Perdida de Vapor	2.02%	-	-	% Perdida de vapor
Generación de vapor neto	71.97	48.07	48.43	t de vapor/hr
Generación eléctrica	11.99	12.02	12.11	MWh
% de Autoconsumo eléctrico	46.51%	10%	10%	MWh
Autoconsumo eléctrico	5.58	1.20	1.21	MWh
Excedentes eléctricos para la venta	6.42	10.82	10.9	MWh

### **Fundamentos técnicos para desarrollar la Cogeneración.**

Para definir las condiciones que nos permitan generar por medio de cogeneración la máxima cantidad de energía a partir del bagazo o RAC disponible es importante establecer algunos conceptos teóricos aplicables a la cogeneración, y en ese sentido puede ser útil el comenzar estableciendo lo que no es cogeneración.

La generación de energía eléctrica en plantas térmicas convencionales no es un proceso particularmente eficiente, sin importar el combustible (petróleo, carbón, gas natural, biomasa, etc.) que se utilice. En los términos más sencillos posibles, dicha planta térmica convencional consiste de la caldera, el turbo-generador (condensante) y la torre de enfriamiento que suministra el agua al condensador.

El problema radica en que la mayor parte de la energía utilizada en la caldera se emplea en aumentar la temperatura del agua y convertir el agua a vapor, y no en levantar la presión y temperatura de dicho vapor. Por lo tanto, la mayor parte de dicha energía no es recuperable en la turbina, sino que es descargada al condensador y eventualmente desechada a la atmósfera en la torre de enfriamiento. Como resultado, la eficiencia del ciclo (utilizando un combustible fibroso de relativamente alta humedad como el bagazo o RAC) es solo del orden de 20 – 25 % porque no se hace uso de la mayor parte del calor latente en el vapor.

De ser posible utilizar en el proceso el calor (baja presión y temperatura) descargado al condensador (en la planta térmica convencional) el ciclo se hace mucho más eficiente, del orden de 50 – 55 %, eso se logra con la cogeneración.

Por lo tanto, la cogeneración en sí no radica en el uso del bagazo o RAC como combustible. Por ejemplo, en la industria azucarera de remolacha se cogenera a pesar de utilizarse un combustible fósil. Igualmente, un ingenio azucarero de caña quemando “exceso” de bagazo o RAC (en zafra o “fuera de zafra”) y generando en un turbo-generador totalmente condensante no está cogenerando. Esa última modalidad de generación no es eficiente como la Cogeneración, como se indica anteriormente, y se hace práctica y económica solo porque el combustible (exceso de bagazo) es “gratis” y se está utilizando capacidad instalada (caldera, turbina, etc.) que de otra forma estaría ociosa.

Los sistemas de solo generación con biomasa, el vapor de baja presión no tiene otros usos solo se condensa, en comparación de la cogeneración que se utiliza para producir azúcar (u otros productos) usando el vapor en los evaporadores y condensadores.

Entonces podemos definir a la generación utilizando biomasa es una central termoeléctrica que genera energía eléctrica a partir de la energía liberada en forma de calor proveniente de la combustión de combustibles fósiles como petróleo, gas natural, carbón, o de la disponibilidad de biomasa de tipo agroindustrial. Este calor es empleado por un ciclo termodinámico convencional para mover un alternador y producir energía eléctrica.

El sistema de Cogeneración con RAC y Bagazo en periodo de no zafra su funcionamiento es solo Generación, porque ya no hay azúcar que producir.

### **Características del sistema de cogeneración.**

Las condiciones (P/T) del vapor (considerando aspectos tales como el potencial de energía a ser generado; la calidad de agua de alimentación requerida; el monto relativo de la inversión de capital, etc.): 60 kg/cm<sup>2</sup> (850 psi) y 475 grados CTT (890 FTT) a la salida del sobrecalentado.

El tipo de horno de la caldera acuotubular de lecho fluidizado (parrilla viajera) de diseño moderno, la caldera debe tener una capacidad de caldera de entre 150 y 165 toneladas de vapor por hora (de 300,000 a 330,000 lb/hr), capacidad MCR (capacidad continua máxima), con certificación ASME, completa con horno inclinado tipo “pinholes” o parrilla viajera; equipo de recuperación de calor (economizador; pre-calentador de aire); colector mecánico multi-ciclonico; refractarios y aislamiento; ventiladores de tiro inducido, tiro forzado, aire sobrecalentado, esparcidor de bagazo; alimentadores de bagazo, sistema completo de controles automáticos e instrumentación, conductos de aire y de gas, plataformas y escaleras, chimenea, completa con todos sus accesorios y sistemas auxiliares

Capacidad instalada de generación para convertir a energía todo el bagazo y RAC disponible; incluyendo el necesario para las liquidaciones, pruebas y arranque de la siguiente zafra (estimado en el orden de 7,000 a 10,000 toneladas métricas); durante el periodo de zafra, y de ser posible, extendiéndose (dependiendo del exceso de bagazo disponible) al periodo de “fuera de zafra” (idealmente de 30 a 45 días en dicho periodo usando bagazo y de 45 a 70 días usando RAC)

Rango de capacidad unitaria de un turbogenerador condensante de 20 a 25 MW con extracción automática a 25 psi (1.76 kg/cm<sup>2</sup>) con condiciones de vapor de escape a 20 psi (1.41 kg/cm<sup>2</sup>) de operación dependiendo del diseño de los turbo-generadores y un voltaje de generación: 13,800 V., el turbogenerador debe estar completo con todos sus accesorios e instalaciones auxiliares, incluyendo un (1) condensador (tipo “casco y tubos”), completo con sistema de vacío y controles automáticos.

Los turbos-generadores deben generar la capacidad indicada contando con condiciones de vapor de admisión de 56 kg/cm<sup>2</sup> y 450 grados CTT (800 psi y 850 grados FTT), y contrapresión de escape (o extracción como sea el caso) de 1.75 kg/cm<sup>2</sup> (25 psi).

No se profundiza en los equipos complementarios, periféricos y auxiliares para el desempeño integral del sistema de cogeneración, para evitar entrar en detalle solo se hace referencia a los equipos principales como la caldera y los turbogeneradores, ver Imagen 54 y Imagen 55.



**Imagen 54. Plantas de Cogeneración con biomasa de caña**



**Imagen 55. Turbogenerador condensante con extracción usando bagazo o RAC**

### **Tipos de turbinas a utilizar en el sistema de cogeneración con Bagazo y RAC**

Poniendo todo esto en forma más práctica, conceptualmente podemos concluir que la mayor eficiencia cogenerando en un ingenio azucarero se logra utilizando una turbina de contrapresión (escape), con la presión/temperatura del vapor de escape más baja posible que permita la utilización practica de dicho vapor en el proceso. En nuestra opinión la óptima presión de escape es alrededor de 20 psi.

Dicho esto, como resulta difícil (dado las variantes que se confrontan diariamente en un ingenio) “balancear” el bagazo y RAC, y no queremos que nos falte (y tener que quemar combustible suplementario, bien petróleo o “biomasa”) o que nos sobre (“exceso” sin uso económico), una



turbina (o combinación de turbinas) con cierta capacidad condensante puede aportar mucha flexibilidad a las operaciones.

Teniendo todo esto en consideración hay varios tipos de turbinas que pueden ser aplicables en nuestro caso:

a) De “contrapresión” (escape a 20 psi) directa o sencilla.

Esta turbina de contrapresión es la más ampliamente utilizada. Su objetivo es expandir el vapor disponible a través de las etapas de la turbina. El vapor de salida es conectado a la cabecera de Proceso.

b) De extracción controlada a baja presión (20 psi) y condensante

Proporciona una presión de vapor constante mediante extracción controlada en condiciones varias de carga de la turbina tomando como base las variaciones de temporada.

En el tipo de extracción controlada se proporciona una válvula de control integrada al recorrido del vapor en una etapa predeterminada y el vapor se deja escapar de la turbina a la presión constante deseada según los requerimientos del proceso. Básicamente hay dos tipos de válvulas de control -a) Válvula de rejilla y b) Válvula de derivación - que controlan el flujo de vapor a una presión preestablecida que se ajusta a las variaciones de carga de la turbina según la temporada.

El sistema de control funciona mediante un mecanismo de retroalimentación en ciclo cerrado. La presión in situ se mide y se retroalimenta al sistema de control. Con base en esta señal de error, el sistema de control de retroalimentación acciona una válvula de control diseñada para variar el área de apertura de la válvula, regulando por consiguiente la presión. Este mecanismo es aplicado a procesos en los cuales la presión de vapor es un parámetro crítico.

En algunos casos se proporciona una boquilla/apertura en una etapa predeterminada y un flujo/purga no controlado de vapor de alta presión es extraído de la turbina. Esta válvula se proporciona antes de la extracción controlada en el recorrido de vapor de la turbina. Se emplea principalmente en aplicaciones de calefacción de baja presión como desaireador, calentadores de baja/alta presión, o algunos procesos.

c) Condensante directo (operando “en paralelo” con una turbina de “contrapresión”)

En una turbina de vapor de condensación directa, la energía calorífica del vapor se convierte completamente en energía mecánica (par). La energía mecánica se utiliza para generar energía. El tipo de condensación directa encuentra aplicación en las industrias donde la generación de energía es energía cautiva.

d) De dos extracciones (alta y baja presión) y condensante.

Una de las instalaciones más versátil en términos de operación, y más intrincada en términos de diseño. Proporciona una presión constante de vapor mediante la extracción controlada en condiciones varias de carga de la turbina según las variaciones de temporada.

Se proporciona una válvula de control integrada al recorrido de vapor en una etapa predeterminada. Según lo requiera el proceso, a una presión constante se extrae de la turbina un chorro parcial de vapor. Básicamente hay dos tipos de válvulas de control -a) de diafragma, b) de regulación, que controlan el flujo de vapor a una presión preestablecida que se ajusta a las variaciones de carga de la turbina según la temporada.

El sistema de control funciona mediante un mecanismo de retroalimentación en ciclo cerrado. La presión in situ se mide y se retroalimenta al sistema de control. Con base en esta señal de error, el sistema de control de retroalimentación acciona una válvula de control diseñada para variar el área de apertura de la válvula regulando por consiguiente la presión. Este mecanismo es aplicado a procesos en los cuales la presión de vapor es un parámetro crítico.

En algunos casos se proporciona una boquilla/apertura en una etapa predeterminada y un flujo/purga no controlado de vapor de alta presión es extraído de la turbina. Esta válvula se proporciona antes de la extracción controlada en el recorrido de vapor de la turbina. Se emplea principalmente en aplicaciones de calefacción de baja presión como desaereador, y procesos.

Las turbinas de condensación controlada/no controlada se emplean en el campo de la cogeneración y ofrecen al usuario un ciclo de eficiencia máximo.

Desde el punto de vista operacional, basado en nuestra experiencia, el turbo-generador de doble extracción y condensante (caso “d”), arriba) ofrece muy limitada flexibilidad, sobre todo cuando llegue el momento de ampliar la capacidad del ingenio; y considerando eso, además del alto costo inicial y el hecho de que se genera (y exporta) menos energía a partir de la misma cantidad de bagazo en nuestra opinión esa opción no es recomendable.

Para lograr utilizar como combustible todo el bagazo disponible, y/o en el otro extremo evitar la necesidad momentánea de quemar combustible suplementario, consideramos que tenemos dos posibilidades: el caso “b)” o una combinación de los casos “a)” y “c)”.

Sin embargo, en el caso de posibles proyectos futuros tales como la refinería y/o la destilería que aumentan la necesidad de vapor de escape (20 psi) para el proceso, la opción más lógica podría ser un turbo-generador de “contrapresión”; de manera que en la selección inicial del tipo de turbina a utilizar debe considerarse la posibilidad de realización de dichos proyectos.

En la práctica, para lograr en forma económicamente efectiva los objetivos de este proyecto se considera que idealmente la planta, esta opción debe consistir de un turbo-generador de 25 MW, con una extracción controlada a presión 25 psi y condensante. Durante el periodo de zafra se operarían ambos turbo-generadores. La unidad condensante operaría con una extracción a 25 psi (y un flujo de acuerdo a las necesidades de vapor del proceso) y un flujo mínimo de vapor al condensador (posiblemente del orden de 9 – 10 % del flujo total de vapor entrando a la turbina); y durante el periodo de “fuera de zafra” operaría solo el turbo-generador condensante con un flujo mínimo de extracción a 25 psi (posiblemente en el orden de 9 a 10 % del flujo de vapor entrando), el cual se utilizaría en el calentador desaireador del agua de alimentación a la caldera.

A continuación se muestra un gráfico en Figura 79 explicando el índice de consumo de vapor para el turbogenerador de condensación con extracción.

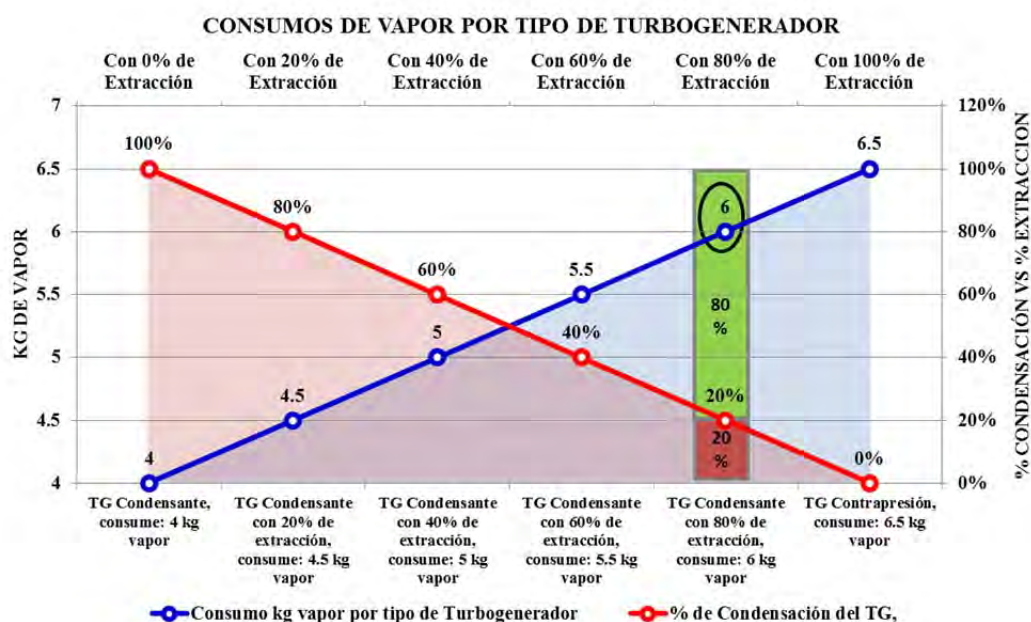


Figura 79. Consumo de vapor del turbogenerador condensante con diferentes niveles de extracción.

### 3.3.5. Producción de energía térmica (vapor) y eléctrica.

Esta propuesta utiliza bagazo de caña y residuos agrícolas de cosecha de caña (RAC) para aumentar la rentabilidad económica de los sistemas de cogeneración de vapor y energía eléctrica en zafra y no zafra.

Tradicionalmente los sistemas de cogeneración en la industria azucarera tienen capacidad solo para cogenerar la energía térmica en forma de vapor y energía eléctrica para los procesos energéticos que demanda el proceso de elaboración de azúcar al interior de la planta industrial, es decir que la gran mayoría solo producen la energía para su propio autoconsumo, solo en periodo de zafra.

Otros sistemas han ido evolucionando a sistemas más eficientes energéticamente, sustituyendo los equipos de cogeneración de baja eficiencia a modernas tecnologías capaces de duplicar la generación de energía con la misma cantidad de biomasa utilizada para combustión e inclusive con menos desde el punto de vista de eficiencia energética, es decir que producen más del doble con la misma biomasa o producen la misma cantidad de energía con menos de la mitad de biomasa.

Estos sistemas permite generar excedentes de energía eléctrica durante la zafra e inclusive queda biomasa de bagazo para seguir generando vapor y energía eléctrica entre 30 y 40 días después de haber terminado de zafra.

Este trabajo de investigación propone el uso de este tipo de tecnologías modernas de cogeneración de alta eficiencia utilizando además biomasa adicional RAC para ser utilizada en periodo fuera de zafra alargando el periodo de generación. Esta propuesta permite cogenerar vapor y energía eléctrica para autoconsumo y para excedentes con bagazo en periodo de zafra, permite que se obtengan sobrantes de bagazo para seguir generando un periodo posterior a la zafra y permite utilizar residuos agrícolas de cosecha para alargar la generación por más de 60 días después de haber utilizado los excedentes de bagazo en no zafra para generar energía eléctrica.

## 1. Cadena de valor Ingenio de Huixtla

Se efectúa el balance del flujo de vapor que es producido con bagazo y RAC en diferentes periodos, en la Tabla 187 se muestra la producción de vapor.

**Tabla 187. Producción de vapor con RAC y Bagazo en Huixtla**

Año	Año	Ton Vapor total	Ton Vapor autoconsumo con Bagazo en Zafra (p/elaboración)	Ton Vapor con Bagazo en Zafra	Ton Vapor con Bagazo en No Zafra	Ton Vapor con RAC en No Zafra
0	2014/15	797,018	308,037	393,182	48,527	47,271
1	2015/16	832,187	318,230	406,193	50,133	57,631
2	2016/17	874,656	331,732	423,427	52,260	67,237
3	2017/18	909,896	343,580	438,550	54,127	73,640
4	2018/19	951,539	355,427	453,672	55,993	86,447
5	2019/20	993,183	367,275	468,794	57,860	99,254
6	2020/21	993,183	367,275	468,794	57,860	99,254
7	2021/22	993,183	367,275	468,794	57,860	99,254
8	2022/23	993,183	367,275	468,794	57,860	99,254
9	2023/24	993,183	367,275	468,794	57,860	99,254
10	2024/25	993,183	367,275	468,794	57,860	99,254

El bagazo que es utilizado para producir vapor para el proceso de elaboración no pasa por los turbogeneradores, es vapor que sale de las calderas y va directo al proceso de elaboración de azúcar principalmente para mover las turbinas de los molinos azucareros que provocan la extracción del jugo en la caña y separan el jugo de la fibra produciendo el bagazo, por este motivo es no se produce energía eléctrica con ese bagazo, solo se produce vapor para otros fines.

En la Tabla 188 se presenta el flujo eléctrico con respecto al vapor producido en las calderas que es utilizado para el consumo de los turbogeneradores de contrapresión y condensación, ambos con extracción.

Tabla 188. Producción de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en Huixtla

<b>Año</b>	<b>Año</b>	<b>MWh de Energía Generada total</b>	<b>MWh de Energía para autoconsumo con Bagazo en Zafra (p/elaboración)</b>	<b>MWh de Energía generada con Bagazo en Zafra</b>	<b>MWh de Energía generada con Bagazo en No Zafra</b>	<b>MWh de Energía generada con RAC en No Zafra</b>
0	2014/15	89,480	-	65,530	12,132	11,818
1	2015/16	94,640	-	67,699	12,533	14,408
2	2016/17	100,445	-	70,571	13,065	16,809
3	2017/18	105,033	-	73,092	13,532	18,410
4	2018/19	111,222	-	75,612	13,998	21,612
5	2019/20	117,411	-	78,132	14,465	24,814
6	2020/21	117,411	-	78,132	14,465	24,814
7	2021/22	117,411	-	78,132	14,465	24,814
8	2022/23	117,411	-	78,132	14,465	24,814
9	2023/24	117,411	-	78,132	14,465	24,814
10	2024/25	117,411	-	78,132	14,465	24,814

Con la combustión de RAC es posible generar hasta 24 mil MWh en el periodo después de zafra, 78 mil MWh con Bagazo en Zafra y en no zafra hasta 14 mil MWh, en la Tabla 189 se presenta el flujo de energía requerida para el autoconsumo, es decir la energía que se utiliza al interior de la fábrica para mover los equipos eléctricos, y es energía que no se vende, solo se consume.

Tabla 189. Autoconsumo de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en Huixtla

Año	Año	MWh de Energía total para Autoconsumo	MWh de Energía con Bagazo en Zafra autoconsumo (p/elaboración)	MWh de Energía autoconsumo con Bagazo en Zafra	MWh de Energía autoconsumo con Bagazo en No Zafra	MWh de Energía Autoconsumo con RAC en No Zafra
0	2014/15	32,876	-	30,481	1,213	1,182
1	2015/16	34,183	-	31,489	1,253	1,441
2	2016/17	35,813	-	32,825	1,307	1,681
3	2017/18	37,192	-	33,998	1,353	1,841
4	2018/19	38,731	-	35,170	1,400	2,161
5	2019/20	40,270	-	36,342	1,446	2,481
6	2020/21	40,270	-	36,342	1,446	2,481
7	2021/22	40,270	-	36,342	1,446	2,481
8	2022/23	40,270	-	36,342	1,446	2,481
9	2023/24	40,270	-	36,342	1,446	2,481
10	2024/25	40,270	-	36,342	1,446	2,481

De la energía producida por los equipos instalados se genera energía que se le considera excedente porque es energía que sobra para otros fines distintos al proceso y que ya no es requerida para producir azúcar, en la Tabla 190 se presenta este flujo de energía excedente producida.

De los 24 mil MWh producidos con el RAC solo 22 Mil MWh servirán para enviarse a la red nacional y es la energía de intercambio en la red de valor entre las cadenas de valor integradas, en la Tabla 190 se presenta este flujo eléctrico.

Tabla 190. Excedentes de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en Huixtla

<b>Año</b>	<b>Año</b>	<b>MWh de Energía Excedente</b>	<b>MWh de Energía excedente con Bagazo en Zafra (p/elaboración)</b>	<b>MWh de Energía excedente con Bagazo en Zafra</b>	<b>MWh de Energía excedente con Bagazo en No Zafra</b>	<b>MWh de Energía excedente con RAC en No Zafra</b>
0	2014/15	56,604	-	35,050	10,919	10,636
1	2015/16	60,456	-	36,209	11,280	12,967
2	2016/17	64,633	-	37,746	11,759	15,128
3	2017/18	67,841	-	39,094	12,179	16,569
4	2018/19	72,491	-	40,442	12,598	19,451
5	2019/20	77,141	-	41,790	13,018	22,332
6	2020/21	77,141	-	41,790	13,018	22,332
7	2021/22	77,141	-	41,790	13,018	22,332
8	2022/23	77,141	-	41,790	13,018	22,332
9	2023/24	77,141	-	41,790	13,018	22,332
10	2024/25	77,141	-	41,790	13,018	22,332

La capacidad instalada del equipo de generación eléctrica y de producción de vapor deben ser capaces de generar en zafra al menos 128 toneladas de vapor por hora para producir 21.5 MW, el mismo equipo en no zafra producirá 19.4 MW por hora y el RAC producirá 17 MW por hora, esta capacidad en no zafra está dado por la biomasa disponible, el tiempo perdido por hora y la cantidad de biomasa que se suministre por hora o día, en no zafra la generación puede subir al reducir el periodo de operación, y dosificar más biomasa.

En la Tabla 191 se aprecia el volumen estimado de generación al utilizar los dos tipos de biomasa en diferentes periodos, se producen excedentes de hasta 40 mil MWh en zafra con bagazo, de 12 mil MWh en no zafra con bagazo y de hasta 19 mil MWh en no zafra con RAC para producir un total de 72 mil MWh en el año.



Tabla 191. Generación eléctrica para Huixtla en el año 4 (el más probable)

Concepto	Utilizando	Utilizando	Utilizando	Total	Unidad
	Bagazo en zafra	Bagazo en no zafra	RAC en no zafra		
Consumo de Vapor de 2 TG	128.99	86.03	86.11	301.12	T vapor/h
Generación de energía	21.50	21.51	21.53	64.53	MWh
Autoconsumo	10.00	2.15	2.15	14.30	MWh
Excedentes de Energía	11.50	19.36	19.37	50.23	MWh
Generación de energía	515.95	516.18	516.64	1,548.77	MWh/día
Autoconsumo	239.99	51.62	51.66	343.27	MWh/día
Excedentes de Energía	275.96	464.56	464.98	1,205.50	MWh/día
Generación de energía	75,611.99	13,998.28	21,609.02	111,219.29	MWh/zafra
Autoconsumo	35,170.07	1,399.83	2,160.90	38,730.80	MWh/zafra
Excedentes de Energía	40,441.93	12,598.45	19,448.11	72,488.49	MWh/zafra

Las cenizas producidas por la combustión del RAC y del bagazo no son tan representativas como la ceniza de la pollinaza porque el RAC tiene mayor materia volátil y en consecuencia queda menor cantidad de cenizas después de su combustión, así mismo las características de composición mineral de RAC tiene menor valor económico.

Tabla 192. Producción de cenizas en Huixtla

Año	Año	Ton Cenizas	Ton Cenizas de Bagazo en Zafra (p/elaboración)	Ton Cenizas de Bagazo en Zafra	Ton Cenizas de Bagazo en No Zafra	Ton Cenizas con RAC en No Zafra
0	2014/15	27,247	10,585	13,790	1,931	940
1	2015/16	28,323	10,936	14,246	1,995	1,147
2	2016/17	29,667	11,400	14,851	2,079	1,338
3	2017/18	30,807	11,807	15,381	2,154	1,465
4	2018/19	32,073	12,214	15,912	2,228	1,720
5	2019/20	33,340	12,621	16,442	2,302	1,975

6	2020/21	33,340	12,621	16,442	2,302	1,975
7	2021/22	33,340	12,621	16,442	2,302	1,975
8	2022/23	33,340	12,621	16,442	2,302	1,975
9	2023/24	33,340	12,621	16,442	2,302	1,975
10	2024/25	33,340	12,621	16,442	2,302	1,975

## 2. Cadena de valor Ingenio de San Pedro

Para evaluar la producción de energía eléctrica se debe estimar el volumen de vapor producido en distintos periodos y con diferentes tipos de biomasa, en la Tabla 193 se presenta el vapor a producir con bagazo que alcanza un valor de hasta 433 mil toneladas que son utilizadas para mover las turbinas de vapor en los molinos que extraen el jugo de la caña, de 101 mil toneladas de vapor en no zafra con RAC.

**Tabla 193. Producción de vapor con RAC y Bagazo en San Pedro**

<b>Año</b>	<b>Año</b>	<b>Ton Vapor total</b>	<b>Ton Vapor autoconsumo con Bagazo en Zafra (p/elaboración)</b>	<b>Ton Vapor con Bagazo en Zafra</b>	<b>Ton Vapor con Bagazo en No Zafra</b>	<b>Ton Vapor con RAC en No Zafra</b>
0	2014/15	898,387	331,881	432,376	59,254	74,877
1	2015/16	970,598	357,410	465,635	63,812	83,741
2	2016/17	1,042,851	382,940	498,895	68,370	92,647
3	2017/18	1,115,049	408,469	532,155	72,928	101,497
4	2018/19	1,178,396	433,998	565,414	77,486	101,497
5	2019/20	1,178,396	433,998	565,414	77,486	101,497
6	2020/21	1,178,396	433,998	565,414	77,486	101,497
7	2021/22	1,178,396	433,998	565,414	77,486	101,497
8	2022/23	1,178,396	433,998	565,414	77,486	101,497
9	2023/24	1,178,396	433,998	565,414	77,486	101,497
10	2024/25	1,178,396	433,998	565,414	77,486	101,497

La energía producida con las 101 mil toneladas de vapor con RAC se producen 25 mil MWh en no zafra de las cuales se debe separar la energía para autoconsumo y la energía para excedentes, en la Tabla 194 se presenta la generación eléctrica.

**Tabla 194. Producción de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en San Pedro**

<b>Año</b>	<b>Año</b>	<b>MWh de Energía Generada total</b>	<b>MWh de Energía para autoconsumo con Bagazo en Zafra (p/elaboración)</b>	<b>MWh de Energía generada con Bagazo en Zafra</b>	<b>MWh de Energía generada con Bagazo en No Zafra</b>	<b>MWh de Energía generada con RAC en No Zafra</b>
0	2014/15	105,595	-	72,063	14,813	18,719
1	2015/16	114,494	-	77,606	15,953	20,935
2	2016/17	123,403	-	83,149	17,092	23,162
3	2017/18	132,299	-	88,692	18,232	25,374
4	2018/19	138,981	-	94,236	19,371	25,374
5	2019/20	138,981	-	94,236	19,371	25,374
6	2020/21	138,981	-	94,236	19,371	25,374
7	2021/22	138,981	-	94,236	19,371	25,374
8	2022/23	138,981	-	94,236	19,371	25,374
9	2023/24	138,981	-	94,236	19,371	25,374
10	2024/25	138,981	-	94,236	19,371	25,374

La energía utilizada para autoconsumo y de excedentes se muestra en la Tabla 195 y Tabla 196 respectivamente.

Tabla 195. Autoconsumo de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en San Pedro

Año	Año	MWh de Energía total para Autoconsumo	MWh de Energía con Bagazo en Zafra autoconsumo (p/elaboración)	MWh de Energía autoconsumo con Bagazo en Zafra	MWh de Energía autoconsumo con Bagazo en No Zafra	MWh de Energía Autoconsumo con RAC en No Zafra
0	2014/15	36,872	-	33,519	1,481	1,872
1	2015/16	39,786	-	36,098	1,595	2,094
2	2016/17	42,701	-	38,676	1,709	2,316
3	2017/18	45,615	-	41,254	1,823	2,537
4	2018/19	48,307	-	43,833	1,937	2,537
5	2019/20	48,307	-	43,833	1,937	2,537
6	2020/21	48,307	-	43,833	1,937	2,537
7	2021/22	48,307	-	43,833	1,937	2,537
8	2022/23	48,307	-	43,833	1,937	2,537
9	2023/24	48,307	-	43,833	1,937	2,537
10	2024/25	48,307	-	43,833	1,937	2,537

Tabla 196. Excedentes de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en San Pedro

Año	Año	MWh de Energía Excedente	MWh de Energía excedente con Bagazo en Zafra (p/elaboración)	MWh de Energía excedente con Bagazo en Zafra	MWh de Energía excedente con Bagazo en No Zafra	MWh de Energía excedente con RAC en No Zafra
0	2014/15	68,723	-	38,544	13,332	16,847
1	2015/16	74,708	-	41,508	14,358	18,842
2	2016/17	80,702	-	44,473	15,383	20,845
3	2017/18	86,684	-	47,438	16,409	22,837
4	2018/19	90,674	-	50,403	17,434	22,837
5	2019/20	90,674	-	50,403	17,434	22,837
6	2020/21	90,674	-	50,403	17,434	22,837
7	2021/22	90,674	-	50,403	17,434	22,837

8	2022/23	90,674	-	50,403	17,434	22,837
9	2023/24	90,674	-	50,403	17,434	22,837
10	2024/25	90,674	-	50,403	17,434	22,837

Para producir la energía se hace un balance energético por hora requerido para cada periodo y por tipo de biomasa. En la Tabla 197 se aprecia que la capacidad de las calderas a comprar en el sistema de cogeneración en san pedro debe ser capaz de generar al menos 151 toneladas de vapor por hora en la zafra, este mismo equipo será utilizado en zafra para generar 101 toneladas de vapor en no zafra.

**Tabla 197. Generación eléctrica para San Pedro en el año 3 (el más probable)**

<b>Concepto</b>	<b>Utilizando Bagazo en zafra</b>	<b>Utilizando Bagazo en no zafra</b>	<b>Utilizando RAC en no zafra</b>	<b>Total</b>	<b>Unidad</b>
Consumo de Vapor de 2 TG	151.30	101.07	101.52	353.89	T vapor/h
Generación de energía	25.22	25.27	25.38	75.86	MWh
Autoconsumo	11.73	2.53	2.54	16.79	MWh
Excedentes de Energía	13.49	22.74	22.84	59.07	MWh
Generación de energía	605.21	606.41	609.09	1,820.71	MWh/día
Autoconsumo	281.50	60.64	60.91	403.05	MWh/día
Excedentes de Energía	323.70	545.77	548.18	1,417.65	MWh/día
Generación de energía	88,692.45	18,231.92	25,382.78	132,307.15	MWh/zafra
Autoconsumo	41,254.30	1,823.19	2,538.28	45,615.77	MWh/zafra
Excedentes de Energía	47,438.16	16,408.73	22,844.50	86,691.38	MWh/zafra

La energía producida en zafra es de 88 mil MWh de los cuales para excedente son 47 mil MWh, para la no zafra los excedentes son 16 mil MWh con bagazo y de 22 mil MWh con RAC. En la Tabla 198 se muestran los residuos de la combustión en forma de cenizas produciendo hasta 3 mil toneladas de cenizas producto de la combustión solo del RAC.

Esta ceniza es utilizada por los productores de la zona para ser dosificada en los cultivos de caña de la zona como fertilizante.

Tabla 198. Producción de cenizas en San Pedro

Año	Año	Ton Cenizas	Ton Cenizas de Bagazo en Zafra (p/elaboración)	Ton Cenizas de Bagazo en Zafra	Ton Cenizas de Bagazo en No Zafra	Ton Cenizas con RAC en No Zafra
0	2014/15	30,417	11,405	15,165	2,358	1,490
1	2015/16	32,818	12,282	16,331	2,539	1,666
2	2016/17	35,221	13,159	17,498	2,720	1,843
3	2017/18	37,622	14,036	18,664	2,902	2,019
4	2018/19	39,847	14,914	19,831	3,083	2,019
5	2019/20	39,847	14,914	19,831	3,083	2,019
6	2020/21	39,847	14,914	19,831	3,083	2,019
7	2021/22	39,847	14,914	19,831	3,083	2,019
8	2022/23	39,847	14,914	19,831	3,083	2,019
9	2023/24	39,847	14,914	19,831	3,083	2,019
10	2024/25	39,847	14,914	19,831	3,083	2,019

### 3. Cadena de valor Ingenio de Santa Clara

La biomasa disponible produce más de 593 mil toneladas de vapor por zafra, de las cuales 269 mil toneladas de vapor se utilizan para producir energía eléctrica, ver Tabla 199.

Tabla 199. Producción de vapor con RAC y Bagazo en Santa Clara

Año	Año	Ton Vapor total	Ton Vapor autoconsumo con Bagazo en Zafra (p/elaboración)	Ton Vapor con Bagazo en Zafra	Ton Vapor con Bagazo en No Zafra	Ton Vapor con RAC en No Zafra
0	2014/15	524,123	183,927	239,620	32,838	67,738
1	2015/16	529,494	186,517	242,995	33,301	66,681
2	2016/17	538,663	189,108	246,370	33,763	69,422
3	2017/18	548,325	191,698	249,745	34,226	72,656

4	2018/19	556,866	194,289	253,120	34,688	74,769
5	2019/20	575,428	200,765	261,557	35,844	77,262
6	2020/21	593,421	207,241	269,995	37,001	79,184
7	2021/22	593,421	207,241	269,995	37,001	79,184
8	2022/23	593,421	207,241	269,995	37,001	79,184
9	2023/24	593,421	207,241	269,995	37,001	79,184
10	2024/25	593,421	207,241	269,995	37,001	79,184

El vapor que se utiliza en las turbinas de los molinos sirve para realizar la extracción del jugo de caña, la diferencia de vapor va a los turbogeneradores, ver Tabla 200.

**Tabla 200. Producción de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en Santa Clara**

<b>Año</b>	<b>Año</b>	<b>MWh de Energía Generada total</b>	<b>MWh de Energía para autoconsumo con Bagazo en Zafra (p/elaboración)</b>	<b>MWh de Energía generada con Bagazo en Zafra</b>	<b>MWh de Energía generada con Bagazo en No Zafra</b>	<b>MWh de Energía generada con RAC en No Zafra</b>
0	2014/15	65,081	-	39,937	8,210	16,934
1	2015/16	65,495	-	40,499	8,325	16,670
2	2016/17	66,858	-	41,062	8,441	17,355
3	2017/18	68,344	-	41,624	8,556	18,164
4	2018/19	69,551	-	42,187	8,672	18,692
5	2019/20	71,869	-	43,593	8,961	19,315
6	2020/21	74,045	-	44,999	9,250	19,796
7	2021/22	74,045	-	44,999	9,250	19,796
8	2022/23	74,045	-	44,999	9,250	19,796
9	2023/24	74,045	-	44,999	9,250	19,796
10	2024/25	74,045	-	44,999	9,250	19,796

En la Tabla 201 y Tabla 202 se refleja el consumo eléctrico para el proceso al interior de la fábrica y la energía excedente para la venta a la red nacional de energía.

Tabla 201. Autoconsumo de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en Santa Clara

Año	Año	MWh de Energía total para Autoconsumo	MWh de Energía con Bagazo en Zafra autoconsumo (p/elaboración)	MWh de Energía autoconsumo con Bagazo en Zafra	MWh de Energía autoconsumo con Bagazo en No Zafra	MWh de Energía Autoconsumo con RAC en No Zafra
0	2014/15	21,091	-	18,576	821	1,693
1	2015/16	21,337	-	18,838	833	1,667
2	2016/17	21,679	-	19,099	844	1,736
3	2017/18	22,033	-	19,361	856	1,816
4	2018/19	22,359	-	19,623	867	1,869
5	2019/20	23,104	-	20,277	896	1,932
6	2020/21	23,835	-	20,931	925	1,980
7	2021/22	23,835	-	20,931	925	1,980
8	2022/23	23,835	-	20,931	925	1,980
9	2023/24	23,835	-	20,931	925	1,980
10	2024/25	23,835	-	20,931	925	1,980

Tabla 202. Excedentes de Energía Eléctrica con RAC y Bagazo en Santa Clara

Año	Año	MWh de Energía Excedente	MWh de Energía excedente con Bagazo en Zafra (p/elaboración)	MWh de Energía excedente con Bagazo en Zafra	MWh de Energía excedente con Bagazo en No Zafra	MWh de Energía excedente con RAC en No Zafra
0	2014/15	43,990	-	21,361	7,389	15,241
1	2015/16	44,157	-	21,661	7,493	15,003
2	2016/17	45,179	-	21,962	7,597	15,620
3	2017/18	46,311	-	22,263	7,701	16,348
4	2018/19	47,192	-	22,564	7,805	16,823
5	2019/20	48,765	-	23,316	8,065	17,384
6	2020/21	50,210	-	24,068	8,325	17,816
7	2021/22	50,210	-	24,068	8,325	17,816



8	2022/23	50,210	-	24,068	8,325	17,816
9	2023/24	50,210	-	24,068	8,325	17,816
10	2024/25	50,210	-	24,068	8,325	17,816

El RAC es capaz de producir hasta 16 mil MWh de excedentes fuera de zafra, más la energía de excedentes del bagazo que es 22 mil MWh y 7 mil MWh se producen hasta 47 mil MWh al año para la venta en la Red, ver Tabla 203.

**Tabla 203. Generación eléctrica para Santa Clara en el año 4 (el más probable)**

<b>Concepto</b>	<b>Utilizando Bagazo en zafra</b>	<b>Utilizando Bagazo en no zafra</b>	<b>Utilizando RAC en no zafra</b>	<b>Total</b>	<b>Unidad</b>
Consumo de Vapor de 2 TG	71.97	48.07	48.43	168.47	T vapor/hr
Generación de energía	11.99	12.02	12.11	36.12	MWh
Autoconsumo	5.58	1.20	1.21	7.99	MWh
Excedentes de Energía	6.42	10.82	10.90	28.13	MWh
Generación de energía	287.87	288.44	290.59	866.90	MWh/día
Autoconsumo	133.90	28.84	29.06	191.80	MWh/día
Excedentes de Energía	153.97	259.60	261.53	675.10	MWh/día
Generación de energía	42,186.67	8,672.03	18,699.62	69,558.32	MWh/zafra
Autoconsumo	19,622.66	867.20	1,869.96	22,359.82	MWh/zafra
Excedentes de Energía	22,564.02	7,804.83	16,829.66	47,198.50	MWh/zafra

Las cenizas resultantes de la combustión de la biomasa son de 19 mil toneladas que están disponibles para que los agricultores utilicen en los cultivos de caña, ver Tabla 204.

Tabla 204. Producción de cenizas en Santa Clara

<b>Año</b>	<b>Año</b>	<b>Ton Cenizas</b>	<b>Ton Cenizas de Bagazo en Zafra (p/elaboración)</b>	<b>Ton Cenizas de Bagazo en Zafra</b>	<b>Ton Cenizas de Bagazo en No Zafra</b>	<b>Ton Cenizas con RAC en No Zafra</b>
0	2014/15	17,379	6,320	8,404	1,307	1,348
1	2015/16	17,584	6,409	8,523	1,325	1,327
2	2016/17	17,864	6,498	8,641	1,343	1,381
3	2017/18	18,154	6,587	8,759	1,362	1,445
4	2018/19	18,422	6,676	8,878	1,380	1,488
5	2019/20	19,036	6,899	9,174	1,426	1,537
6	2020/21	19,639	7,122	9,470	1,472	1,575
7	2021/22	19,639	7,122	9,470	1,472	1,575
8	2022/23	19,639	7,122	9,470	1,472	1,575
9	2023/24	19,639	7,122	9,470	1,472	1,575
10	2024/25	19,639	7,122	9,470	1,472	1,575

### 3.3.6. Análisis de riesgo para estimar la rentabilidad económica del uso de los residuos agrícolas de cosecha y bagazo

El retorno de la inversión de proyectos energéticos dependen en gran medida del precio de venta al que se va a comercializar la energía en la red de valor, el costo más representativo es el precio del kilowatt-hora que se ha estimado en 1.38 pesos, equivalente a 1,380 pesos por megawatt-hora en intermedia, ver Tabla 205.

No se considera el valor de punta y base porque sesgarían el valor más probable que es la intermedia y es mejor trabajar con este valor por ser más conservador, aunado a que los precios de punta y base están sujetos a periodos de tiempo específicos a lo largo del día.

El valor de demanda facturable tampoco se considera porque la carga instantánea de generación puede ser distinta en el punto de consumo y el punto de producción, y no se compensa en el intercambio eléctrico, regularmente el precio de la demanda facturable son cargos por penalizaciones en la calidad de la energía consumida y no sobre la producción.

**Tabla 205. Precios unitarios de energía, Cenizas y biomasa de RAC y Bagazo para las tres cadenas de valor**

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Precio de kWh	\$ 1,380.00	Pesos/MWh
Costo de Porteo de Energía Renovable	\$ 34.18	Pesos/MWh
Costo de Serv. Conexos de Energía	\$ 110,000.00	Pesos/Mes
Precio de Cenizas	\$ 15.00	Pesos/Ton
Costo de RAC	\$ 521.41	Pesos/ton
% medio de cenizas residuales	7.560%	% de Cenizas

Por el traslado y envío de la energía a diferentes puntos de consumo y producción en la red de valor tiene una tarifa de porteo de 34.18 pesos por MWh y que hace uso de las líneas de transmisión, también existe un costo por la administración del contrato (conexos) con la red nacional de energía de 110 mil pesos al mes durante el periodo de intercambio de energía.

Se ha determinado un precio de 15 pesos por tonelada de cenizas producidas en las calderas que realizan la combustión de la biomasa y de 521 pesos por la tonelada de residuo agrícola cañero (RAC) que se compra y utiliza como materia prima para combustionar.

El bagazo no tiene costo de materia prima con fines energéticos porque ya fue pagado con anterioridad en el pago de la caña de azúcar, si se desea evaluar el costo del bagazo de manera separada se debe descontar al costo de producción de azúcar y muy probablemente tendría el mismo valor que el RAC a precio de mercado, sin comparar su poder calorífico con el combustóleo.

### 1. Cadena de valor Ingenio de Huixtla

Para determinar la venta de energía eléctrica se considera solo la energía excedente y se multiplica por su precio, en la Tabla 206 se aprecia los ingresos por la venta de la energía eléctrica para los distintos periodos utilizando dos tipos de biomasa.

**Tabla 206. Venta de energía Excedente en Huixtla**

Año	Año	Energía con Bagazo en Zafra (p/elaboración)	Energía con Bagazo en Zafra	Energía con Bagazo en No Zafra	Energía con RAC en No Zafra	Venta Energía
0	2014/15	\$ -	\$48,368,543	\$15,067,750	\$14,677,766	\$78,114,059
1	2015/16	\$ -	\$49,969,075	\$15,566,348	\$17,894,542	\$83,429,965
2	2016/17	\$ -	\$52,089,200	\$16,226,808	\$20,876,966	\$89,192,974
3	2017/18	\$ -	\$53,949,528	\$16,806,337	\$22,865,248	\$93,621,114
4	2018/19	\$ -	\$55,809,857	\$17,385,866	\$26,841,813	\$100,037,536
5	2019/20	\$ -	\$57,670,186	\$17,965,395	\$30,818,378	\$106,453,958
6	2020/21	\$ -	\$57,670,186	\$17,965,395	\$30,818,378	\$106,453,958
7	2021/22	\$ -	\$57,670,186	\$17,965,395	\$30,818,378	\$106,453,958
8	2022/23	\$ -	\$57,670,186	\$17,965,395	\$30,818,378	\$106,453,958
9	2023/24	\$ -	\$57,670,186	\$17,965,395	\$30,818,378	\$106,453,958
10	2024/25	\$ -	\$57,670,186	\$17,965,395	\$30,818,378	\$106,453,958

Los ingresos por la venta de cenizas son muy poco representativos como se muestran en la Tabla 207.

Tabla 207. Venta de Cenizas en Huixtla

Año	Año	Ceniza con Bagazo en Zafra (p/elaboración)	Ceniza con Bagazo en Zafra	Ceniza con Bagazo en No Zafra	Ceniza con RAC en No Zafra	Venta Ceniza
0	2014/15	\$158,779	\$206,852	\$28,963	\$14,107	\$408,701
1	2015/16	\$164,033	\$213,697	\$29,922	\$17,198	\$424,850
2	2016/17	\$170,993	\$222,764	\$31,191	\$20,065	\$445,012
3	2017/18	\$177,100	\$230,720	\$32,305	\$21,976	\$462,100
4	2018/19	\$183,207	\$238,675	\$33,419	\$25,798	\$481,099
5	2019/20	\$189,313	\$246,631	\$34,533	\$29,619	\$500,097
6	2020/21	\$189,313	\$246,631	\$34,533	\$29,619	\$500,097
7	2021/22	\$189,313	\$246,631	\$34,533	\$29,619	\$500,097
8	2022/23	\$189,313	\$246,631	\$34,533	\$29,619	\$500,097
9	2023/24	\$189,313	\$246,631	\$34,533	\$29,619	\$500,097
10	2024/25	\$189,313	\$246,631	\$34,533	\$29,619	\$500,097

En la Tabla 208 se aprecian los costos de porteo sobre la energía excedente y los costos de servicios conexos durante la operación de la zafra, que son costos asociados a la administración del contrato de prestación de servicio con CFE.

Tabla 208. Costos de Energía Excedente en Huixtla

Año	Año	Energía con Bagazo en Zafra (p/elaboración)	Energía con Bagazo en Zafra	Energía con Bagazo en No Zafra	Energía con RAC en No Zafra	Costos Energía
0	2014/15	\$ -	\$1,776,511	\$491,872	\$573,252	\$2,841,636
1	2015/16	\$ -	\$1,816,149	\$504,220	\$652,918	\$2,973,288
2	2016/17	\$ -	\$1,868,656	\$520,577	\$726,780	\$3,116,013
3	2017/18	\$ -	\$1,914,728	\$534,929	\$776,021	\$3,225,679
4	2018/19	\$ -	\$1,960,800	\$549,282	\$874,504	\$3,384,586
5	2019/20	\$ -	\$2,006,873	\$563,634	\$972,986	\$3,543,493

6	2020/21	\$	-	\$2,006,873	\$563,634	\$972,986	\$3,543,493
7	2021/22	\$	-	\$2,006,873	\$563,634	\$972,986	\$3,543,493
8	2022/23	\$	-	\$2,006,873	\$563,634	\$972,986	\$3,543,493
9	2023/24	\$	-	\$2,006,873	\$563,634	\$972,986	\$3,543,493
10	2024/25	\$	-	\$2,006,873	\$563,634	\$972,986	\$3,543,493

En la Tabla 209 se aprecian solo los costos del RAC, ya que como se dijo antes, el costo del Bagazo lo absorbe el costo de producción del azúcar, es por este motivo que la energía eléctrica producida con bagazo se vuelve un subproducto rentable, siempre y cuando el costo del kilowatt –hora sea mayor a los 10 centavos de dólar como en nuestro caso.

**Tabla 209. Costos de Biomasa en Huixtla**

<b>Año</b>	<b>Año</b>	<b>Biomasa con Bagazo en Zafra (p/elaboración)</b>	<b>Biomasa con Bagazo en Zafra</b>	<b>Biomasa con Bagazo en No Zafra</b>	<b>Biomasa con RAC en No Zafra</b>	<b>Biomasa Energía</b>
0	2014/15	\$ -	\$ -	\$ -	\$6,486,301	\$6,486,301
1	2015/16	\$ -	\$ -	\$ -	\$7,907,837	\$7,907,837
2	2016/17	\$ -	\$ -	\$ -	\$9,225,810	\$9,225,810
3	2017/18	\$ -	\$ -	\$ -	\$10,104,459	\$10,104,459
4	2018/19	\$ -	\$ -	\$ -	\$11,861,756	\$11,861,756
5	2019/20	\$ -	\$ -	\$ -	\$13,619,053	\$13,619,053
6	2020/21	\$ -	\$ -	\$ -	\$13,619,053	\$13,619,053
7	2021/22	\$ -	\$ -	\$ -	\$13,619,053	\$13,619,053
8	2022/23	\$ -	\$ -	\$ -	\$13,619,053	\$13,619,053
9	2023/24	\$ -	\$ -	\$ -	\$13,619,053	\$13,619,053
10	2024/25	\$ -	\$ -	\$ -	\$13,619,053	\$13,619,053

Los costos de inversión de un sistema de cogeneración está valuado en 1.5 millones de dólares por MW instalado incluyendo las calderas, el sistema de combustión y los turbogeneradores es decir el equipo completo que es capaz de transformar la biomasa en energía. Sin embargo existen costos ocultos o costos adicionales que deben realizarse al momento de instalar un sistema de cogeneración, tal es el caso de sustituir equipos, modernizar o mejorar instalaciones o sistemas que

tiene la planta y son necesarios para recibir el sistema de cogeneración y pueda operar sin problemas, es por este motivo que se deben de considerar estas inversiones para garantizar su buen funcionamiento integrado a la fábrica de azúcar, por este motivo el valor de la inversión por MW se incrementa entre 350 mil dólares hasta los 700 mil dólares.

Para el caso de este trabajo de investigación se considera un valor de inversión de 1.85 millones de dólares por megawatt precisamente para costos adicionales al interior de la fábrica para que sean compatibles los sistemas y se logre una alta eficiencia energética, en la Tabla 210 se detalla.

**Tabla 210. Costo de inversión del sistema de cogeneración en Huixtla**

Concepto	Cantidad	Unidad
Capacidad Instalada del Turbogenerador a comprar.	25.00	MW
Operación nominal de turbogeneradores	23.16	MW
Tipo de Cambio	\$ 13.38	Pesos/dólares
Inversión Inicial del sistema de cogeneración y mejoras.	\$ 619,797,885	pesos
Costo de Inversión por MW	\$ 1,852,446	Dólares/MW

### Escenario 1 de la cadena de valor de Huixtla.

La inversión inicial solo incluye el sistema de cogeneración. La inversión del sistema logístico del RAC no se incluye en este escenario porque se incluye en el precio de la materia prima del RAC a manera de compensarla, ver Tabla 211. En este escenario se compra el RAC.

**Tabla 211. Inversión solo del sistema de cogeneración en Huixtla**

Año	Inversión Inicial	Ingresos Totales	Egresos Totales	EBITDA Total	Flujo de Efectivo	Flujo de Efectivo Acum.
0	\$ 433,858,520	\$ -	\$ -	\$ -	-\$433,858,520	-\$433,858,520
1	\$ 185,939,366	\$ -	\$ -	\$ -	-\$185,939,366	-\$619,797,885
2	\$ -	\$89,637,986	\$12,341,823	\$77,296,163	\$77,296,163	-\$542,501,722
3	\$ -	\$94,083,214	\$13,330,138	\$80,753,076	\$80,753,076	-\$461,748,646
4	\$ -	\$100,518,635	\$15,246,342	\$85,272,293	\$85,272,293	-\$376,476,353

5	\$	-	\$106,954,056	\$17,162,546	\$89,791,509	\$89,791,509	-\$286,684,844
6	\$	-	\$106,954,056	\$17,162,546	\$89,791,509	\$89,791,509	-\$196,893,335
7	\$	-	\$106,954,056	\$17,162,546	\$89,791,509	\$89,791,509	-\$107,101,826
8	\$	-	\$106,954,056	\$17,162,546	\$89,791,509	\$89,791,509	-\$17,310,316
9	\$	-	\$106,954,056	\$17,162,546	\$89,791,509	\$89,791,509	\$72,481,193
10	\$	-	\$106,954,056	\$17,162,546	\$89,791,509	\$89,791,509	\$162,272,702

En la Tabla 212 se encuentra la evaluación de rentabilidad económica de la cadena de valor cañero – azucarera en Huixtla considerando el escenario 1, el periodo de recuperación es 7.2 años el cual es bueno considerando que estos equipos tienen una vida útil de 25 a 30 años.

Si evaluamos el proyecto con un horizonte de planeación a 10 años el proyecto no resulta atractivo por que la TREMA del 10% es superior a la TIR del 4.18%, es decir que lo que ganamos con el proyecto a 10 años es menor de lo mínimo que esperamos que nos retorne sobre la inversión ejercida, sin embargo estamos obligando al proyecto que sea evaluado a casi un tercio de la vida útil del equipo, ver la Tabla 212.

Si la inversión se evalúa al mínimo periodo de vida útil garantizado resulta que la TREMA del 10% es menor a la TIR del 12.11%, esto quiere decir que el proyecto en un horizonte de planeación a 25 años nos dará a ganar más dinero que el mínimo esperado.

**Tabla 212. Indicadores financieros del sistema de cogeneración en Huixtla**

<b>Concepto</b>	<b>Eval. A 10 años</b>	<b>Eval. A 25 años</b>	<b>Unidad</b>
Inversión Inicial	\$ 619,797,885	\$ 619,797,885	Pesos
Horizonte de Planeación	10.00	25.00	Años
Tasa de Descuento (TMAR)	10.00%	10.00%	%
TIR	4.18%	12.11%	%
Valor Presente	\$ 280,861,396	\$ 544,172,564	Pesos
Valor Presente Neto	-\$152,997,124	\$ 110,314,044	Pesos
Periodo de Recuperación	7.27	7.27	años



Si la evaluación del Escenario 2 con el horizonte de evaluación a 25 años la normalizamos a 10 años, esto resultaría que los 7.27 años equivaldrían al 30% del periodo del tiempo multiplicado por 10 años equivale a 2.9 años, es decir si este proyecto tuviera una vida útil de 10 años tendría un periodo de recuperación de 2.9 años.

Se evalúa a dos horizontes de planeación porque la alta dirección de las organizaciones habla en término de 10 años. En ambos casos la inversión es atractiva económicamente.

### Escenario 2 de la cadena de valor de Huixtla.

La inversión inicial incluye el sistema de cogeneración y la inversión del sistema logístico del RAC. El precio de la materia prima del RAC no se considera, solo incluye los gastos de operación del sistema logístico para recolectar el RAC para la operación de elaborar fardos, ver Tabla 213. En este escenario no se compra el RAC.

**Tabla 213. Inversión del sistema de cogeneración y del sistema logístico de recolección en Huixtla**

Año	Inversión Inicial	Ingresos Totales	Egresos Totales	EBITDA Total	Flujo de Efectivo	Flujo de Efectivo Acum.
0	\$ 433,858,520	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 433,858,520	-\$ 433,858,520
1	\$ 194,569,366	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 194,569,366	-\$ 628,427,885
2	\$ -	\$ 97,296,893	\$ 6,718,795	\$ 90,578,098	\$ 90,578,098	-\$ 537,849,787
3	\$ 8,630,000	\$ 103,018,605	\$ 7,285,091	\$ 95,733,514	\$ 87,103,514	-\$ 450,746,274
4	\$ -	\$ 110,305,015	\$ 8,611,418	\$ 101,693,597	\$ 101,693,597	-\$ 349,052,677
5	\$ -	\$ 118,442,415	\$ 9,379,166	\$ 109,063,249	\$ 109,063,249	-\$ 239,989,427
6	\$ 8,630,000	\$ 120,144,394	\$ 9,988,006	\$ 110,156,388	\$ 101,526,388	-\$ 138,463,039
7	\$ -	\$ 120,144,394	\$ 9,988,006	\$ 110,156,388	\$ 110,156,388	-\$ 28,306,651
8	\$ 8,630,000	\$ 120,144,394	\$ 9,988,006	\$ 110,156,388	\$ 101,526,388	\$ 73,219,737
9	\$ -	\$ 120,144,394	\$ 9,988,006	\$ 110,156,388	\$ 110,156,388	\$ 183,376,125
10	\$ -	\$ 120,144,394	\$ 9,988,006	\$ 110,156,388	\$ 110,156,388	\$ 293,532,513

La inversión da saltos en diferentes periodos de tiempo por el efecto de la inversión en los equipos agrícolas del sistema logístico tienen una vida útil de 5 años, este efecto está dado por la compra del sistema agrícola integrado para cierta capacidad que está relacionado con el plan de crecimiento de cosecha de caña en verde, aunado a que pasada su vida útil deben ser reemplazados.

En la Tabla 214 se aprecia la evaluación del escenario 2 de la cadena de valor en Huixtla, y se aprecia que la inversión inicial se reduce por el efecto que la materia prima del RAC que no la compramos. Solo se considera el efecto de la inversión en el sistema logístico del RAC y de sus gastos relacionados a la recolección, es decir que el sistema lo hemos integrado por completo a la cadena de valor. La evaluación del proyecto a 10 años la TIR es del 7% y la TIR a 25 años es del 14%.

**Tabla 214. Indicadores financieros del sistema de cogeneración y del sistema logístico de recolección en Huixtla**

Concepto	Cantidad	Cantidad	Unidad
Inversión Inicial	\$628,427,885	\$628,427,885	Pesos
Horizonte de Planeación	10.00	25.00	Años
Tasa de Descuento (TMAR)	10.00%	10.00%	%
TIR	7.04%	14.15%	%
Valor Presente	\$350,983,213	\$662,928,991	Pesos
Valor Presente Neto	-\$82,875,306	\$229,070,472	Pesos
Periodo de Recuperación	6.18	6.18	años

## 2. Cadena de valor Ingenio San Pedro

Las venta de energía eléctrica en la cadena de valor en Veracruz son por 125 millones de pesos, ver Tabla 215, que incluye la venta por los ingresos de Bagazo en zafra, bagazo fuera de zafra y RAC en no zafra.

**Tabla 215. Venta de energía Excedente en San Pedro**

Año	Año	Energía con Bagazo en Zafra (p/elaboración)	Energía con Bagazo en Zafra	Energía con Bagazo en No Zafra	Energía con RAC en No Zafra	Venta Energía
0	2014/15	\$ -	\$ 53,190,032	\$ 18,398,285	\$ 23,249,174	\$ 94,837,491
1	2015/16	\$ -	\$ 57,281,573	\$ 19,813,537	\$ 26,001,531	\$103,096,641

2	2016/17	\$	-	\$ 61,373,114	\$ 21,228,790	\$ 28,766,775	\$111,368,678
3	2017/18	\$	-	\$ 65,464,655	\$ 22,644,043	\$ 31,514,910	\$119,623,608
4	2018/19	\$	-	\$ 69,556,196	\$ 24,059,295	\$ 31,514,910	\$125,130,401
5	2019/20	\$	-	\$ 69,556,196	\$ 24,059,295	\$ 31,514,910	\$125,130,401
6	2020/21	\$	-	\$ 69,556,196	\$ 24,059,295	\$ 31,514,910	\$125,130,401
7	2021/22	\$	-	\$ 69,556,196	\$ 24,059,295	\$ 31,514,910	\$125,130,401
8	2022/23	\$	-	\$ 69,556,196	\$ 24,059,295	\$ 31,514,910	\$125,130,401
9	2023/24	\$	-	\$ 69,556,196	\$ 24,059,295	\$ 31,514,910	\$125,130,401
10	2024/25	\$	-	\$ 69,556,196	\$ 24,059,295	\$ 31,514,910	\$125,130,401

La venta de cenizas de san pedro es la cadena de valor que más produce, pero aun así siendo poco representativo, ver Tabla 216, por el bajo contenido de nutrientes para el cultivo.

**Tabla 216. Venta de Cenizas en San Pedro**

Año	Año	Ceniza con Bagazo en Zafra (p/elaboración)	Ceniza con Bagazo en Zafra	Ceniza con Bagazo en No Zafra	Ceniza con RAC en No Zafra	Venta Ceniza
0	2014/15	\$171,070	\$227,471	\$35,365	\$22,345	\$456,251
1	2015/16	\$184,229	\$244,969	\$38,086	\$24,990	\$492,274
2	2016/17	\$197,388	\$262,467	\$40,806	\$27,648	\$528,309
3	2017/18	\$210,547	\$279,965	\$43,526	\$30,289	\$564,327
4	2018/19	\$223,706	\$297,463	\$46,247	\$30,289	\$597,705
5	2019/20	\$223,706	\$297,463	\$46,247	\$30,289	\$597,705
6	2020/21	\$223,706	\$297,463	\$46,247	\$30,289	\$597,705
7	2021/22	\$223,706	\$297,463	\$46,247	\$30,289	\$597,705
8	2022/23	\$223,706	\$297,463	\$46,247	\$30,289	\$597,705
9	2023/24	\$223,706	\$297,463	\$46,247	\$30,289	\$597,705
10	2024/25	\$223,706	\$297,463	\$46,247	\$30,289	\$597,705

Los costos asociados a la gestión de la energía eléctrica de excedentes producida se muestran en la Tabla 217, que representan costos adicionales a la transformación de la biomasa.

**Tabla 217. Costos de Energía Excedente en San Pedro**

<b>Año</b>	<b>Año</b>	<b>Energía con Bagazo en Zafra (p/elaboración)</b>		<b>Energía con Bagazo en Zafra</b>	<b>Energía con Bagazo en No Zafra</b>	<b>Energía con RAC en No Zafra</b>	<b>Costos Energía</b>
0	2014/15	\$	-	\$1,895,919	\$574,355	\$740,323	\$3,210,597
1	2015/16	\$	-	\$1,997,248	\$609,405	\$808,487	\$3,415,140
2	2016/17	\$	-	\$2,098,578	\$644,455	\$876,970	\$3,620,003
3	2017/18	\$	-	\$2,199,908	\$679,504	\$945,030	\$3,824,442
4	2018/19	\$	-	\$2,301,238	\$714,554	\$945,030	\$3,960,822
5	2019/20	\$	-	\$2,301,238	\$714,554	\$945,030	\$3,960,822
6	2020/21	\$	-	\$2,301,238	\$714,554	\$945,030	\$3,960,822
7	2021/22	\$	-	\$2,301,238	\$714,554	\$945,030	\$3,960,822
8	2022/23	\$	-	\$2,301,238	\$714,554	\$945,030	\$3,960,822
9	2023/24	\$	-	\$2,301,238	\$714,554	\$945,030	\$3,960,822
10	2024/25	\$	-	\$2,301,238	\$714,554	\$945,030	\$3,960,822

El costo por la compra de la biomasa del Residuo agrícola se muestra en la Tabla 218, este valor representa el costo en caso de comprar el RAC.

**Tabla 218. Costos de Biomasa en San Pedro**

<b>Año</b>	<b>Año</b>	<b>Biomasa con Bagazo en Zafra (elaboración)</b>		<b>Biomasa con Bagazo en Zafra</b>	<b>Biomasa con Bagazo en No Zafra</b>	<b>Biomasa con RAC en No Zafra</b>	<b>Biomasa Energía</b>
0	2014/15	\$	-	\$	-	\$10,274,121	\$10,274,121
1	2015/16	\$	-	\$	-	\$11,490,424	\$11,490,424
2	2016/17	\$	-	\$	-	\$12,712,422	\$12,712,422
3	2017/18	\$	-	\$	-	\$13,926,860	\$13,926,860
4	2018/19	\$	-	\$	-	\$13,926,860	\$13,926,860
5	2019/20	\$	-	\$	-	\$13,926,860	\$13,926,860

6	2020/21	\$	-	\$	-	\$	-	\$13,926,860	\$13,926,860
7	2021/22	\$	-	\$	-	\$	-	\$13,926,860	\$13,926,860
8	2022/23	\$	-	\$	-	\$	-	\$13,926,860	\$13,926,860
9	2023/24	\$	-	\$	-	\$	-	\$13,926,860	\$13,926,860
10	2024/25	\$	-	\$	-	\$	-	\$13,926,860	\$13,926,860

La inversión para el sistema de cogeneración en San Pedro es la más grande a realizar, debido a que tiene mayor proporción de caña a cosechar respecto a su plan de crecimiento estratégico, ver la Tabla 219. La capacidad instalada de los turbogeneradores debe ser de 29 MW.

**Tabla 219. Costo de inversión del sistema de cogeneración en San Pedro**

Concepto	Cantidad	Unidad
Capacidad Instalada del Turbogenerador a comprar.	29.00	MW
Operación nominal de turbogeneradores	27.16	MW
Tipo de Cambio	\$ 13.38	Pesos/dólares
Inversión Inicial del sistema de cogeneración y mejoras.	\$ 727,019,507	pesos
Costo de Inversión por MW	\$ 1,873,198.37	Dólares/MW

### Escenario 1 de la cadena de valor San Pedro

La inversión inicial solo incluye el sistema de cogeneración. La inversión del sistema logístico del RAC no se incluye en este escenario porque se incluye en el precio de la materia prima del RAC a manera de compensarla.

Tabla 220. Inversión solo del sistema de cogeneración en San Pedro

Año	Inversión Inicial	Ingresos Totales	Egresos Totales	EBITDA Total	Flujo de Efectivo	Flujo de Efectivo Acum.
0	\$508,913,655	\$ -	\$ -	\$ -	-\$508,913,655	-\$508,913,655
1	\$218,105,852	\$ -	\$ -	\$ -	-\$218,105,852	-\$727,019,507
2	\$ -	\$111,896,987	\$16,332,425	\$95,564,562	\$95,564,562	-\$631,454,945
3	\$ -	\$120,187,935	\$17,751,302	\$102,436,633	\$102,436,633	-\$529,018,313
4	\$ -	\$125,728,106	\$17,887,682	\$107,840,424	\$107,840,424	-\$421,177,889
5	\$ -	\$125,728,106	\$17,887,682	\$107,840,424	\$107,840,424	-\$313,337,465
6	\$ -	\$125,728,106	\$17,887,682	\$107,840,424	\$107,840,424	-\$205,497,041
7	\$ -	\$125,728,106	\$17,887,682	\$107,840,424	\$107,840,424	-\$97,656,617
8	\$ -	\$125,728,106	\$17,887,682	\$107,840,424	\$107,840,424	\$10,183,807
9	\$ -	\$125,728,106	\$17,887,682	\$107,840,424	\$107,840,424	\$118,024,231
10	\$ -	\$125,728,106	\$17,887,682	\$107,840,424	\$107,840,424	\$225,864,655

Los flujos de efectivo del sistema de cogeneración se van hasta el año 2 porque la construcción del sistema nuevo tarda dos años en construirse.

En la Tabla 221 se muestran los índices financieros de la evaluación del escenario 1 de la cadena de valor de San Pedro, y la tasa interna de retorno a 25 años es del 12.6% con un periodo de recuperación a 6.7 años. La TIR del escenario de 10 años es menor porque es un periodo menor a su vida útil, esta evaluación también se realiza a 10 años porque el inversionista prefiere y esta acostumbrado ver evaluaciones de inversión en este periodo.

Tabla 221. Indicadores financieros del sistema de cogeneración en San Pedro

Concepto	Eval. A 10 años	Eval. A 25 años	Unidad
Inversión Inicial	\$ 727,019,507	\$ 727,019,507	Pesos
Horizonte de Planeación	10.00	25.00	Años
Tasa de Descuento (TMAR)	10.00%	10.00%	%
TIR	4.93%	12.60%	%

Valor Presente	\$ 352,112,636	\$ 668,351,758	Pesos
Valor Presente Neto	-\$ 156,801,019	\$ 159,438,103	Pesos
Periodo de Recuperación	6.74	6.74	años

### Escenario 2 de la cadena de valor de San Pedro.

La inversión inicial incluye el sistema de cogeneración y la inversión del sistema logístico del RAC. El precio de la materia prima del RAC no se considera, solo incluye los gastos de operación del sistema logístico para recolectar el RAC para la operación de elaborar fardos. Es decir en este escenario ya no se compra el RAC.

En el año 7 del flujo se considera la reinversión por el reemplazo de los equipos del sistema logístico de recolección del RAC, ver Tabla 222.

**Tabla 222. Inversión del sistema de cogeneración y del sistema logístico de recolección en San Pedro**

Año	Inversión Inicial	Ingresos Totales	Egresos Totales	EBITDA Total	Flujo de Efectivo	Flujo de Efectivo Acum.
0	\$508,913,655	\$ -	\$ -	\$ -	-\$508,913,655	-\$508,913,655
1	\$235,365,852	\$ -	\$ -	\$ -	-\$235,365,852	-\$744,279,507
2	\$ -	\$111,896,987	\$3,620,003	\$108,276,984	\$108,276,984	-\$636,002,523
3	\$ -	\$120,187,935	\$3,824,442	\$116,363,493	\$116,363,493	-\$519,639,030
4	\$ -	\$125,728,106	\$3,960,822	\$121,767,284	\$121,767,284	-\$397,871,746
5	\$ -	\$125,728,106	\$3,960,822	\$121,767,284	\$121,767,284	-\$276,104,462
6	\$17,260,000	\$125,728,106	\$3,960,822	\$121,767,284	\$104,507,284	-\$171,597,178
7	\$ -	\$125,728,106	\$3,960,822	\$121,767,284	\$121,767,284	-\$49,829,894
8	\$ -	\$125,728,106	\$3,960,822	\$121,767,284	\$121,767,284	\$71,937,390
9	\$ -	\$125,728,106	\$3,960,822	\$121,767,284	\$121,767,284	\$193,704,674
10	\$ -	\$125,728,106	\$3,960,822	\$121,767,284	\$121,767,284	\$315,471,958

La evaluación del escenario 2 de la cadena de valor de San Pedro a un horizonte de evaluación a 25 años indica que TIR es del 13.7% debido a que el volumen de RAC a recolectar es mayor y la utilización de la capacidad instalada del sistema de cogeneración es mayor al operar más días el equipo y la recuperación del equipos es en 6.1 años, ver Tabla 223.

Tabla 223. Indicadores financieros del sistema de cogeneración y del sistema logístico de recolección en San Pedro

Concepto	Cantidad	Cantidad	Unidad
Inversión Inicial	\$744,279,507	\$744,279,507	Pesos
Horizonte de Planeación	10.00	25.00	Años
Tasa de Descuento (TMAR)	10.00%	10.00%	%
TIR	6.58%	13.70%	%
Valor Presente	\$398,588,984	\$743,530,089	Pesos
Valor Presente Neto	-\$110,324,671	\$234,616,434	Pesos
Periodo de Recuperación	6.11	6.11	años

### 3. Cadena de valor Ingenio Santa Clara

Para el caso de la cadena de valor del ingenio santa clara es la de menor producción, con una venta global de hasta 69 millones de pesos, ver Tabla 224

Tabla 224. Venta de energía Excedente en Santa Clara

Año	Año	Energía con Bagazo en Zafra (p/elaboración)	Energía con Bagazo en Zafra	Energía con Bagazo en No Zafra	Energía con RAC en No Zafra	Venta Energía
0	2014/15	\$ -	\$29,477,629	\$10,196,230	\$21,032,595	\$60,706,455
1	2015/16	\$ -	\$29,892,807	\$10,339,839	\$20,704,571	\$60,937,217
2	2016/17	\$ -	\$30,307,985	\$10,483,448	\$21,555,526	\$62,346,959
3	2017/18	\$ -	\$30,723,163	\$10,627,057	\$22,559,563	\$63,909,783
4	2018/19	\$ -	\$31,138,341	\$10,770,666	\$23,215,838	\$65,124,844
5	2019/20	\$ -	\$32,176,286	\$11,129,688	\$23,989,699	\$67,295,672
6	2020/21	\$ -	\$33,214,230	\$11,488,710	\$24,586,678	\$69,289,618
7	2021/22	\$ -	\$33,214,230	\$11,488,710	\$24,586,678	\$69,289,618
8	2022/23	\$ -	\$33,214,230	\$11,488,710	\$24,586,678	\$69,289,618
9	2023/24	\$ -	\$33,214,230	\$11,488,710	\$24,586,678	\$69,289,618



10	2024/25	\$	-	\$33,214,230	\$11,488,710	\$24,586,678	\$69,289,618
----	---------	----	---	--------------	--------------	--------------	--------------

Los ingresos por la venta de las cenizas se reflejan en la Tabla 225, el ingreso es poco significativo con respecto a la venta de energía.

**Tabla 225. Venta de Cenizas en Santa Clara**

Año	Año	Ceniza con Bagazo en Zafra (p/elaboración)	Ceniza con Bagazo en Zafra	Ceniza con Bagazo en No Zafra	Ceniza con RAC en No Zafra	Venta Ceniza
0	2014/15	\$94,806	\$126,063	\$19,599	\$20,214	\$260,683
1	2015/16	\$96,141	\$127,839	\$19,875	\$19,899	\$263,754
2	2016/17	\$97,476	\$129,615	\$20,151	\$20,717	\$267,959
3	2017/18	\$98,812	\$131,390	\$20,427	\$21,682	\$272,311
4	2018/19	\$100,147	\$133,166	\$20,703	\$22,313	\$276,329
5	2019/20	\$103,485	\$137,605	\$21,393	\$23,056	\$285,540
6	2020/21	\$106,823	\$142,043	\$22,084	\$23,630	\$294,581
7	2021/22	\$106,823	\$142,043	\$22,084	\$23,630	\$294,581
8	2022/23	\$106,823	\$142,043	\$22,084	\$23,630	\$294,581
9	2023/24	\$106,823	\$142,043	\$22,084	\$23,630	\$294,581
10	2024/25	\$106,823	\$142,043	\$22,084	\$23,630	\$294,581

Los costos asociados a la generación, transmisión y administración se encuentran en la Tabla 226.

**Tabla 226. Costos de Energía Excedente en Santa Clara**

Año	Año	Energía con Bagazo en Zafra (p/elaboración)	Energía con Bagazo en Zafra	Energía con Bagazo en No Zafra	Energía con RAC en No Zafra	Costos Energía
0	2014/15	\$	-	\$1,308,664	\$371,226	\$2,454,855
1	2015/16	\$	-	\$1,318,946	\$374,782	\$2,460,570
2	2016/17	\$	-	\$1,329,229	\$378,339	\$2,495,484

3	2017/18	\$	-	\$1,339,511	\$381,895	\$812,782	\$2,534,188
4	2018/19	\$	-	\$1,349,793	\$385,452	\$829,035	\$2,564,280
5	2019/20	\$	-	\$1,375,498	\$394,343	\$848,200	\$2,618,042
6	2020/21	\$	-	\$1,401,204	\$403,235	\$862,985	\$2,667,424
7	2021/22	\$	-	\$1,401,204	\$403,235	\$862,985	\$2,667,424
8	2022/23	\$	-	\$1,401,204	\$403,235	\$862,985	\$2,667,424
9	2023/24	\$	-	\$1,401,204	\$403,235	\$862,985	\$2,667,424
10	2024/25	\$	-	\$1,401,204	\$403,235	\$862,985	\$2,667,424

El costo de la biomasa del residuo agrícola de cosecha comprada es cerca de los 10 millones de pesos como se ve en la Tabla 227.

**Tabla 227. Costos de Biomasa en Santa Clara**

Año	Año	Biomasa con Bagazo en Zafra (p/elaboración)	Biomasa con Bagazo en Zafra	Biomasa con Bagazo en No Zafra	Biomasa con RAC en No Zafra	Biomasa Energía
0	2014/15	\$ -	\$ -	\$ -	\$9,294,585	\$9,294,585
1	2015/16	\$ -	\$ -	\$ -	\$9,149,627	\$9,149,627
2	2016/17	\$ -	\$ -	\$ -	\$9,525,675	\$9,525,675
3	2017/18	\$ -	\$ -	\$ -	\$9,969,373	\$9,969,373
4	2018/19	\$ -	\$ -	\$ -	\$10,259,389	\$10,259,389
5	2019/20	\$ -	\$ -	\$ -	\$10,601,369	\$10,601,369
6	2020/21	\$ -	\$ -	\$ -	\$10,865,182	\$10,865,182
7	2021/22	\$ -	\$ -	\$ -	\$10,865,182	\$10,865,182
8	2022/23	\$ -	\$ -	\$ -	\$10,865,182	\$10,865,182
9	2023/24	\$ -	\$ -	\$ -	\$10,865,182	\$10,865,182
10	2024/25	\$ -	\$ -	\$ -	\$10,865,182	\$10,865,182

El costo de inversión en Santa Clara también es la más pequeña a ejecutar, es de aproximadamente la mitad que el costo del ingenio San Pedro, ver Tabla 228 y el tamaño del sistema de cogeneración es de 15 MW.

Tabla 228. Costo de inversión del sistema de cogeneración en Santa Clara

Concepto	Cantidad	Unidad
Capacidad Instalada del Turbogenerador a comprar.	15.00	MW
Operación nominal de turbogeneradores	13.55	MW
Tipo de Cambio	\$13.38	Pesos/dólares
Inversión Inicial del sistema de cogeneración y mejoras.	\$362,646,097	pesos
Costo de Inversión por MW	\$1,806,456.27	Dólares/MW

### Escenario 1 de la cadena de valor de Santa Clara

La inversión inicial solo incluye el sistema de cogeneración. La inversión del sistema logístico del RAC no se incluye en este escenario porque se incluye en el precio de la materia prima del RAC a manera de compensarla, ver la Tabla 229. Es decir en este escenario se compra el RAC.

Tabla 229. Inversión solo del sistema de cogeneración en Santa Clara

Año	Inversión Inicial	Ingresos Totales	Egresos Totales	EBITDA Total	Flujo de Efectivo	Flujo de Efectivo Acum.
0	\$253,852,268	\$ -	\$ -	\$ -	-\$253,852,268	-\$253,852,268
1	\$108,793,829	\$ -	\$ -	\$ -	-\$108,793,829	-\$362,646,097
2	\$ -	\$62,614,918	\$12,021,159	\$50,593,759	\$50,593,759	-\$312,052,337
3	\$ -	\$64,182,094	\$12,503,561	\$51,678,534	\$51,678,534	-\$260,373,804
4	\$ -	\$65,401,173	\$12,823,669	\$52,577,504	\$52,577,504	-\$207,796,300
5	\$ -	\$67,581,212	\$13,219,411	\$54,361,801	\$54,361,801	-\$153,434,498
6	\$ -	\$69,584,199	\$13,532,605	\$56,051,594	\$56,051,594	-\$97,382,905
7	\$ -	\$69,584,199	\$13,532,605	\$56,051,594	\$56,051,594	-\$41,331,311
8	\$ -	\$69,584,199	\$13,532,605	\$56,051,594	\$56,051,594	\$14,720,282
9	\$ -	\$69,584,199	\$13,532,605	\$56,051,594	\$56,051,594	\$70,771,876
10	\$ -	\$69,584,199	\$13,532,605	\$56,051,594	\$56,051,594	\$126,823,470

Los indicadores financieros del sistema de cogeneración en Santa Clara dan como resultado una TIR del 13.03% a un horizonte de planeación a 25 años, y un periodo de recuperación de 6.9 años, ver Tabla 230.

**Tabla 230. Indicadores financieros del sistema de cogeneración en Santa Clara**

Concepto	Eval. A 10 años	Eval. A 25 años	Unidad
Inversión Inicial	\$362,646,097	\$362,646,097	Pesos
Horizonte de Planeación	10.00	25.00	Años
Tasa de Descuento (TMAR)	10.00%	10.00%	%
TIR	5.48%	13.03%	%
Valor Presente	\$183,335,074	\$347,704,854	Pesos
Valor Presente Neto	-\$70,517,194	\$93,852,586	Pesos
Periodo de Recuperación	6.90	6.90	años

### Escenario 2 de la cadena de valor de Santa Clara.

La inversión inicial incluye el sistema de cogeneración y la inversión del sistema logístico del RAC. El precio de la materia prima del RAC no se considera, solo incluye los gastos de operación del sistema logístico para recolectar el RAC para la operación de elaborar fardos, ver Tabla 231. En este escenario no se compra el RAC.

**Tabla 231. Inversión del sistema de cogeneración y del sistema logístico de recolección en Santa Clara**

Año	Inversión Inicial	Ingresos Totales	Egresos Totales	EBITDA Total	Flujo de Efectivo	Flujo de Efectivo Acum.
0	\$253,852,268	\$ -	\$ -	\$ -	-\$253,852,268	-\$253,852,268
1	\$126,053,829	\$ -	\$ -	\$ -	-\$126,053,829	-\$379,906,097
2	\$ -	\$72,987,553	\$7,426,856	\$65,560,697	\$65,560,697	-\$314,345,399
3	\$ -	\$74,981,043	\$7,597,301	\$67,383,743	\$67,383,743	-\$246,961,656
4	\$ -	\$76,703,128	\$7,782,832	\$68,920,295	\$68,920,295	-\$178,041,361
5	\$ -	\$79,211,949	\$7,938,195	\$71,273,754	\$71,273,754	-\$106,767,607
6	\$17,260,000	\$81,602,627	\$8,107,382	\$73,495,245	\$56,235,245	-\$50,532,362

7	\$	-	\$81,901,703	\$8,199,803	\$73,701,900	\$73,701,900	\$23,169,537
8	\$	-	\$81,901,703	\$8,199,803	\$73,701,900	\$73,701,900	\$96,871,437
9	\$	-	\$81,901,703	\$8,199,803	\$73,701,900	\$73,701,900	\$170,573,337
10	\$	-	\$81,901,703	\$8,199,803	\$73,701,900	\$73,701,900	\$244,275,237

Los indicadores financieros del escenario 2 para Santa Clara indican que existe más rentabilidad al realizar nosotros mismos las operaciones de recolección del residuo agrícola de cosecha elevando la TIR a 15.85% y reduciendo el periodo de recuperación a 5.5 años, ver Tabla 232.

**Tabla 232. Indicadores financieros del sistema de cogeneración y del sistema logístico de recolección en Santa Clara**

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Inversión Inicial	\$379,906,097	\$379,906,097	Pesos
Horizonte de Planeación	10.00	25.00	Años
Tasa de Descuento (TMAR)	10.00%	10.00%	%
TIR	9.49%	15.85%	%
Valor Presente	\$245,161,902	\$449,152,569	Pesos
Valor Presente Neto	-\$8,690,366	\$195,300,302	Pesos
Periodo de Recuperación	5.51	5.51	años

### 3.3.7. Sustentabilidad ambiental con reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>

Al combustionar residuos agrícolas de cosecha con una humedad del 20% y bagazo al 50% de humedad se mitigan 108,990 toneladas de tCO<sub>2</sub>eq al medio ambiente en un año por la venta de energía excedente de las tres cadenas de valor, considerando un factor de emisión de 0.4999 tCO<sub>2</sub>eq por MWh. (GEI, 2013), ver la Tabla 233.

Anteriormente se ha comentado que valor monetario del CER es muy bajo por lo que no es representativo ni hace cambios significativos para incluirlos en el estudio.

**Tabla 233. Reducción de gases efecto invernadero GEI**

<b>Captura de gases efecto invernadero</b>	<b>Huixtla venta de Excedentes</b>	<b>San Pedro Venta de Excedentes</b>	<b>Santa Clara Venta de Excedentes</b>	<b>Total de Excedentes</b>
Excedentes de energía eléctrica para la venta (MWh) año 10	77,141	90,674	50,210	218,025
Reducción de emisiones de gases GEI (tCO <sub>2</sub> eq) Año 10	38,562	45,327	25,099	108,990