

**EVALUACIÓN DE UNA PROPUESTA TECNICO FINANCIERA DE LIMPIEZA PARA  
LOS NIVELES DE CADMIO PRESENTES EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL  
CHOCOLATE DE LA PLANTA INDUSTRIAL DE CACAO EN LA EMPRESA LUKER  
CHOCOLATE, SEDE BOGOTÁ.**

**DANIELA ALEJANDRA LEON LOZANO  
EVELINE FERNÁNDEZ GARZÓN**

**Proyecto integral de grado para optar al título de Ingeniero Químico.**

**Orientador:  
Luis Alberto Figueroa Casallas  
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ  
2021**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

Nombre  
Firma del Director

---

Nombre  
Firma del Presidente Jurado

---

Nombre  
Firma del Jurado

---

Nombre  
Firma del Jurado

Bogotá D. C. Febrero de 2021

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. María Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano de la Facultad

Dr. Julio César Fuentes Arismendi

Director de Programa

Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina

## DEDICATORIA

A Dios en primer lugar por brindarme las oportunidades y bendiciones necesarias para culminar esta etapa de mi vida satisfactoriamente.

A mis padres por su apoyo moral y económico desde un principio para poder cumplir todos mis sueños, a mi compañera de trabajo Daniela Alejandra Leon Lozano por su paciencia y dedicación, al profesor Luis Alberto Figueroa Casallas por su apoyo como orientador, comprensión y dedicación con este trabajo. A todos aquellos que aportaron y colaboraron en este proyecto grado, con sus consejos para lograr la culminación de este.

*Eveline Fernández Garzón*

En primer lugar, a Dios por su guía en este camino, permitiéndome siempre encontrar el mejor camino a los problemas presentados y las oportunidades en mi vida. A mis padres, por ser mi apoyo incondicional, quienes me han dado la educación, el amor y el cariño, confiando en mis capacidades y logros alcanzados. A mi hermano, por ser la mejor compañía y motivación por ser un ejemplo para él. A mis abuelos, por esta presente a lo largo de esta etapa y al profesor Luis Alberto Figueroa por su apoyo como director, por su paciencia y dedicación con este maravilloso proyecto.

*Daniela Alejandra Leon Lozano*

## AGRADECIMIENTOS

A Luis Alberto Figueroa Casallas por el tiempo y dedicación como director del proyecto, su colaboración incondicional, por sus valiosos conocimientos y aportes técnicos en este trabajo de grado.

A Luker chocolate por permitirnos desarrollar nuestra propuesta en su empresa, por brindarnos soporte y apoyo en cada etapa del proyecto, quien presto sus instalaciones y personal profesional para facilitar el desarrollo del trabajo, a Sergio Leonardo Flórez del área de investigación de la empresa, por su tiempo y colaboración.

Al ingeniero Edgar Fernando Moreno Torres, por su apoyo como orientador, por dedicar su tiempo y conocimientos al desarrollo del trabajo de grado, aportando recomendaciones claves para la culminación exitosa del mismo.

*Eveline Fernández Garzón*

Agradezco a Dios primero que todo, por sus bendiciones y oportunidades que me presento en este largo camino, por iluminarme y darme la sabiduría de sacar adelante mis propósitos.

A mi familia, por ser mi apoyo incondicional durante todo este proceso, a mi mama por su paciencia y entrega, a mi papa por sus consejos y sabiduría, a mi hermano por su compañía y risas y a mis abuelos por ser mi motivación día a día.

A la empresa Luker Chocolate, por darnos la oportunidad de desarrollar el proyecto, al área de ingeniería por brindarme el apoyo necesario en cada etapa del proyecto, a Sergio Flórez del área de investigación por su tiempo y dedicación.

A mis amigos de carrera, a Eveline Fernández por ser mi compañera de este proyecto, su dedicación y sacrificio, a Nicolas Ruiz y Sofia González por tantos momentos inolvidables, risas, trasnochadas, me quedare con todos los lindos recuerdos y experiencias que vivimos fuera y dentro de la institución.

A la universidad de América, por la ayuda e instalaciones brindadas, por el conocimiento y la formación adquirida durante toda la carrera, a Edgar Moreno por su apoyo como asesor y sus recomendaciones claves.

*Daniela Alejandra Leon Lozano*

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por lo criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	<b>15</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>16</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>18</b>
Objetivo General	18
Objetivos Específicos	18
<b>1. GENERALIDADES DEL CACAO, CADMIO Y CHOCOLATE.</b>	<b>19</b>
1.1. Características del cacao	19
1.2. Contaminantes del cacao	21
1.3. Características el cadmio	23
1.4. Como afecta el cadmio al ser humano	24
1.5. Caracterización del chocolate	26
<b>2. PRODUCCIÓN EN LA PLANTA DE LUKER CHOCOLATE</b>	<b>27</b>
2.1. Proceso de producción de chocolate	27
2.1.1. Coberturas reales	27
2.1.2. Reología	31
2.2. Balance de materia	33
2.2.1. Limpieza	33
2.2.2. Máquina infrarroja	34
2.2.3. Descascarillado	35
2.2.4. Tostador	36
2.2.5. Molienda principal	37
2.2.6. Molinos refinadores	38
2.2.7. Conchado	39
2.3. Estado actual del cadmio en la planta de Luker Chocolate	41
2.3.1. Toma de muestras en coberturas de Tumaco, Huila y Santander	42

2.3.2.	<i>Selección de puntos críticos en el proceso</i>	52
2.4.	Normatividad	54
3.	<b>SELECCIÓN DEL MÉTODO DE LIMPIEZA</b>	57
3.1.	Estrategias actuales para la reducción de cadmio en la industria chocolatera	57
3.2.	Métodos de limpieza industriales.	58
3.2.1.	<i>Métodos de limpieza mecánica</i>	58
3.2.2.	<i>Métodos químicos de limpieza</i>	59
3.3.	Planteamiento de alternativas	60
3.3.1.	<i>Método 1: Solución extractora con agua</i>	60
3.3.2.	<i>Método 2: Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido</i>	61
3.3.3.	<i>Método 3: Limpieza de tuberías por inyección de aire</i>	61
3.3.4.	<i>Método 4: Limpieza de tuberías por Pig</i>	62
3.3.5.	<i>Método 5: Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua</i>	62
3.3.6.	<i>Método 6: Chorro de agua a ultra alta presión</i>	63
3.3.7.	<i>Método 7: Limpieza CIP</i>	63
3.3.8.	<i>Método 8: Remoción a partir de la microalga <i>Chlorella sp.</i></i>	64
3.3.9.	<i>Método 9: Reducción por micro nano burbujas (aire-ozono)</i>	64
3.3.10.	<i>Método 10: Limpieza postcosecha</i>	65
3.4.	Criterios de selección	65
3.4.1.	<i>Económico</i>	65
3.4.2.	<i>Calidad</i>	66
3.4.3.	<i>Ambiental</i>	66
3.4.4.	<i>Seguridad y salud</i>	67
3.4.5.	<i>Legal</i>	67
3.5.	Selección de alternativa de limpieza	68
3.5.1.	<i>Matriz de selección del método de limpieza</i>	70
3.5.2.	<i>Matriz de priorización de las alternativas con respecto a los criterios</i>	79
4.	<b>CONDICIONES TÉCNICAS Y OPERATIVAS DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA.</b>	81
4.1.	Principio de operación del PIG	81
4.2.	Planteamiento de condiciones técnicas del método PIG	85



4.2.1.	<b>Método PIG</b>	85
4.2.2.	<b>Tuberías</b>	88
4.2.3.	<b>Accesorios</b>	95
4.3.	<b>Planteamiento de condiciones operativas del método PIG</b>	<b>97</b>
4.3.1.	<i>Características del licor de cacao dentro de la tubería</i>	97
4.3.2.	<i>Características de la tubería</i>	98
4.3.3.	<i>Cálculos masa retenida en tuberías</i>	99
4.3.4.	<i>Cálculos movimiento del Pig en tuberías sin pérdidas de fricción</i>	102
4.3.5.	<i>Cálculo pérdidas por fricción en tuberías y accesorios</i>	105
4.3.6.	<i>Cálculos movimiento del Pig en tuberías con pérdidas de fricción</i>	108
4.3.7.	<i>Cálculo Eléctrico del método Pig</i>	112
5.	<b>EVALUACIÓN FINANCIERA</b>	<b>113</b>
5.1.	<b>Costos fijos</b>	<b>113</b>
5.1.1.	<i>Costo de implementación</i>	113
5.1.2.	<i>Costo mano de obra</i>	114
5.2.	<b>Costos variables</b>	<b>115</b>
5.2.1.	<i>Consumo energético</i>	115
5.2.2.	<i>Consumo de agua</i>	116
5.2.3.	<i>Mantenimiento</i>	117
5.3.	<b>Indicadores de costos</b>	<b>118</b>
5.3.1.	<i>TIR</i>	119
5.3.2.	<i>VPN</i>	120
5.4.	<b>Concepto Final</b>	<b>120</b>
6.	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>123</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>124</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>128</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>FIGURA 1.</b> PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL CHOCOLATE	28
<b>FIGURA 2.</b> BALANCE DE MASA ETAPA LIMPIEZA	33
<b>FIGURA 3.</b> BALANCE DE MASA ETAPA MAQUINA INFRARROJA	34
<b>FIGURA 4.</b> BALANCE DE MASA ETAPA DESCASCARILLADO	35
<b>FIGURA 5.</b> BALANCE DE MASA ETAPA TOSTADOR	37
<b>FIGURA 6.</b> BALANCE DE MASA ETAPA MOLIENDA PRINCIPAL.	38
<b>FIGURA 7.</b> BALANCE DE MASA ETAPA MOLINOS REFINADORES	39
<b>FIGURA 8.</b> BALANCE DE MASA ETAPA CONCHADO	40
<b>FIGURA 9.</b> COMPORTAMIENTO DEL CADMIO CON CACAO TUMACO B	47
<b>FIGURA 10.</b> COMPORTAMIENTO DEL CADMIO EN MEZCLA PERÚ, SANTANDER Y HUILA	51
<b>FIGURA 11.</b> METODOLOGÍA MATRIZ AHP	69
<b>FIGURA 12.</b> CRITERIOS EVALUADOS	71
<b>FIGURA 13.</b> RESULTADO MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO DE CALIDAD	73
<b>FIGURA 14.</b> RESULTADO MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO ECONÓMICO	75
<b>FIGURA 15.</b> RESULTADO MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO AMBIENTAL	76
<b>FIGURA 16.</b> RESULTADO MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO LEGAL	77
<b>FIGURA 17.</b> RESULTADO MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO SEGURIDAD Y SALUD	79
<b>FIGURA 18.</b> RESULTADO PRIORIZACIÓN DEL MÉTODO	79
<b>FIGURA 19.</b> SISTEMA DE FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL PIG	84
<b>FIGURA 20.</b> PIG DE GOMA	85
<b>FIGURA 21.</b> DISEÑO DE PIG	86
<b>FIGURA 22.</b> LÍNEA 1: MOLINOS DE BOLAS A TANQUES DE ACOPIO – VISTA 1	89
<b>FIGURA 23.</b> LÍNEA 1: MOLINOS DE BOLAS A TANQUES DE ACOPIO – VISTA 2	89
<b>FIGURA 24.</b> LÍNEA 2 Y 3: TANQUES DE ACOPIO A MOLINOS REFINADORES – VISTA 1	91
<b>FIGURA 25.</b> LÍNEA 2 Y 3: TANQUES DE ACOPIO A MOLINOS REFINADORES – VISTA 2	92
<b>FIGURA 26.</b> ÁREA DE SELECCIÓN DE BOMBA	94
<b>FIGURA 27.</b> TIPO DE CODOS	96
<b>FIGURA 28.</b> VÁLVULAS MARIPOSAS ALIMENTARIAS	96
<b>FIGURA 29.</b> VÁLVULAS DE BOLA ALIMENTARIAS	97
<b>FIGURA 30.</b> MOVIMIENTO DEL PIG POR LA TUBERÍA	102

<b>FIGURA 31.</b> COEFICIENTES DE FRICCIÓN CON RESPECTO A LA PRESIÓN	106
<b>FIGURA 32.</b> DIAGRAMA DE FUERZAS DEL LICOR DE CACAO DENTRO DE LA TUBERÍA HORIZONTAL	110
<b>FIGURA 33.</b> DIAGRAMA DE FUERZAS DEL LICOR DE CACAO DENTRO DE LA TUBERÍA VERTICAL	110

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>TABLA 1.</b> BALANCE DE MASA ETAPA LIMPIEZA	34
<b>TABLA 2.</b> BALANCE DE MASA ETAPA MÁQUINA INFRARROJA	35
<b>TABLA 3.</b> BALANCE DE MASA ETAPA DESCASCARILLADO	36
<b>TABLA 4.</b> BALANCE DE MASA ETAPA TOSTADOR	37
<b>TABLA 5.</b> BALANCE DE MASA ETAPA MOLIENDA PRINCIPAL	38
<b>TABLA 6.</b> BALANCE DE MASA ETAPA MOLINOS REFINADORES	39
<b>TABLA 7.</b> BALANCE DE MASA ETAPA CONCHADO	41
<b>TABLA 8.</b> RESULTADOS DE CADMIO PARA GRANO TUMACO B EN EL COOLER DE ENFRIAMIENTO	42
<b>TABLA 9.</b> RESULTADOS DE CADMIO PARA GRANO TUMACO B EN MOLINOS	43
<b>TABLA 10.</b> RESULTADOS DE CADMIO PARA GRANO TUMACO B EN EL TANQUE DE ACOPIO	43
<b>TABLA 11.</b> RESULTADOS DE CADMIO PARA GRANO TUMACO B EN LOS MOLINOS REFINADORES	44
<b>TABLA 12.</b> RESULTADOS DE CADMIO PARA GRANO TUMACO B EN LA CONCHA	45
<b>TABLA 13.</b> RESULTADOS DE CADMIO PARA GRANO TUMACO B EN EL TANQUE 58 Y PT	45
<b>TABLA 14.</b> NOMENCLATURA ASIGNADA EN CADA PUNTO DE MUESTRA	46
<b>TABLA 15.</b> RESULTADOS DE CADMIO PARA GRANO HUILA, SANTANDER Y PERÚ EN EL COOLER DE ENFRIAMIENTO	48
<b>TABLA 16.</b> RESULTADOS DE CADMIO PARA GRANO HUILA, SANTANDER Y PERÚ EN MOLINOS	49
<b>TABLA 17.</b> RESULTADOS DE CADMIO PARA GRANO HUILA, SANTANDER Y PERÚ EN EL TANQUE DE ACOPIO	49
<b>TABLA 18.</b> RESULTADOS DE CADMIO PARA GRANO HUILA, SANTANDER Y PERÚ EN MOLINOS DE REFINACIÓN	50
<b>TABLA 19.</b> RESULTADOS DE CADMIO PARA GRANO HUILA, SANTANDER Y PERÚ EN LA COCHA	50
<b>TABLA 20.</b> RESULTADOS DE CADMIO PARA GRANO HUILA, SANTANDER Y PERÚ EN TANQUE 58 Y PT	51
<b>TABLA 21.</b> RESUMEN DE LOS DATOS DE PRESENCIA DE CADMIO PARA EL CACAO Y LOS PRODUCTOS DEL CACAO.	55
<b>TABLA 22.</b> VALORES DE LA MATRIZ DE SELECCIÓN	68
<b>TABLA 23.</b> EVALUACIÓN CRITERIOS DE DECISIÓN	70
<b>TABLA 24.</b> SECUENCIA DE ALTERNATIVAS	72
<b>TABLA 25.</b> PARTES DEL FUNCIONAMIENTO DEL PIG EN UNA TUBERÍA	84
<b>TABLA 26.</b> DIMENSIONES DEL PIG	86

<b>TABLA 27. DIMENSIONES DE PIG SELECCIONADO</b>	87
<b>TABLA 28. RESULTADOS CÁLCULO DE LA POTENCIA</b>	93
<b>TABLA 29. RESULTADOS CALOR Y FLUJO MASICO DEL AGUA CALIENTE</b>	95
<b>TABLA 30. CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO</b>	98
<b>TABLA 31. CARACTERÍSTICAS TUBERÍA</b>	99
<b>TABLA 32. LONGITUDES TOTALES POR LA LÍNEA DE TUBERÍA</b>	100
<b>TABLA 33. MASA TOTAL POR LA LÍNEA DE TUBERÍA</b>	101
<b>TABLA 34. RESULTADOS TRAMOS VERTICALES LÍNEA 1, LÍNEA 2 Y LÍNEA 3</b>	103
<b>TABLA 35. RESULTADOS TRAMOS HORIZONTALES LÍNEA1, LÍNEA 2 Y LÍNEA 3</b>	105
<b>TABLA 36. RESULTADOS FUERZA POR CADA LÍNEA DE TUBERÍA</b>	105
<b>TABLA 37. NECESSARY DRIVING PRESSURES UNDER DIFFERENT FRICTION COEFFICIENTS</b>	106
<b>TABLA 38. PÉRDIDAS EN TUBERÍAS EN LAS LÍNEAS DE PRODUCCIÓN INTERVENIDAS</b>	107
<b>TABLA 39. PÉRDIDAS POR ACCESORIOS EN LAS LÍNEAS DE TUBERÍA INTERVENIDAS</b>	108
<b>TABLA 40. RESULTADOS FINALES FUERZA NECESARIA EN EL MOVIMIENTO DEL PIG</b>	109
<b>TABLA 41. RESULTADOS DE LA FUERZA DE FRICCIÓN EN LAS TUBERÍAS</b>	111
<b>TABLA 42. COMPARACIÓN DE LA FUERZA DE EMPUJE CON LA FRICCIÓN.</b>	112
<b>TABLA 43. COSTOS DE EQUIPOS, IMPLEMENTOS, ACCESORIOS Y TUBERÍA</b>	114
<b>TABLA 44. COSTOS DE MANO DE OBRA</b>	114
<b>TABLA 45. COSTO DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LAS ELECTROVÁLVULAS</b>	115
<b>TABLA 46. COSTO DEL CONSUMO ENERGÉTICO DEL COMPRESOR</b>	116
<b>TABLA 47. COSTOS DEL CONSUMO DE AGUA PARA LAVADO</b>	117
<b>TABLA 48. COSTOS DE MANTENIMIENTO PRIORITARIO</b>	118
<b>TABLA 49. DATOS PARA EL DESARROLLO DEL FLUJO DE CAJA</b>	119
<b>TABLA 50. FLUJO DE CAJA A DOS AÑOS</b>	119
<b>TABLA 51.INDICADORES DE VIABILIDAD DEL PROYECTO</b>	120
<b>TABLA 52. LICOR DE CACAO Y GRANO DE CACAO GASTADO EN EL PROCESO ACTUAL DE PURGA</b>	121
<b>TABLA 53. LICOR DE CACAO Y GRANO DE CACAO GASTADO EN EL PROCESO DE PURGA DE LAS TUBERÍAS INTERVENIDAS</b>	121
<b>TABLA 54. LICOR DE CACAO Y GRANO DE CACAO GASTADO EN EL PROCESO DE PURGA DE LOS TANQUES DE ACOPIO</b>	121

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1 MATRIZ CONCEPTUAL DE LAS ALTERNATIVAS A EVALUAR	129
ANEXO 2. MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO DE CALIDAD	132
ANEXO 3. MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO ECONÓMICO	133
ANEXO 4. MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO AMBIENTAL	134
ANEXO 5. MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO LEGAL	135
ANEXO 6.MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO SEGURIDAD Y SALUD	136
ANEXO 7. RESULTADO PRIORIZACIÓN DEL MÉTODO	137
ANEXO 8. CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LAS BOMBAS PARA LA LINEA 1,2 Y 3	138
ANEXO 9.TRANSFERENCIA DE CALOR EN TUBERÍAS ENCAMISADAS PARA EL LICOR DE CACAO	144
ANEXO 10. CALCULO DE LA FUERZA DE FRICCIÓN EJERCIDA POR EL LICOR DE CACAO DENTRO DE LA TUBERÍA	148
ANEXO 11. RECOMENDACIONES	154

## RESUMEN

Este trabajo presenta la selección de un método de limpieza, el cual se desarrolla para implementar en la empresa Luker Chocolate, se investigaron métodos mecánicos implementados en plantas de producción y métodos químicos para la realización de los pretratamientos en los granos de cacao, se analizaron mediante una matriz AHP (Analytic Hierarchy Process), teniendo en cuenta criterios de decisión como calidad, económico, legal, seguridad y salud en el trabajo y ambiental.

Según el análisis de los 10 métodos encontrados, se selecciona el método de limpieza Pig, el cual es un método mecánico implementado en las tuberías para su limpieza y se propone la instalación de este método en las tuberías que generan el aumento del cadmio; en el desarrollo de la propuesta se realiza una caracterización inicial del proceso, por medio de un método experimental, en el cual se tomaron muestras a la entrada y salida de los equipos de operación de Luker chocolate, con el análisis de estos datos, se seleccionaron las líneas de tuberías críticas del proceso de fabricación, concluyendo que entre los molinos de bolas a los tanque de acopio y entre los molinos refinadores a los tanque de acopio se genera la mayor concentración de cadmio, por ende el método seleccionado debe ser implementado en estos tramos de tubería.

Para llevar a cabo esta implementación a nivel industrial, se presentan las modificaciones necesarias de tuberías y accesorios adecuadas, además de las condiciones óptimas de operación de manera teórica y, por último, el análisis financiero que será evaluado por la empresa y definirá si la propuesta es viable para su debida aplicación.

**PALABRAS CLAVES:** Chocolate, Cadmio, Método de limpieza pig, Tuberías, proceso de manufactura.

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día, las industrias del país utilizan como materia prima insumos provenientes de los cultivos agrícolas, las plantaciones mediante su ruta de absorción de nutrientes, son propensas a adquirir contaminantes que posee el suelo, gracias a las actividades de origen natural conocidas como endógenas y mayormente a las actividades realizadas por los humanos conocidas como exógenas [1].

En el proceso de fabricación del chocolate, el cacao es el principal ingrediente para lograr la receta perfecta de las industrias dedicadas a su transformación, a pesar de ello, el grano de cacao es susceptible a adquirir bacterias, dioxinas, PCB “bifenilos policlorados” y metales pesados entre los cuales se encuentran en mayor proporción el cadmio, mercurio, cromo y plomo, según el Codex Alimentarius normatividad reconocida internacionalmente, se exige un mínimo de concentración de estos metales para obtener un producto de calidad para los consumidores.

Desde el 2015, la concentración del cadmio en el chocolate ha tomado mayor auge, las respectivas normativas, como el Codex Alimentarius y la regulación Europea, se han vuelto más rigurosas y estrictas, lo que ha ocasionado tomar medidas correctivas en los procesos de manufactura, una de las medidas que se han desarrollado es mezclas de los licores de cacao que previamente ya han sido analizados para determinar el cadmio, logrando así agregar al de mayor concentración de cadmio uno de más baja concentración de cadmio.

De la propuesta anterior se obtiene una mezcla que cumple con las especificaciones fisicoquímicas en cadmio del producto final, al utilizar este tipo de técnica se genera un gasto mayor de materia prima, al utilizar el doble de cacao en grano para obtener un solo batch de producto final, por lo que se tiene en cuenta que esta mezcla debe realizar una purga por las tuberías, con el fin de evitar la contaminación cruzada.



Las empresas que se enfrentan a este tipo de problemática del cadmio, por materias primas provenientes de la agricultura, deben implementar un método de limpieza más efectivo, que genere el menor gasto de recursos y así cumplir con la normatividad para el producto final; para ello, según las investigaciones realizadas se encontraron métodos de limpieza tanto mecánicos como químicos, con gran potencial de implementación en las industrias dedicadas a la transformación del grano de cacao.

Los métodos de limpieza mecánicos utilizan elementos neumáticos o eléctricos para eliminar cualquier contaminante que se encuentren en las tuberías, según la revisión bibliográfica, la limpieza por ultrasonido, por inyección de aire, por Pig, con vapor de agua, con agua ultra presión y limpieza CIP son algunos ejemplos; los métodos de limpieza químicos utilizan sustancias químicas fuertes ya sean ácidas o básicas, generalmente, estas sustancias se utilizan en las tuberías y equipos de la planta, pero en este caso específico, Luker Chocolate tiene como política que no puede ingresar ningún compuesto químico en su proceso, por ende se opta por buscar métodos de pretratamiento en el grano de cacao antes de ingresar al proceso de fabricación, como lo son: limpieza postcosecha, limpieza con micro nano burbujas, a partir de la alga *Chlorella sp* y limpieza con solución extractora de agua.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Evaluar una propuesta técnico-financiera de limpieza para los niveles de cadmio presentes en el proceso de producción del chocolate en la planta industrial de cacao de la empresa Luker chocolate, sede Bogotá.

### **Objetivos Específicos**

1. Identificar qué equipos impactan en el incremento actual de los niveles de cadmio en el proceso de producción del chocolate.
2. Seleccionar el método de limpieza para el proceso de producción del chocolate que contiene niveles de cadmio fuera de especificaciones.
3. Establecer las condiciones de operación del método de limpieza seleccionado.
4. Realizar la evaluación financiera de la propuesta planteada.

## **1. GENERALIDADES DEL CACAO, CADMIO Y CHOCOLATE.**

En el primer capítulo, se dará el contexto de las generalidades básicas del cacao, cadmio y chocolate, así mismo, como este metal pesado afecta el organismo causando graves enfermedades, la ruta de absorción de los contaminantes en el cultivo del cacao, los beneficios de consumir el chocolate como producto terminado, entre otros aspectos.

### **1.1. Características del cacao**

La región amazónica comprende países como Brasil, Venezuela, Ecuador, Perú y Colombia en donde crecen en sus bosques tropicales lluviosos, árboles ramificados con hojas y frutos carnosos de género "Theobroma", tiene su origen en la cuenca alta del río Amazonas, lugar comprendido por 3 países, Colombia, Perú, y Ecuador; los mayas y aztecas fueron las primeras tribus en descubrir y utilizar este producto en sus rituales, celebraciones y sacrificios [2].

Es conocido comúnmente como el cacao, siendo una de las materias primas más comercializadas a nivel mundial, principalmente por aplicaciones en industrias de alimentos en la producción de chocolate y sus derivados, industria cosmética en la elaboración de mascarillas, cremas y exfoliantes, así mismo se utiliza como medicina alternativa, brinda antioxidantes que ayuda al organismo a combatir el colesterol, la presión alta y proporciona minerales como el potasio y el calcio [3].

La plantación debe ser trabajada bajo condiciones específicas para obtener un cultivo fuerte y con las propiedades organolépticas presentes de manera significativa, la altitud no debe exceder los 1000 metros sobre el nivel del mar, en cuanto al clima, la temperatura debe estar entre 23 °C y 30°C, con una humedad relativa de 75 a 85 por ciento, el suelo se considera que debe ser arenoso y debe contar con un pH neutro, entre 4,5 a 6,8 [4].

El árbol del cacao se considera bajo, debido a que no supera alturas de 5.10 metros, florece sobre los tallos o troncos, su variedad tiende a perder las hojas durante un periodo

del año, sus ramas no exceden los 5 metros, sus hojas son grandes de color verde, el fruto puede variar de forma, se puede encontrar ovalados, alargados, esféricos [4].

El grano del cacao está compuesto principalmente por grasa, dependiendo del tipo de grano y de las condiciones ambientales del cultivo, puede estar entre un 50% y valores superiores del peso, en seguida se encuentran las proteínas y los compuestos nitrogenados como la cafeína, aproximadamente el 20% del grano corresponde a azúcares y almidón, encontrando en menor porcentaje las cenizas y el alcaloide Theobroma, el cual brinda el sabor amargo, con un 4% y 1% respectivamente [5].

A nivel mundial se encuentran tres variedades de cultivo, el primero del genotipo criollo los cuales son conocidos como “cacaos finos, de aroma o de alta calidad”, es el tipo de cacao más antiguo cultivado desde la colonización española, con un porcentaje de taninos más bajo en comparación con los demás tipos y sus plantaciones se expanden por toda América del sur; el segundo es el genotipo forastero considerado como el “cacao común”, representa aproximadamente el 90% de la producción mundial con cultivos en Brasil y África mayoritariamente, el sabor es poco grato y olor poco perceptible; por último el genotipo trinitario conformado por una mezcla entre las anteriores dos variedades, intensificando su propiedades organolépticas [1].

En Colombia, se evidencia el gran potencial agropecuario que posee este producto, encontrándose catalogado como cacao especial, según ICCO “international cocoa organization”, el 95% del cacao exportado por Colombia se considera como fino y de aroma, lo cual es un factor diferenciador ante los demás países, brinda beneficios económicos al país por cultivos de gran calidad apreciados a nivel nacional y mundial [1].

Luker Chocolate, industria colombiana, utiliza como principal materia prima los granos de cacao provenientes de plantaciones nacionales de ciudades como el Huila, Tumaco, Santander, Manizales y Arauca, para obtener al máximo la calidad y ventajas de estos genotipos para la fabricación de sus líneas de productos como chocolates y cocoas.

## 1.2. Contaminantes del cacao

El suelo es la capa más exterior que posee la tierra, el recurso natural es la base para diferentes labores primarias, actividades fundamentales para el desarrollo de la población, uno de los sectores más grandes es el agrícola, este sector brinda alimentos de tipo vegetal por medio de cultivos para todos los seres vivos, por el contrario, el sector pecuario brinda soporte en productos de carácter animal, así mismo se realizan actividades como la apicultura, horticultura, avicultura y soporta muchos de los procesos industriales [2].

Tiene un papel fundamental al contribuir en la mitigación de los efectos del cambio climático; brinda soporte a todo el ecosistema abasteciendo de nutrientes y agua a los seres vivos, lo cual incluye la población animal y los cultivos; además de ser la base para el crecimiento de diferentes tipos de organismos, entre ellos bacterias, hongos y pequeños animales, los cuales ayudan a mantener la fertilidad de la tierra para las cosechas [2].

Los recursos naturales están expuestos a contaminación diariamente, el suelo mediante operaciones biológicas, físicas y químicas afecta negativamente, en esta problemática se evidencian fuertes actividades externas hechas por el hombre y la industria como el mal manejo y disposición de los residuos provenientes de las fábricas y hogares, muchas de las emisiones de gases de efecto invernadero no son controladas eficientemente enviándolos a la atmósfera y el uso inadecuado de pesticidas y/o abonos que impactan directamente al suelo [6].

El suelo, es considerado un gran receptor de sustancias dañinas y tóxicas por su capacidad de acumular, puesto a que se encuentra en una gran extensión del planeta y el contacto con los demás ecosistemas es inminente, lo que puede causar que se acumule en un periodo considerable de tiempo, quedando retenidos en la tierra y por ende la posibilidad de absorción e incorporación en los cultivos, contemplado la incorporación en los demás medios [7].

Se considera a los metales pesados uno de los mayores contaminantes de este ecosistema, encontrándose en cinco categorías: cationes, metales nativos, oxoaniones, halogenuros y compuestos organometálicos, estos contaminantes son aportados de forma endógena cuando es de origen natural o de forma exógena cuando es afectado por las actividades humanas, los contaminantes se transportan por las raíces de los cultivos o lixiviados hasta los acuíferos siendo un proceso tóxico para las plantas, animales y seres humanos [1].

El grano de cacao al ser una plantación de carácter agrícola es propenso a adquirir mediante sus raíces todos los contaminantes que posee el suelo. En Colombia, por ejemplo, se ha identificado que el cadmio, mercurio, cromo y plomo se encuentran en mayor proporción, mientras que, metales como el zinc, hierro, cobre y níquel se encuentran en menor cantidad [8], esto afecta directamente las propiedades fisicoquímicas del cultivo, lo cual requiere un tratamiento postcosecha.

Luker chocolate, al utilizar como materia prima principal los granos de cacao provenientes de cultivos y plantaciones expuestas a los diferentes contaminantes que tiene el suelo, se convierte en una fuente potencial no solo de metales pesados, sino también de bacterias, dioxinas y PCB “bifenilos policlorados” [9], evidenciándose en la recepción de este insumo; el proceso inicia con la recepción de la materia prima la cual pasa a una unidad de limpieza, removiendo los contaminantes más superficiales con los que pueda venir desde el cultivo, así mismo se realiza un análisis fisicoquímico de la materia prima, la cual incluye la valoración del cadmio para conocer su concentración, siendo esta una de las variables más crítica para obtener la producción deseada.

### 1.3. Características el cadmio

Es un metal dúctil y maleable, de color blanco con un ligero matiz azulado, su peso molecular es de 112,4g/mol, con punto de fusión y de ebullición de 320.9°C y 765°C respectivamente, no es un compuesto esencial para las plantas y su absorción es a través de los iones  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  por el sistema radicular, luego por el xilema hasta las hojas y por ultimo por el floema hasta los frutos [5].

Antiguamente, era utilizado para recubrir otros metales como el hierro, protegiéndolo de la corrosión al formar una capa química resistente, así mismo es usado como un reactivo en la industria al formar aleaciones entre metales que intensifican las propiedades de los materiales, como poder aumentar el punto de fusión, además, por la capacidad que tiene de absorber neutrones, es utilizado en las baterías y recubrimientos de reactores; se utilizan compuestos que contengan cadmio para diferentes fabricaciones, como por ejemplo las pilas recargables que poseen muchos electrodomésticos, las cuales son a base de sulfuro de cadmio, por otra parte, con el cloruro de cadmio, se puede obtener pinturas, vidrios, porcelanas y fuegos artificiales [7].

El cadmio, es considerado uno de los metales más tóxicos encontrado libremente en la naturaleza, con una larga vida media aproximadamente de 30 a 40 años y una gran capacidad para ser acumulada por los seres vivos, proveniente de dos fuentes, la primera de origen litológico, es decir rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, siendo la actividad volcánica la mayor fuente de emisión al ecosistema, además se puede encontrar en el plomo y cobre en bajas concentraciones [7].

La segunda fuente, la cual genera mayor contaminación proviene de actividades industriales como la minería, la metalurgia, incineración de residuos y fabricación de fertilizantes, puede recorrer grandes distancias a través del aire depositándose en organismos vivos y es más bajas concentraciones en cultivos, dependiendo de factores como el potencial redox, el pH, la cantidad de biomasa, la presencia de arcilla y óxidos de hierro [7].

La concentración de cadmio se ve directamente afectada por el pH en el cual se encuentre, cuando se trata de suelos ácidos, la biomasa y los compuestos que contienen en su fórmula molecular como lo son tres átomos de oxígeno, junto con dos átomos de cualquier otro elemento de la tabla periódica, domina la solubilidad del cadmio, mientras que, en los suelos de carácter básico, el cadmio tiende a formar precipitados insolubles de compuestos como fosfatos y carbonatos [7].

El metal, puede ser extraído del suelo, en la mayoría de las oportunidades es retenido por el material vegetal, al ser absorbido por los cultivos este se transporta y es almacenado en las plantas; así mismo se da el proceso de lixiviación, en donde el cadmio se difunde en algún medio líquido que posea la tierra, en general se considera el agua como vehículo principal de esta acción [7].

El cadmio es absorbido por la planta del cacao a través de la raíz, como consecuencia de la combinación de procesos naturales e industriales, algunos de ellos como la actividad de los volcanes, los incendios forestales, la erosión, prácticas agrícolas, procesos industriales, este tipo de cultivos presenta problemas como la reducción de actividad fotosintética, baja absorción de agua y de nutrientes [10].

#### **1.4. Como afecta el cadmio al ser humano**

El cadmio es considerado uno de los metales más tóxicos con una alta capacidad de absorción en los seres vivos aproximadamente del 1% al 5% es por medio de ingestión mientras que alrededor del 30% al 50% es por vías respiratorias [7] , este es transmitido a los seres humanos en su mayoría por la dieta, debido a que gran parte de los alimentos provienen de la agricultura en donde se transmite el contaminante por medio del contacto entre las raíces del cultivo con la tierra fértil donde se cosecha, en segundo lugar, a causa de los aerosoles que poseen este compuesto al ser esparcido en el ambiente es rápidamente trasladado en el aire e inhalado por el organismo.



Los alimentos como verduras, hortalizas, pescados, mariscos, crustáceos, legumbres, frutos secos, tubérculos, viseras de animales, algas, semillas oleaginosas, cacao y cereales se consideran los de mayor concentración en cuanto a cadmio, según la EFSA “European Food Safety Authority”, las patatas ocupan el 13,2%, el pan 11,7%, productos de bollería y pastelería el 5,1%, el chocolate con un 4,3%, los vegetales de hoja 3,9% y los moluscos acuáticos un 3,2% porcentajes de alimentos que aportan a la dieta el contaminante siendo los más expuestos al metal [11].

Los comestibles para el ser humano que contienen concentraciones elevadas de cadmio, afectan al riñón como órgano principal, causando insuficiencia renal, provocando que los procesos de eliminación de desechos y el equilibrio de los diferentes fluidos del organismo se vean altamente comprometidos con el buen funcionamiento del sistema urinario; se evidencia que el consumo de estos alimentos, los huesos pierden su fuerza y vitalidad, lo cual provoca que las fracturas ocurran con más facilidad, generando enfermedades como osteoporosis y osteomalacia; se puede presentar dolor en las articulaciones y formación de cálculos renales; puede causar malestar estomacal grave generando vómito y diarrea [7].

También, altera las rutas bioquímicas del cuerpo humano, con su afinidad por los radicales que poseen los nucleofílicos de las proteínas, tomando el lugar de los esenciales en la unión con las enzimas como, por ejemplo, el transporte del cobre al interior de las células; puede tomar el lugar de los diferentes metales que se consideran vitales para el organismo como el hierro y el calcio, y además, el cadmio ha sido clasificado como un contaminante y agente cancerígeno de tipo I por IARC “International Agency for Research on Cancer” [7].

## 1.5 Caracterización del chocolate

A partir del cultivo de cacao se obtiene la masa y la manteca del cacao, que al ser mezclada con azúcar forman la combinación básica para la elaboración de los diferentes tipos de chocolate, al agregar a esta mezcla leche, colorantes, frutos secos, saborizantes en diferentes proporciones se obtienen los productos comercializados actualmente, como por ejemplo, la vainilla adicionada para darle un olor agradable o la lecitina de soya brindándole la propiedad de viscosidad al chocolate, esto depende de la receta que posean las industrias chocolateras.

El chocolate en el proceso de fabricación pasa por diferentes etapas, fermentación, secado, tostado, amasado y moldeado el cual define la forma final del producto terminado, existen dos tipos generales de chocolate, el primero el chocolate negro conocido como chocolate amargo, al cual no se le añade ningún tipo de materia prima adicional, se trata de la combinación básica ajustando los porcentajes de la formulación para caracterizarlo, el segundo tipo es el chocolate blanco, el cual es a base de manteca de cacao, leche y azúcar, sus anteriores ingredientes logran que el esta clasificación no posea el sabor amargo del cacao [12].

Gracias a su composición aporta leche, carbohidratos, vitaminas como el ácido fólico y palmitato de retinol, minerales como el calcio, proteínas, grasas, fibra y almidón a la dieta, además de aportar una gran cantidad de energía al organismo aproximadamente 500 kcal por cada 100g de producto, así mismo posee antioxidantes que protegen al sistema circulatorio, previene y reduce el síndrome de fatiga crónica, es estimulador cerebral, antitusígeno, antidiarreico y anticancerígeno.

## **2. PRODUCCIÓN EN LA PLANTA DE LUKER CHOCOLATE**

En el presente capítulo, se presenta el proceso actual de manufactura que tiene Luker Chocolate en sus líneas de producción, al realizar los balances de materia en cada etapa del proceso de fabricación del chocolate, como lo son: la limpieza, maquina infrarroja, descascarillado, tostador, molienda principal, molinos refinadores y conchado, así mismo se presenta la parte experimental del proyecto en donde la toma de muestras es fundamental para censar el proceso de producción y obtener los puntos críticos de aumento de concentración de cadmio, por último se presenta la normatividad vigente para la industria chocolatera en cuanto a la especificaciones de cadmio en el producto terminado.

### **2.1. Proceso de producción de chocolate**

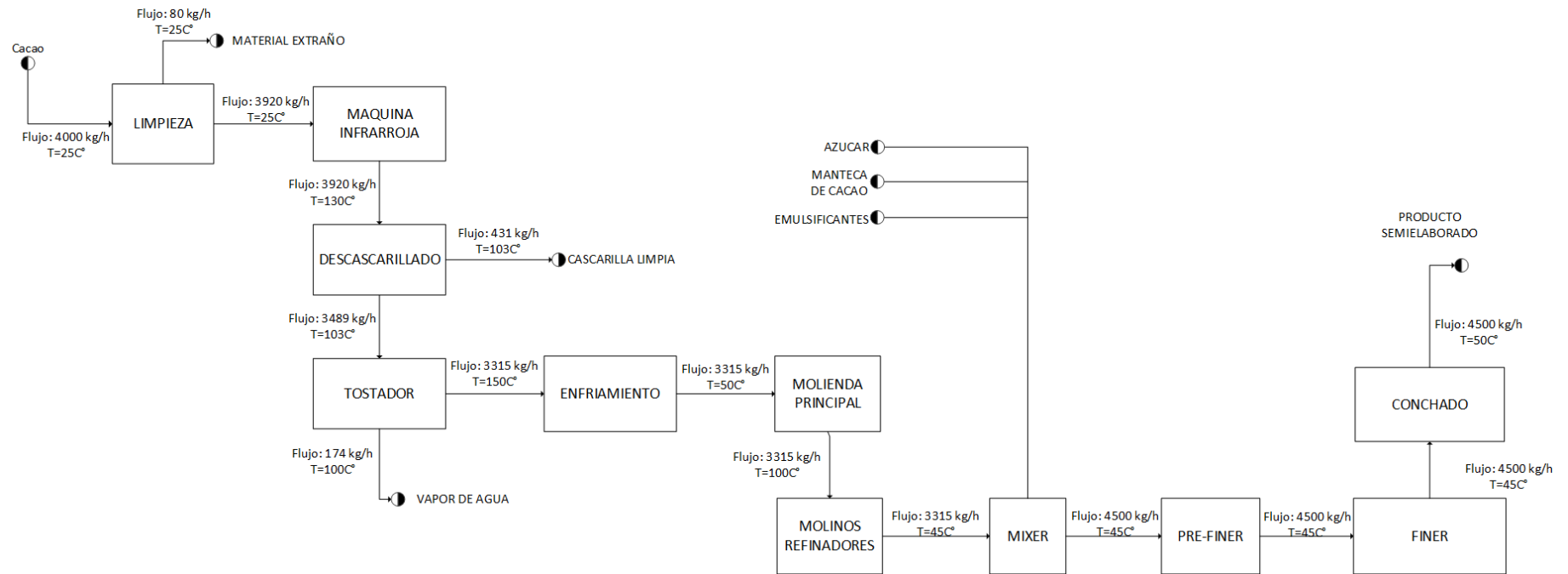
#### **2.1.1. Coberturas reales**

Proceso de elaboración del Chocolate:

El buen manejo en la calidad de la materia prima, grano de cacao, es primordial para obtener buenos resultados al momento de obtener el producto de interés, en este caso llamado Chocolate. Depende de la selección de la semilla, el fermentado, el secado y la completa manipulación en el proceso de fabricación, serán los resultados que se entregan al consumidor. Las fases en la fabricación del chocolate son:

**Figura 1.**

*Proceso de producción del chocolate*



**Nota.** La figura representa el diagrama de flujo en el proceso de la elaboración del chocolate industrial.

- Limpieza: Está en la primera etapa del proceso de producción, el grano de cacao llega como materia prima y se alimenta a la rejilla del equipo, el cual se encarga de eliminar las impurezas como piedras, cabuyas, metales o material extraño con los cuales pueda llegar el cacao en grano de parte del proveedor, el producto llega en sacos o bultos.
- Tratamiento térmico: En esta etapa el grano de cacao pasa por una máquina de rayos infrarrojos, con la función de eliminar la humedad entre la cascarilla y el nibs de cacao, que provoca una ligera expansión en el volumen del grano de cacao y así lograr el famoso efecto “POP”.
- Descascarillado: Este proceso cumple el objetivo de desprender la cascarilla del nibs de cacao, gracias a que el grano de cacao ya viene inflado del proceso anterior, la cascarilla desprendida se aspira y se retira hacia un ciclón, por otro lado, el nibs de cacao por medio de tamices se clasifican por tamaño y se envía a tolvas de almacenamiento que alimentan el proceso siguiente.
- Tostado: Es el principal proceso en la producción, aquí el nibs de cacao ya clasificado se tuesta a diferentes temperaturas y desarrolla los sabores, grado de acidez, color y compuestos aromáticos que caracterizan el licor de cacao, el tiempo de residencia del producto dentro del equipo es de 15-20 minutos.
- Enfriamiento: Luego de tostarse el nibs de cacao, pasa al proceso de enfriamiento, esta etapa es importante y esencial dentro del proceso de producción, el producto (nibs de cacao tostados) dura un tiempo determinado entre 20-25 minutos, el objetivo de esta etapa es lograr bajar la temperatura del producto hasta llegar a un valor aproximado de 50 °C.
- Molienda principal: En esta etapa el nibs de cacao llega a una temperatura de 50C° pasa por el proceso de molienda, el cual lo compone dos molinos, el primero es de cuchillas y el segundo de bolas; cumple con la función de quebrantar los enlaces moleculares de las partículas sólidas, provocando así que el estado sólido del nibs pase a ser líquido y se transforme en licor de cacao, con un tamaño de partícula de 75 µm [12].

- Molienda Refinadora: Para el proceso de coberturas reales esta etapa es fundamental, el licor de cacao que sale de molienda principal se convierte en la materia prima más importante, con lo cual este debe llevar unas características específicas en su granulometría logrando llegar a un valor de 25 micras en el tamaño de partícula del licor de cacao, esta es la única función que cumple la molienda refinadora, pasar de 75 a 25  $\mu\text{m}$  el tamaño de partícula del licor de cacao.
- Mixer: Aquí todos los ingredientes adicionales al licor de cacao refinado, como el azúcar, manteca de cacao, leche, entre otros; se mezclan hasta lograr la homogeneidad de la masa, el tiempo de residencia es de 8 minutos incluyendo el tiempo de carga, descarga y mezclado del equipo.
- Pre-Finer: En este proceso, la masa que sale homogenizada del mixer ingresa al equipo pre-finer, con el fin de calibrar el azúcar cristal contenida en ella; durante la trituración del azúcar, esta se humecta y se aromatizan las superficies partidas (amorfas) al mismo tiempo.
- Finer: Este proceso cumple la función de reducir el tamaño de partícula de toda la masa que sale del pre-finer exactamente a 25  $\mu\text{m}$ , con ayuda de cinco rodillos a elevadas presiones y temperatura controlada [12].
- Conchado: Este proceso se lleva a cabo en una máquina con capacidad de 4000 a 4500 kg de masa de chocolate a una temperatura de 80 °C. Durante este proceso la masa se agita y amasa con ayuda de paletas mecánicas instaladas dentro del equipo; en esta fase se producen las reacciones de caramelización, evaporando la humedad retenida y eliminando los ácidos volátiles que quedan en el chocolate excluyendo así los sabores indeseados [12].
- Atemperado: Este procedimiento cumple la función de enfriar y calentar la mezcla para que la cristalización de la manteca sea estable. Consiste en la reducción de la temperatura del chocolate, lo cual garantiza la cristalización de una cantidad mínima de manteca en cristales del tipo estable, aproximadamente del 1%, mientras que los cristales del tipo inestable están listos para ser moldeados. Después se vuelve a calentar sin sobrepasar los 35 °C, para volver a darle fluidez,

y así evitar que se funda la grasa cristalizada. En este momento el chocolate está a punto para ser moldeado [13].

- Moldeo: Este proceso consiste en inyectar el chocolate sobre una banda o sobre un molde, luego pasa por un proceso de vibración para eliminar las burbujas de aire retenidas al momento de la inyección, posteriormente pasa a un túnel de enfriamiento para el desmoldeo y su respectivo empaque.

### **2.1.2. Reología**

En el proceso de manufactura del chocolate se deben tener en cuenta diferentes factores que garanticen la funcionalidad del producto final, el comportamiento reológico es primordial y va directamente relacionado con el límite de fluidez y viscosidad, con ello se garantiza las propiedades del flujo para cada tipo de chocolate [14].

Factores como la humedad, la temperatura, el contenido de grasa, la adición de emulsificantes y la distribución del tamaño de partícula pueden modificar el comportamiento reológico del chocolate, por ejemplo, al adicionar más contenido de grasa el producto en proceso se vuelve más delgado reduciendo la reología y por ende logrando que fluya fácilmente [14].

La fabricación del chocolate depende del conchado y atemperado como etapas cruciales para la calidad del producto terminado, en el proceso de conchado el licor de cacao se encuentra fundido, eliminando la humedad de la mezcla, que podría afectar la textura y cristalización de la masa y en efecto alterar el flujo de la misma, así mismo logra una compresión ideal para iniciar óptimamente el proceso de atemperado, el cual generalmente consta de dos etapas, la primera es una pre cristalización en donde se adicionan aditivos con el fin de ajustar la reología de la masa cuando se está enfriando y luego se produce la segunda etapa en donde se endurece totalmente [15].

Generalmente al adicionar azúcar como ingrediente fundamental del chocolate, se afecta la distribución del tamaño de partícula mucho mayor que el licor de cacao en ese momento del proceso, al tratarse de una fase hidrofílica que no puede disolverse en la

fase continua hidrofóbica del licor de cacao, por medio de las fuerzas de cizalla controladas se logra quebrar las partículas de azúcar y desintegrar los posibles grumos obteniendo un valor mínimo de  $25\mu\text{m}$ , cuando la proporción entre azúcar y licor de cacao no son las adecuada esta etapa del proceso suele ser inoperativo, por ende la adición de emulsificantes como la lecitina de soya logran disminuir considerablemente la viscosidad y el límite de fluidez [15].

En Luker chocolate, la primera parte del proceso que comprende las etapas de limpieza, tratamiento térmico, descascarillado, tostado y enfriamiento, son etapas donde no se considera el comportamiento reológico debido a que trabajan con el grano de cacao o nibs sólido, al continuar con el proceso en molienda principal se genera la transformación física de la materia prima, en donde se considera el licor de cacao como una mezcla viscosa, donde la reología afectará directamente el paso continuo por los equipos y tuberías de la empresa.

En primer lugar se considera la acción de la temperatura sobre las variables de viscosidad y fluidez, la cual es despreciable al contar con tuberías enchaquetadas que mantendrán el fluido en condición de temperatura óptima, en segundo lugar, se contempla la adición de emulsificantes en el mixer para lograr la reducción de viscosidad y del límite de fluidez , y por último, el conchado se considera la eliminación de la humedad retenida, esta etapa es crucial para el proceso ya que según su porcentaje de licor de cacao y manteca de cacao que contenga, determinara el límite de fluidez y la viscosidad.

Entre más licor de cacao y menor manteca, el límite de fluidez será menor y la homogeneidad de la mezcla será gruesa, por el contrario, entre menos licor de cacao y mayor manteca, el límite de fluidez será mayor y la homogeneidad de la mezcla será fina.



## 2.2. Balance de materia

En Luker chocolate se cuenta con un proceso semicontinuo, en las etapas del proceso se manejan procesos continuos exceptuando las etapas de tostado y conchado, las cuales son la etapa de restricción y se maneja un proceso Batch, estas dos condicionan el proceso; para tener la operación en continuo, se contemplan tanques de almacenamiento antes de cada operación que almacenan el producto mientras se realiza la operación Batch.

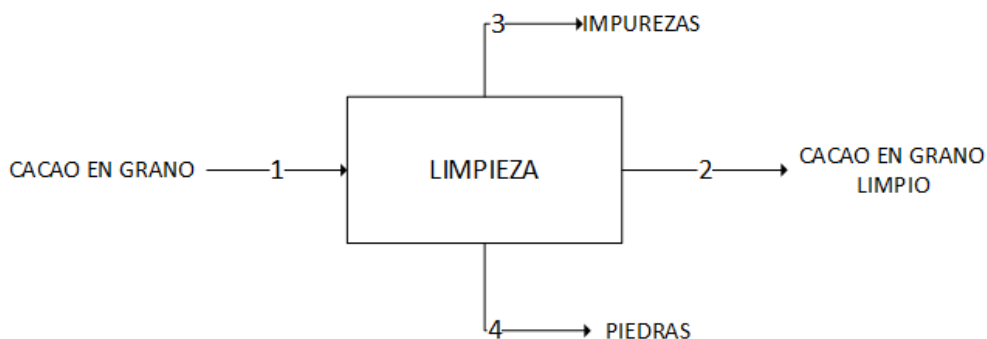
### 2.2.1. Limpieza

En esta etapa del proceso el cacao en grano ingresa en bultos de 25 kg, en el equipo se retira todo el material menos denso que los granos de cacao aspirándolo, siendo un 0,5% de pérdida en peso y en el fondo del equipo, sale aire logrando así hacer flotar los granos de cacao y movilizándose a la salida, al mismo tiempo todo el material más denso que el cacao como las piedras cae sobre el fondo y se retira en una tolva aparte, esta pérdida corresponde al 1,5% del peso total.

El balance de materia se describe a continuación:

#### Figura 2.

Balance de masa Etapa Limpieza



**Nota.** La figura representa las corrientes de entrada y salida en el proceso de limpieza.

**Tabla 1.**

*Balance de masa Etapa Limpieza*

ENTRADAS			SALIDAS		
Corriente	Componentes	Caudales Másicos (Kg/h)	Corriente	Componentes	Caudales Másicos (Kg/h)
1	Cacao en grano	4000	2	Cacao en grano limpio	3920
Total		4000	3	Impurezas	20
			4	Piedras	60
			Total		4000

**Nota.** La tabla representa el balance de materia en la etapa de limpieza

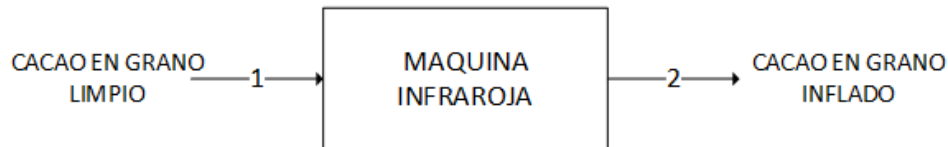
### **2.2.2. Máquina infrarroja**

La etapa infrarroja tiene como objetivo evaporar el agua que se encuentra entre la superficie del nibs de cacao y la cascarilla, para lograr así el efecto “pop” en el cacao en grano, el equipo opera a una temperatura de 129 °C y a una presión de vacío de -0.1 bar, el tiempo que demora el cacao en grano en pasar por todo el equipo es de 4 min, se transporta por medio de bandas helicoidales y el calor se transmite por radiación desde unas placas cerámicas hasta el producto.

El balance de materia se describe a continuación:

#### **Figura 3.**

*Balance de masa Etapa Máquina infrarroja*



**Nota.** La figura representa las corrientes de entrada y salida en la etapa máquina infrarroja.

**Tabla 2.**

*Balance de masa etapa máquina infrarroja*

ENTRADAS			SALIDAS		
Corriente	Componentes	Caudales Másicos (Kg/h)	Corriente	Componentes	Caudales Másicos (Kg/h)
1	Cacao en grano	3920	2	Cacao en grano inflado	3920
Total		3920	Total		3920

**Nota.** La tabla representa el balance de materia en la etapa de maquina infrarroja

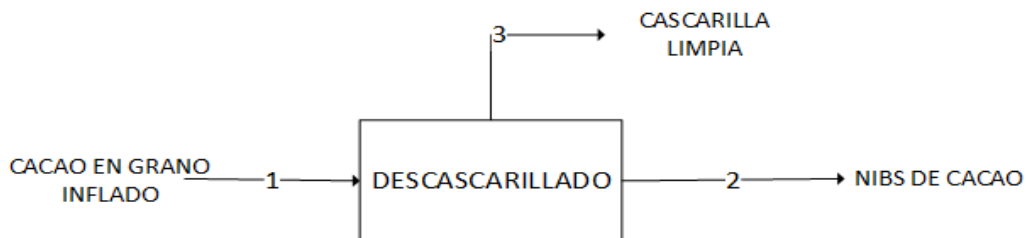
### 2.2.3. Descascarillado

En el descascarillado el cacao en grano llega inflado de la etapa anterior, con el fin de facilitar el desprendimiento de la cascarilla en el nibs de cacao, en esta etapa es donde se genera la mayor merma del proceso, logrando un porcentaje de pérdida en el peso del 11%, la cascarilla que se desprende se envía a un ciclón en donde tiene como procedimiento empacarse en bultos para así ser vendida; mientras que el nibs de cacao es enviado a tolvas de almacenamiento para alimentar la siguiente etapa en el proceso y generar un flujo continuo.

El balance de materia se describe a continuación:

**Figura 4.**

*Balance de masa Etapa Descascarillado*



**Nota.** La figura representa las corrientes de entrada y salida en la etapa de descascarillado.

**Tabla 3.***Balance de masa Etapa Descascarillado*

ENTRADAS			SALIDAS		
Corriente	Componentes	Caudales Másicos (Kg/h)	Corriente	Componentes	Caudales Másicos (Kg/h)
1	Cacao en grano inflado	3920	2	Nibs de cacao	3489
Total		3920	3	Cascarilla Limpia	431
			Total		3920

**Nota.** La tabla representa el balance de materia en la etapa de descascarillado

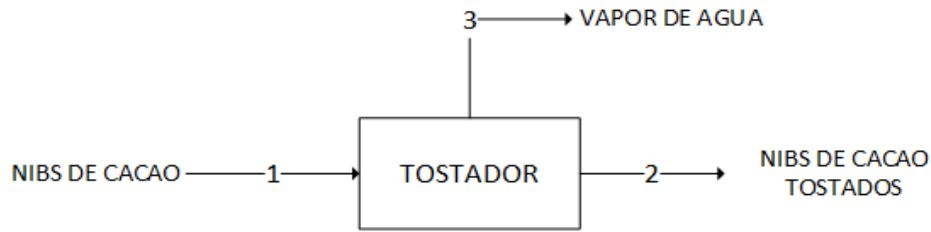
#### **2.2.4. Tostador**

La etapa de tosti3n es la m3s importante en todo el proceso, ya que aqu3 se producen todas las cualidades arom3ticas y el sabor caracter3stico del producto; el proceso se lleva a cabo autom3ticamente a una temperatura de aproximadamente 130 3C durante 15-20 minutos [12]. Durante la tosti3n tambi3n se generan p3rdidas de peso, debido a que por las altas temperaturas y el tiempo de residencia del producto dentro del equipo la humedad del nibs de cacao se reduce, evaporando el agua que se encuentra en la semilla, las p3rdidas logran un valor del 5% del peso total.

El balance de materia se describe a continuaci3n:

**Figura 5.**

*Balance de masa Etapa tostador*



**Nota.** La figura representa las corrientes de entrada y salida en la etapa de tostión.

**Tabla 4.**

*Balance de masa Etapa Tostador*

ENTRADAS			SALIDAS		
Corriente	Componentes	Caudales Másicos (Kg/h)	Corriente	Componentes	Caudales Másicos (Kg/h)
1	Nibs de cacao	3489	2	Nibs de cacao tostados	3315
Total		3489	3	Vapor de agua	174
			Total		3489

**Nota.** La tabla representa el balance de materia en la etapa del tostador

### **2.2.5. Molienda principal**

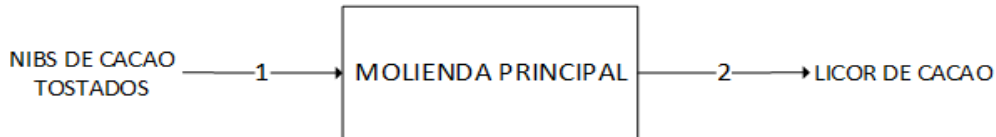
En esta etapa de molienda ocurre la transformación de la materia esencial para la producción del chocolate o coberturas reales, en este proceso no se generan pérdidas en peso pero si pasa la materia de estar en un estado sólido a líquido, es decir, el nibs de cacao se convierte en licor de cacao, la presión y la fricción intervienen como variables importantes en el proceso y producen un producto que tiene como característica principal

el tamaño de partícula, ya que a la salida de esta etapa el licor sale a 75 micras; el equipo opera a una temperatura de 100 °C y con un flujo continuo [12].

El balance de materia se describe a continuación:

**Figura 6.**

*Balance de masa Etapa molienda principal.*



**Nota.** La figura representa las corrientes de entrada y salida en la etapa de molienda principal.

**Tabla 5.**

*Balance de masa Etapa Molienda principal*

ENTRADAS			SALIDAS		
Corriente	Componentes	Caudales Másicos (Kg/h)	Corriente	Componentes	Caudales Másicos (Kg/h)
1	Nibs de cacao tostados	3315	2	Licor de cacao (75 micras)	3315
Total		3315	Total		3315

**Nota.** La tabla representa el balance de materia en la etapa de molienda principal

### 2.2.6. Molinos refinadores

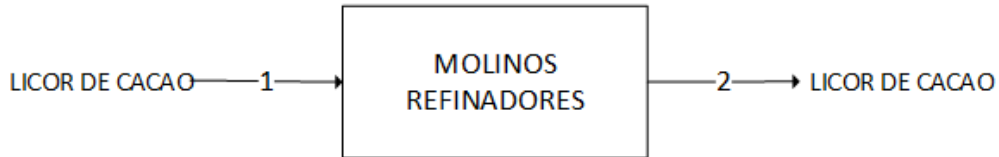
Este proceso cumple el objetivo de reducir el tamaño de partícula del licor de cacao, de 75 micras a 25 micras, con ayuda de elevadas presiones generadas por bolas de acero dentro del equipo [12], ya que para la etapa del conchado todos los ingredientes deben estar con el mismo tamaño (25 micras); en esta etapa no se generan pérdidas de peso

sino un cambio físico, el equipo opera a 90 °C automáticamente y el producto a la salida se almacena en tanques para la alimentación del siguiente proceso.

El balance de materia se describe a continuación:

**Figura 7.**

*Balance de masa Etapa molinos refinadores*



**Nota.** La figura representa las corrientes de entrada y salida en la etapa de molinos refinadores.

**Tabla 6.**

*Balance de masa Etapa Molinos Refinadores*

ENTRADAS			SALIDAS		
Corriente	Componentes	Caudales Másicos (Kg/h)	Corriente	Componentes	Caudales Másicos (Kg/h)
1	Licor de cacao (75 micras)	3315	2	Licor de cacao (25 micras)	3315
Total		3315	Total		3315

**Nota.** La tabla representa el balance de materia en la etapa de molinos refinadores

### **2.2.7. Conchado**

En esta etapa del proceso se calienta una masa de 4500 kg comprendidos entre licor de cacao que corresponde al 73.7%, manteca de cacao que corresponde al 16.5%, azúcar blanca que corresponde al 9% y emulsificantes que corresponde al 0.8% a una temperatura entre 50 °C y 60 °C; durante este proceso se agita y se mezclan todos los

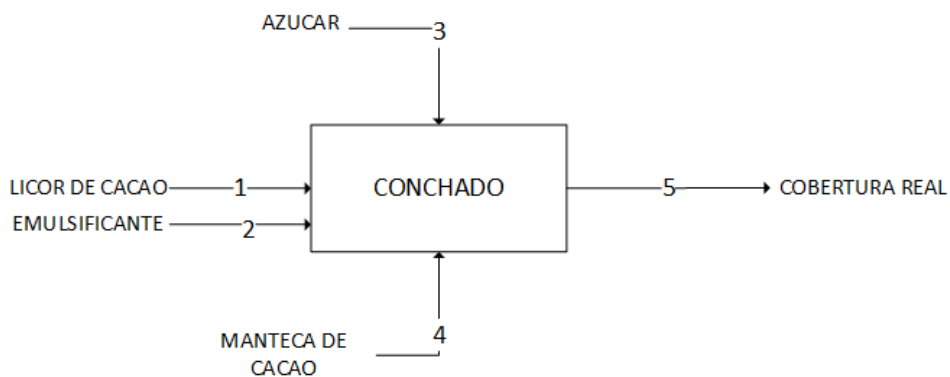
ingredientes con ayuda de paletas mecánicas instaladas dentro del equipo, con el objetivo de obtener la textura adecuada de la masa de chocolate o cobertura real [12].

En esta etapa, no se generan pérdidas de peso sino al contrario se aumenta el volumen del batch, debido a la adición de los demás ingredientes que corresponden a cierto porcentaje del bache a producir, el tiempo de residencia de la masa de chocolate o cobertura real dentro de la concha depende del tipo del producto, pero varía entre 4 horas y 8 horas generalmente.

El balance de materia se describe a continuación:

**Figura 8.**

*Balance de masa Etapa Conchado*



**Nota.** La figura representa las corrientes de entrada y salida en la etapa de conchado.



**Tabla 7.**

Balance de masa Etapa Conchado

ENTRADAS			SALIDAS		
Corriente	Componentes	Caudales Másicos (Kg/h)	Corriente	Componentes	Caudales Másicos (Kg/h)
1	Licor de cacao (25 micras)	3315	5	Cobertura Real	4500
2	Emulsificante	37	Total		4500
3	Azúcar	405			
4	Manteca de cacao	743			
Total		4500			

**Nota.** La tabla representa el balance de materia en la etapa de conchado.

### 2.3. Estado actual del cadmio en la planta de Luker Chocolate

Dentro del proceso de elaboración del chocolate en la empresa Luker Chocolate se encuentra el área de semi elaborados y de inyección, lo primero que se debe determinar son los puntos críticos dentro del proceso y así identificar los puntos en donde los niveles de cadmio en los nibs, licor de cacao y chocolate se aumentan. El procedimiento que se siguió fue el siguiente:

- a. Escoger los cacaos origen que requieren según normatividad el nivel de cadmio más bajo en sus productos finales, los cacaos son los de origen Tumaco, Huila, Santander y Perú.
- b. Muestrear el cacao en grano antes de entrar a la planta industrial, para conocer con qué nivel de cadmio llega el cacao antes de iniciar el proceso industrial.
- c. Tomar muestras en los equipos donde el cacao ya se encuentra como nibs de cacao, es decir, a partir del tostador en adelante; los equipos seleccionados son: Cooler de enfriamiento, Molinos de bolas, Tanque de acopio 28,50 y 107, Molinos refinadores, Conchas, Tanque 58 y producto final al salir de la línea de inyección.

### 2.3.1. Toma de muestras en coberturas de Tumaco, Huila y Santander

Para la toma de muestras se escogieron dos lotes según la campaña de producción y junto con el área de planeación de la empresa Luker chocolate, uno en donde se programó la producción del licor de cacao Tumaco B y el otro lote la producción del licor MC-45 (Cacaos Huila, Santander y Perú); se tuvo en cuenta que la producción de ambos licores no es tan seguida, aproximadamente se realiza cada 15 días.

#### Cacao Tumaco:

El cacao Tumaco es la base fundamental para la cobertura de chocolate Lovers, la cual es exportada hacia los Estado Unidos, en donde por normatividad debe tener un valor máximo de 0.45 ppm de Cadmio como producto final, los resultados se presentan en tablas y por equipos a continuación:

\* Los valores se presentan en unidades de ppm (partes por millón) y el análisis se realizó en el laboratorio de calidad en la empresa Luker chocolate.

**Tabla 8.**

*Resultados de Cadmio para grano Tumaco B en el Cooler de enfriamiento*

COOLER DE ENFRIAMIENTO			
BACHE	INICIO	MITAD	FINAL
1	0,72	0,59	0,92
2	0,56	0,55	0,68
3	0,62	0,64	0,58
4	0,54	0,72	0,53
5	0,53	0,53	0,84

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados de las muestras tomadas en el equipo Cooler.

En la Tabla 8. se muestran los resultados de cadmio en el lote de producción, se realizaron 5 baches de nibs de cacao tostados, en los cuales para poder identificar un

nivel de cadmio completo de toda la producción se tomaron muestras de inicio, mitad y final en cada bache.

**Tabla 9.**

*Resultados de Cadmio para grano Tumaco B en Molinos*

MOLINOS DE BOLAS	
Inicio	0,75
2.500 kg	0,68
5.000 kg	0,56
7.500 kg	0,64
10.000 kg	0,51
12.500 kg	0,63
14.600 kg	0,64

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados de las muestras tomadas en los equipos de molienda.

En la Tabla 9. se muestran los resultados de cadmio de todo el lote de producción, se decide tomar muestra del licor de cacao en el tiempo cero y cada 2.500 kg hasta finalizar la producción en esta etapa, en total son 7 muestras debido a que la producción total de ese lote eran 14.600 kg.

**Tabla 10.**

*Resultados de Cadmio para grano Tumaco B en el Tanque de acopio*

TANQUE ACOPIO		
BTQ 28	BTQ 50	BTQ 107
0,7	0,65	0,64

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados de las muestras tomadas en los equipos de tanque de acopio.

En la Tabla 10. se muestran los resultados de cadmio de todo el lote de producción, se decide tomar muestra del licor de cacao en cada tanque donde se almacena el licor después del pasar por el proceso de molienda, cada tanque tiene una capacidad de 6 toneladas y la muestra se tomó después de un determinado tiempo de agitación del producto dentro de los tanques.

**Tabla 11.**

Resultados de Cadmio para grano Tumaco B en los molinos refinadores

MOLINOS DE REFINACIÓN			
1		2	
Inicio	Fin	Inicio	Fin
0,65	0,59	0,62	0,67
0,55	0,61		

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados de las muestras tomadas en los equipos molinos de refinación.

En la Tabla 11. se muestran los resultados de cadmio de todo el lote de producción, en esta etapa se tienen dos equipos, molino refinador 1 y molino refinador 2, se decide tomar muestra del licor de cacao al inicio y final de cada molienda, debido a que en esta etapa de la refinación el licor se recircula en los tanques que alimentan los molinos refinadores.

**Tabla 12.**

*Resultados de Cadmio para grano*

*Tumaco B en la concha*

CONCHA	
N°4	N°5
0,41	0,51
	0,42

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados de las muestras tomadas en los equipos de concha.

En la Tabla 12 se muestran los resultados de cadmio de todo el lote de producción, en esta etapa de concheo se adiciona ingredientes adicionales al licor de cacao, por lo tanto, las muestras en esta etapa se tomaron al finalizar la operación para así poder tener un dato completo del lote.

**Tabla 13.**

*Resultados de Cadmio para grano Tumaco B*

*en el tanque 58 y PT*

TANQUE 58	PRODUCTO FINAL
0,44	0,45

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados de los equipos de tanque 58 y el producto terminado.

En la Tabla 13. se muestran los resultados de cadmio de todo el lote de producción, en esta etapa se tomó muestra en el tanque 58 el cual es el que alimenta la línea de inyección, la muestra en el tanque se tomó después de un determinado tiempo de

homogenización del producto y solamente de los primeros 10.000 kg, debido a que esta es la capacidad del tanque; las muestras en el producto final se tomaron a la salida de la etapa, con el producto empacado.

Para la nomenclatura en las Figura 9. y Figura 10, se decide asignar un numero a cada punto de toma de muestra, representado en la Tabla 14. a continuación:

**Tabla 14.**

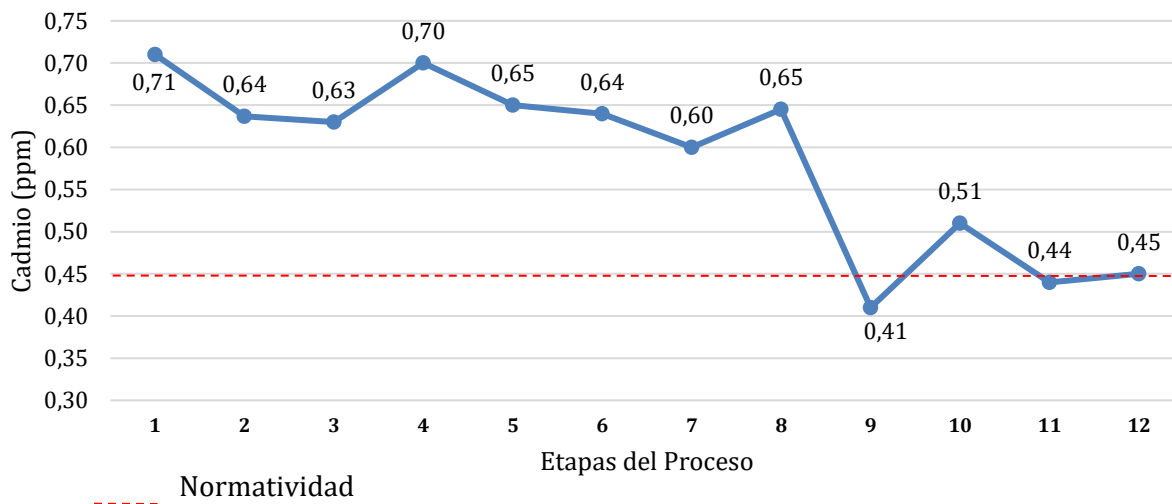
*Nomenclatura asignada en cada punto de muestra*

Etapa del proceso	Punto de toma de muestra	
1	Cacao en grano	
2	Tostador	
3	Molinos	
4	Tanque de acopio	28
5		50
6		107
7	Molinos refinadores	M1
8		M2
9	Concha	4
10		5
11	Tanque 58	
12	Producto final	

**Nota.** La tabla representa la nomenclatura asignada a cada punto de muestreo del proceso.

**Figura 9.**

*Comportamiento del cadmio con cacao Tumaco B*



**Nota.** La figura representa el comportamiento del cadmio en la planta para la mezcla de Tumaco B, según los resultados obtenidos.

En la Figura 9. se puede observar una serie de picos ascendentes y descendientes, se debe aclarar primero que las muestras del seguimiento se tomaron después de haber fabricado dos referencias diferentes en el área de producción, una en cada concha, en cada molino refinador y cada tanque de acopio siendo estas tres etapas del proceso consecutivos e independientes.

El primer pico ascendente es de los puntos 3 al 4, siendo de los molinos principales a los tanques de acopio, pasando de un valor de 0,63 ppm a 0,70 ppm respectivamente, sin embargo, para los otros dos tanques de acopio los valores de cadmio son diferentes siendo 0,65 ppm y 0,64 ppm, esto se debe a que el valor depende directamente a la referencia que se encontrará antes en los tanques, la cual contaminará la muestra de Tumaco B. Este mismo caso sucede entre los puntos 7 y 8, siendo los molinos refinadores y con valores de 0,60 ppm y 0,65 ppm, también sucede entre los puntos 9 y 10, siendo las conchas 4 y 5 y con valores de 0,41 ppm y 0,51 ppm. Este comportamiento se da porque es un valor variable que depende directamente de la referencia anterior alto en cadmio y contaminando la referencia bajo cadmio.

Cacao Huila, Santander y Perú:

Los cacao origen son importantes dentro de la compañía ya que son parte de la base fundamental para las coberturas reales, este es el principal producto de exportación y es en donde por normatividad deben cumplir un rango permitido. La mezcla entre los cacao Huila, Santander y Perú es la base para coberturas reales de leche y oscuras, es decir, dentro de su proceso de producción contiene como ingrediente la leche en polvo o no; para la toma de muestras se escogió el proceso de producción de la cobertura “Mapalé”, la cual tiene un valor máximo permitido de 0.8 ppm de Cadmio como producto final, los resultados se presentan en tablas y por equipos a continuación:

\* Los valores se presentan en unidades de ppm (partes por millón) y el análisis se realizó en el laboratorio de calidad en la empresa Luker chocolate.

**Tabla 15.**

*Resultados de Cadmio para grano Huila, Santander y Perú en el Cooler de enfriamiento*

COOLER DE ENFRIAMIENTO			
BACHE	INICIO	MITAD	FINAL
1	0,51	0,56	0,40
2	0,50	0,46	0,40

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados de las muestras tomadas en el equipo Cooler.

En la Tabla 15. se muestran los resultados de cadmio en el lote de producción, se realizaron 2 baches de nibs de cacao tostados, en los cuales para poder identificar un nivel de cadmio completo de toda la producción se tomaron muestras de inicio, mitad y final en cada bache.



**Tabla 16.**

*Resultados de Cadmio para grano Huila, Santander y Perú en molinos*

MOLINOS DE BOLAS	
Inicio	0,50
2.500 kg	0,55
5.000 kg	0,37
7.500 kg	0,36

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados de las muestras tomadas en los equipos de molienda.

En la Tabla 16. de bolas se muestran los resultados de cadmio de todo el lote de producción, se decide tomar muestra del licor de cacao en el tiempo cero y cada 2.500 kg hasta finalizar la producción en esta etapa, en total son 7 muestras debido a que la producción total de ese lote eran 7.500 kg.

**Tabla 17.**

*Resultados de Cadmio para grano Huila, Santander y Perú en el tanque de acopio*

TANQUE ACOPIO		
28	50	107
0,49	-	-

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados de las muestras tomadas en los equipos de tanque de acopio.

En la Tabla 17. se muestran los resultados de cadmio de todo el lote de producción, se decide tomar muestra del licor de cacao en cada tanque donde se almacena el licor después del pasar por el proceso de molienda, cada tanque tiene una capacidad de 6 toneladas y la muestra se tomó después de un determinado tiempo de agitación del producto dentro de los tanques.

**Tabla 18.**

*Resultados de Cadmio para grano Huila, Santander y Perú en molinos de refinación*

MOLINOS DE REFINACIÓN			
1		2	
Inicio	Fin	Inicio	Fin
0,65	0,61	0,82	0,80

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados de las muestras tomadas en los equipos molinos de refinación.

En la Tabla 18. se muestran los resultados de cadmio de todo el lote de producción, en esta etapa se tienen dos equipos, molino refinador 1 y molino refinador 2, se decide tomar muestra del licor de cacao al inicio y final de cada molienda, debido a que en esta etapa de la refinación el licor se recircula en los tanques que alimentan los molinos refinadores

**Tabla 19.**

*Resultados de Cadmio para grano Huila, Santander y Perú en la concha*

CONCHA	
4	5
0,33	0,27

**Nota.** Esta tabla muestra los resultados de las muestras tomadas en los equipos de concha.

En la Tabla 19. se muestran los resultados de cadmio de todo el lote de producción, en esta etapa de concheo se adicionan ingredientes adicionales al licor de cacao, por lo tanto, las muestras en esta etapa se tomaron al finalizar la operación para así poder tener un dato completo del lote.

**Tabla 20.**

*Resultados de Cadmio para grano Huila, Santander y Perú en tanque 58 y PT*

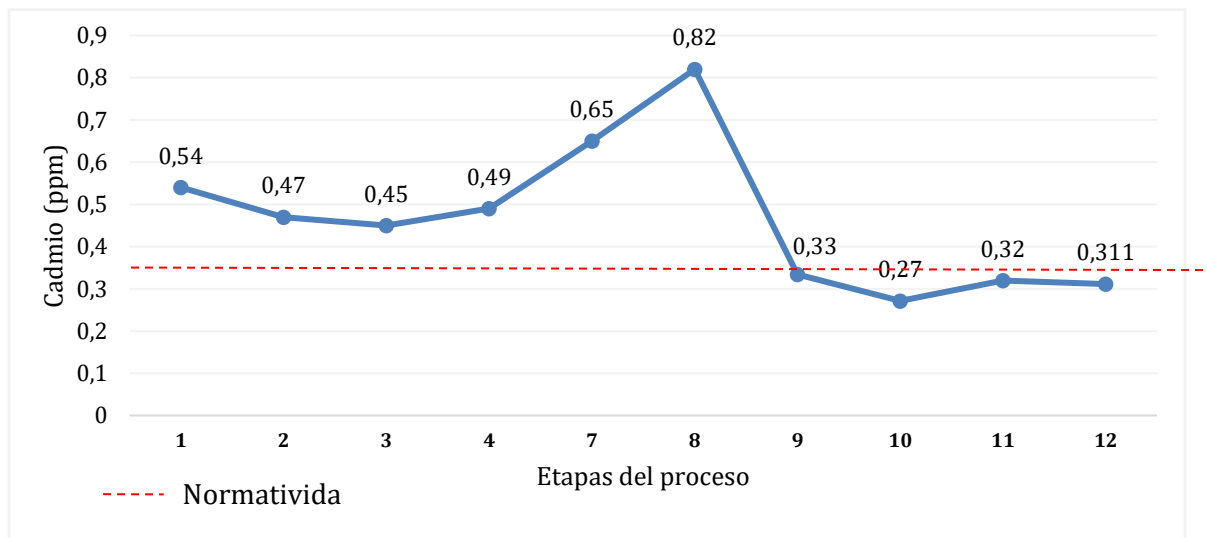
TANQUE 58	PRODUCTO FINAL
0,32	0,31

**Nota.** Esta tabla muestra los equipos tanque 58 y el producto terminado

En la Tabla 20. se muestran los resultados de cadmio de todo el lote de producción, en esta etapa se tomó muestra en el tanque 58 el cual es el que alimenta la línea de inyección, la muestra en el tanque se tomó después de un determinado tiempo de homogenización del producto y solamente de los primeros 10.000 kg, debido a que esta es la capacidad del tanque; las muestras en el producto final se tomaron a la salida de la etapa, con el producto empacado.

**Figura 10.**

Comportamiento del cadmio en mezcla Perú, Santander y Huila



**Nota.** La figura representa el comportamiento del cadmio en la planta para la mezcla de cacao Perú, Santander y Huila, según los resultados obtenidos.

En la Figura 10. se presenta el segundo seguimiento con la mezcla de cacao Perú, Santander y Huila, este se realizó en un tiempo diferente al seguimiento de Tumaco B; se puede observar picos ascendentes y descendentes en los mismos puntos que la referencia anterior de Tumaco B, sin embargo, en este seguimiento la mezcla de cacao solamente tuvo contacto con un tanque de acopio, por lo que no se tienen datos en los puntos 5 y 6; los picos ascendentes se presentan entre los puntos 3 y 4, siendo molinos principales y tanques de acopio con valores de 0,45 ppm y 0,49 ppm respectivamente, también entre los puntos 4 y 7, siendo tanques de acopio y molinos refinadores con valores de 0,49 ppm y 0,65 ppm respectivamente.

El pico que se presenta entre los puntos 7 y 8, siendo ambos puntos los molinos refinadores con valores de 0,65 ppm y 0,82 ppm, depende exclusivamente de la referencia anterior fabricada en esta etapa, siendo en este caso la referencia anterior un licor de cacao alto en cadmio por lo que la muestra en estos puntos dio valores altos no relacionados al punto 4, con una diferencia de 0,16 ppm y 0,33 ppm con respecto a cada molino refinador.

### **2.3.2. Selección de puntos críticos en el proceso**

Se observa en las gráficas 1 y 2, dos etapas en común en donde el nivel de cadmio aumenta significativamente, la etapa de los tanques de acopio con un aumento del 0,63 ppm a 0,7 ppm para el licor Tumaco B y del 0,45 ppm a 0,49 ppm para el licor de la mezcla (Huila, Santander y Perú), la etapa de los molinos refinadores con un aumento del 0,64 ppm a 0,65 ppm para el licor Tumaco B y 0,49 ppm a 0,82 ppm para el licor de la mezcla (Huila, Santander y Perú).

La línea punteada roja de las figuras 9 y 10, indica la normatividad de los niveles de cadmio para las dos diferentes referencias tratadas, para la figura 9 el límite máximo permitido de cadmio para esta referencia vendida en Estados Unidos es de 0,45 ppm, mientras que para la figura 10 la normatividad vigente para la exportación a Europa es de 0,3 ppm, el nivel de cadmio está directamente relacionado con la cantidad de materia seca total de cacao utilizado en Luker Chocolate para cada tipo de referencia, en la

referencia Tumaco B esta entre 65% y 95% y para la mezcla Perú, Santander y Huila sen encuentra entre un 30% a 50%.

Estos equipos son los que la concentración de cadmio en el licor de cacao origen se ve afectada directamente, esto se da porque siempre en el proceso de producción de una planta queda producto remanente dentro de los equipos y/o en las tuberías de transporte, por lo tanto, este producto que queda retenido contamina el siguiente en la producción presentándose así una contaminación cruzada entre los dos licores.

Igualmente, también se identifica etapas dentro del proceso en donde la concentración de cadmio disminuye significativamente, en la etapa de tostión con una disminución del 0,71 ppm a 0,64 ppm para el cacao Tumaco B y del 0,54 ppm a 0,47 ppm para el cacao de la mezcla (Huila, Santander y Perú), la razón por la que ocurre esta disminución es debido a que el cacao en grano que ingresa ya se encuentra sin la cascarilla, es decir, ingresa al equipo tostador como nibs de cacao y con un proceso previo de descascarillado.

En la etapa de Conchado la concentración también disminuye, se presenta una disminución del 0,65 ppm a 0,41 ppm en la concha 4 y del 0,6 ppm a 0,51 ppm en la concha 5 para el licor Tumaco B, para el licor de la mezcla (Huila, Santander y Perú) se dan un valores del 0,82 ppm a 0,33 ppm para la concha 4 y del 0,65 ppm a 0,27 ppm para la concha 5; esta disminución es debido a que en las conchas 4 y 5 se prepara el chocolate, allí no solo se agrega licor de cacao sino también manteca de cacao, azúcar y emulsificantes, por lo cual la concentración de cadmio se diluye en una mezcla más grande y su valor se reduce [16].

Con los resultados obtenidos, se concluye que los puntos críticos dentro del proceso de producción son entre molinos de bolas - tanque de acopio y molinos refinadores - tanque de acopio, teniendo en cuenta que la contaminación se puede dar dentro de los equipos cuando entran en funcionamiento y en las tuberías que conectan un equipo con otro, donde se transporta ya sea licor de cacao o chocolate semielaborado. Adicionalmente,

se toma en cuenta que después de la etapa de conchado la variedad de la concentración del cadmio en el chocolate semielaborado es muy mínima.

#### **2.4. Normatividad**

A nivel mundial, los contaminantes que posee el cacao son una preocupación para los agricultores, las grandes empresas y los consumidores, sobre todo la presencia de altas concentraciones de cadmio en este fruto por ser uno de los metales más peligrosos y tóxicos que puede almacenar el organismo; Por estos motivos, todos los países y organizaciones encargadas de velar por la salud de los consumidores comienzan la labor de garantizar la calidad e inocuidad de los alimentos.

Luker chocolate, debe seguir diferentes regulaciones tanto para exportar como para realizar las ventas nacionales en el país, sus mayores compradores se encuentran en Estados Unidos y Europa, en donde organizaciones como ATSDR “Agency for Toxic Substances and Disease Registry”, NIOSH “National Institute for Occupational Safety and Health”, FDA “Food and Drugs administration”, CFR “Code of Federal Regulations” y UE “reglamento europeo”, reglamentan la concentración máxima permisible de cadmio en los productos de la dieta de los consumidores.

El reglamento 488 de 2014 de la unión europea, estipula que para el chocolate y sus distintos derivados como el chocolate con leche el valor máximo permitido de cadmio corresponde a 0,1 ppm, 0,3 ppm y 0,8 ppm, dependiendo de la cantidad de materia seca total de cacao encontrada menor al 30%, entre el 30 y 50% y mayor al 50% respectivamente, y el cacao en polvo o chocolate para beber con 0,6 ppm [2].

El codex alimentarius, es una de las más grandes organizaciones reconocidas a nivel mundial, debido a que es creada con el fin de tener una norma general que todos los países pueden consultar, por ende es la encargada de generar normas que protegen la salud de los consumidores, que garantizan la buena calidad de los productos en el comercio mundial, al ser el cadmio un problema de salud pública, esta organización

contempla los valores permitidos para el cacao y los productos a base de cacao, descritos en la Tabla 21.

**Tabla 21.**

*Resumen de los datos de presencia de cadmio para el cacao y los productos del cacao.*

<b>Productos de cacao</b>	<b>N (total)</b>	<b>Mínima concentración n (µg/kg)</b>	<b>Máxima concentración n (µg/kg)</b>	<b>N&gt;100 µg/kg (%)</b>	<b>N&gt;300 µg/kg (%)</b>	<b>N&gt;500 µg/kg (%)</b>	<b>N&gt;1000 µg/kg (%)</b>
Grano de cacao	451	ND	5239	392 (86.9%)	324 (71.8%)	245 (54.3%)	119 (26.4%)
Bebida de cacao	137	ND	290	13 (0.0%)	0	0	0
Masa de cacao	85	15	593.8	36 (37.9%)	6 (6.3%)	4 (4.2%)	0
Polvo de Cacao	1292	ND	1910	669 (47.4%)	55 (3.9%)	21 (1.5%)	6 (0,5%)
Otros productos del cacao (Incluido el Chocolate)	1954	ND	1073	408 (20.8%)	78 (4.0%)	7 (0,4%)	1 (0,05%)

**Nota.** En esta tabla se describe los valores permitidos para el cacao en grano, cacao, pasta de cacao y el chocolate. Tomado de Codex Alimentarius [17]

En países como Australia y Nueva Zelanda, regulan para el chocolate y productos a base de cacao un valor menor o igual a 0,5 ppm en concentración de cadmio, en Argentina es de 0,2 ppm y 0,3 ppm dependiendo del porcentaje de grano de cacao que se utilice, menos del 40% y más del 40% respectivamente, en Uruguay para los productos

derivados del cacao es de 0,2 ppm [17], los demás países como Brasil, Paraguay y Venezuela definieron para la pasta de cacao 0,5 ppm, los productos de chocolate y cacao con un porcentaje menor al 40% en 0,2 ppm y para los mayores a 40% de 0,4 ppm [11], todas estas regulaciones son respectivamente de las concentraciones de cadmio permitidas en los productos a base de cacao o sus derivados [11].



### 3. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE LIMPIEZA

En este capítulo, se realizará la selección de la mejor alternativa de limpieza para los niveles de cadmio presentes en el proceso de producción del chocolate, por medio de una matriz de decisión AHP (Analytic Hierarchy Process), ideal para la toma de decisiones con multicriterio.

#### 3.1. Estrategias actuales para la reducción de cadmio en la industria chocolatera

En investigaciones posteriores, se ha evidenciado como la planta de cacao adquiere el cadmio por medio de su ruta de absorción de nutrientes, llegando así al fruto o en su debido termino, a la materia prima fundamental para la elaboración de chocolate, los estudios sobre el tema afirman que, el cadmio tiende a migrar a la superficie del grano, por ende al realizar el proceso como el descascarillado en la planta de producción, el producto en proceso logra disminuir los niveles de cadmio iniciales, este dependerá netamente de la concentración del metal inicial y así mismo del origen del grano, por ende las empresas han optado por la adición de ingredientes como leche, azúcar, colorantes o espesantes para lograr la disminución del cadmio [2].

Debido al gran auge que en los últimos años, que ha tenido el cadmio en los alimentos, y su regulaciones más estrictas, las empresas junto a investigadores evalúan factores claves que se deben controlar y analizar como: las fuentes para que el cadmio logre estar en el suelo de plantación, así mismo su biodisponibilidad y su posible ruta de absorción y transporte en la planta de cacao, se tiene presente como el manejo y proceso que se le den en las líneas de operación puede afectar directamente esta concentración de cadmio [2].

Se proponen soluciones durante la siembra y en el proceso productivo, tales como: las plantaciones de cacao deben estar en las zonas donde se considere que el riesgo por contaminación con cadmio es leve, así mismo se recomienda el uso adecuado de los fertilizantes y agua que hacen parte del proceso de cultivo; en las líneas de operación se puede considerar operaciones como la fermentación, el secado, la tostón y el

descarrillado para remover el metal, con la observación que serían puntos críticos del proceso que podrían afectar las propiedades de calidad del producto final y por último, el proceso de mezclado, el cual consiste en mezclar granos de cacao con alto contenido de cadmio con otros de baja concentración de cadmio, lo cual se considera una solución a corto plazo debido a las pérdidas económicas, y posibles efectos en el sabor del producto [2].

### **3.2. Métodos de limpieza industriales.**

Actualmente, en las industrias durante la operación de sus procesos las tuberías y equipos se ensucian, quedan con remanente de producto o alguna otra sustancia, por ello, es importante limpiarlas antes de arrancar el siguiente ciclo; el proceso de limpieza hace parte de un amplio grupo de operaciones necesarias de mantenimiento en las plantas industriales, estas operaciones deben ser planeadas, presupuestadas y ejecutadas en rangos de tiempos determinados para dichas actividades [18].

Los métodos de limpieza se clasifican en dos categorías principales: métodos de limpieza mecánica y métodos químicos de limpieza [18]; la mayoría de métodos existentes y desarrollados por el hombre a lo largo de la historia, fueron exitosos por pruebas de ensayo y error. Estos métodos aplican para todo tipo de equipos, accesorios y/o tuberías dentro del proceso industrial, así mismo, cada uno es diferente dependiendo de la funcionalidad que se desee implementar; ambas categorías se explican en los siguientes numerales.

#### **3.2.1. Métodos de limpieza mecánica**

Los métodos de limpieza mecánica son aquellos en los cuales se utilizan herramientas neumáticas o eléctricas, que ayudan a eliminar las impurezas retenidas dentro y fuera de la superficie a limpiar; no usan ninguna sustancia química, su funcionamiento se basa en variables como la presión, caudal, tiempo. Dentro de los métodos de limpieza mecánica, se subdividen en dos: métodos hidráulicos y métodos mecánicos [18].

Los métodos hidráulicos son aquellos que funcionan por acción del agua u otro líquido (no químico) como el aire, dentro de este grupo encontramos el Flushing (enjuague), Jetting (lavado por chorro), Kites, Bags and Tires (cometas, bolsas y neumáticos), Pigging (arrastre por Pig) , entre otros [19].

Los métodos mecánicos son aquellos que funcionan por acción de otro objeto, dentro o fuera del equipo, accesorio o tubería a limpiar, dentro de este grupo encontramos el Rodding (limpieza por rodeo), Balling (limpieza por bola) and Power Bucket (cubo de energía) [19].

Es importante resaltar que estos métodos de limpieza mecánica requieren de herramientas costosas y maquinaria, la cual es adaptada al proceso. Según el método implementado, con el tiempo se tiende a ser visibles posibles daños superficiales en forma de abrasión, raspaduras o estrías, así mismo, también es importante que el operador del método conozca bien el proceso, ya que estos requieren una alta habilidad por parte de ellos, esto no es solo para evitar posibles daños sino para prevenir algún accidente o lesión [18].

### **3.2.2. Métodos químicos de limpieza**

Los métodos químicos de limpieza son aquellos en los cuales se usan sustancias químicas para retirar, controlar y desinfectar las suciedades presentes en las tuberías o equipos por un determinado tiempo, dentro de los productos o sustancias químicas que se utilizan actualmente, se encuentran las enzimas, hidróxidos, cáusticos, biocidas y neutralizadores; los métodos químicos pueden ser o no eficientes dependiendo de la necesidad que se requiera cumplir o problemática, además se tiene en cuenta las circunstancias específicas del lugar a implementar [19].

Estos métodos químicos de limpieza suelen ser costosos en la mayoría de los casos, siempre y cuando se apliquen rutinariamente y de manera adecuada; según Siringi, Home y Koehn para poder escoger adecuadamente la sustancia química a utilizar debe

realizarse una evaluación exhaustiva y planificada sobre el programa de dosificación y tener en cuenta tres factores fundamentales:

- a. Este método no puede generar paradas o bloqueos en las líneas de producción.
- b. Es un método muy costoso, por lo que debe considerarse la rentabilidad de este.
- c. Los productos químicos pueden ser peligrosos para los empleados, y el medio ambiente. [19]

Estos métodos químicos no tomaron validez para el desarrollo a la problemática del proyecto, debido a que en la empresa Luker chocolate, existe una política que describe que todo los productos fabricados en la compañía son 100% naturales, por lo tanto, implementar un método químico de limpieza dentro del proceso industrial no es viable; sin embargo, se opta por remplazar los métodos químicos de limpieza por métodos de remoción de cadmio en el grano de cacao, con el fin de poder evaluar alternativas aplicadas a la materia prima antes de ingresar el proceso industrial. Estos métodos de remoción se nombrarán métodos de pretratamiento para el desarrollo del proyecto.

### **3.3. Planteamiento de alternativas**

#### **3.3.1. Método 1: Solución extractora con agua**

En este método se utilizan diferentes enzimas como la amilasa, pepsina, pancreatina, celulasa o fitasa junto con sales sódicas o potásicas, utilizando como vehículo el agua. Se utilizan diferentes enzimas como la amilasa, pepsina, pancreatina, celulasa o fitasa junto con sales sódicas o potásicas, utilizando como vehículo el agua [20].

Es un método de pretratamiento el cual se realiza en el grano de cacao al llegar a la planta de producción, en donde se debe implementar un reactor el cual facilite el contacto entre la enzima, el agua, el sustrato y las sales biliares, logrando mediante su acción enzimática, remover el cadmio presente en la materia prima. Cabe destacar que el proceso se debe efectuar siempre que ingrese el grano de cacao a la recepción de Luker Chocolate, además de evaluar la vida media de las enzimas para lograr una remoción adecuada.

### **3.3.2. Método 2: Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido**

Este método se caracteriza por ser un método de limpieza mecánica, esta técnica de ultrasonido activo es un procedimiento no destructivo que se basa en la impedancia acústica, este fenómeno se determina como la velocidad máxima alcanzada de propagación en relación a la densidad del producto [21]. El método consiste en la implementación de un equipo electrónico el cual genera ondas ultrasónicas usando el medio agua con detergente como transporte y así retirar el producto remanente en las tuberías.

Este método es conocido en la industria como un equipo para detectar defectos en el material como poros, fisuras y para conocer las propiedades básicas de los líquidos y sólidos dentro de la estructura [22]. Se ubica en la parte externa del equipo y/o tubería, es un procedimiento manual, es decir, un operario debe estar dedicado a realizar esta actividad únicamente.

### **3.3.3. Método 3: Limpieza de tuberías por inyección de aire**

Como lo indica su nombre, es un método mecánico de tipo hidráulico, el cual utiliza aire como principal componente de extracción de compuestos que generen contaminación cruzada en las tuberías, si se desea una acción mejorada se puede en primer lugar, realizar una limpieza con una solución limpiadora la cual contenga un detergente mezclado con agua, para posteriormente emplear aire a gran velocidad el cual arrastre las últimas partículas contaminantes [23].

Es conocido como barrido de aire, cuando es utilizado para el secado de tuberías, en primer lugar se pasan corrientes de aire a gran velocidad aproximadamente de 108km/h y posteriormente una corriente de 3 m/s a las salidas de las tuberías; se considera que el método se puede implementar a todo tipo de tuberías, sobre todo en la industria de alimentos ya que no produce residuos líquidos [23], lo cual es un punto a favor en la fabricación del chocolate, evitando que queden partes húmedas de la tubería que impacten la calidad del producto.

#### **3.3.4. Método 4: Limpieza de tuberías por Pig**

Se clasifica como un método de limpieza mecánico para tuberías, es usado para hacer limpieza y separación de productos; la palabra PIG es una sigla en inglés que significa “ Pipeline Internal Gauge” y en español significa Galga o calibrador interno para oleoductos [24]. Este método proporciona una forma fácil, rápida y económica para la limpieza de tuberías, estos Pig se clasifican en dos grupos: mecánicos y químicos gelatinosos, estos últimos se utilizan en industrias que sufren con tuberías que retienen incrustaciones dentro de ellas [19].

En industrias de alimentos, este método es usado comúnmente para vaciar y limpiar tuberías aprovechando al máximo el producto retenido y ahorrando el producto residual; el método del Pig actúa como arrastre y es movido por un fluido propulsor (aire, N<sub>2</sub>, etc) o un líquido, desplazándolo por toda la tubería y limpiando fuertemente las paredes interiores de la tubería [25].

#### **3.3.5. Método 5: Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua**

Este método se clasifica como un método de limpieza mecánica, en donde se utiliza el vapor de agua como agente desinfectante, el cual arrastra impurezas y microorganismos presentes en equipos y tuberías, se considera que es eficaz para las plantas de producción que trabajen con grasas ya que limpia mejor que el agua caliente y si se requiere un mejor efecto se recomienda utilizar detergentes o disolventes; se debe tener presente que el método debe contar con un generador fijo y su respectivo combustible, como por ejemplo una caldera, la cual debe ser instalada para efectuar el método de limpieza y emplea gas natural; además, se debe contar con un equipo de protección para el personal de la planta la cual garantiza la salud y el bienestar [26].

Es recomendado para el sector de alimentos en los subsectores de aceite y grasas comestibles, productos lácteos, productos de panadería, dulces y bocadillos, productos cárnicos, alimentos para animales, jugos y bebidas [26].

### **3.3.6. Método 6: Chorro de agua a ultra alta presión**

Consiste en agua fría a alta presión y velocidad, se utiliza presiones entre 170 y 240 mPa, obteniendo un caudal de 680m/s, es ampliamente utilizado para remover partículas, residuos y acumulaciones en las superficies y tuberías, se debe tener presente la implementación de bombas que faciliten el flujo de agua a las condiciones especificadas y así en caso de emergencia poder parar o desviar la presión del fluido [26].

Se debe adecuar un equipo de protección especial, que mantengan el personal en todo momento seguros sobre todo visual y facial, es considerado un método practico y seguro a comparación de los métodos químicos [26], aunque el consumo de agua puede aumentar se puede implementar un sistema de reflujos que pueda garantizar el tratamiento del agua al finalizar el proceso de limpieza y así mismo la reutilización del recurso.

### **3.3.7. Método 7: Limpieza CIP**

Se clasifica como un método de limpieza química, la palabra CIP es una sigla en inglés que significa "Cleaning in Place" y en español significa limpieza en sitio; este método consiste en dos procesos, el primero es el proceso de limpieza y el segundo es el proceso de desinfección [27]. En el proceso de limpieza, elimina la suciedad de la superficie y arrastra microorganismos retenidos, en el proceso de desinfección, elimina los microorganismos patógenos y los cuales pueden llegar a afectar el producto dentro de la tubería [27].

El funcionamiento del método consiste en poner a recircular la solución de limpieza a través de los equipos que se desea desinfectar, como las tuberías, intercambiadores de calor, bombas, válvulas y demás accesorios, en condiciones adecuadas de tiempo, temperatura, concentración y acción mecánica [28]. El sistema opera a un flujo turbulento, esto es debido a que se logre la acción de fregado mecánico con las

soluciones que componen el método o las soluciones de limpieza, esta es la manera más efectiva de remover la suciedad [29].

### **3.3.8. Método 8: Remoción a partir de la microalga *Chlorella* sp.**

Se clasifica como un método de pretratamiento, es decir, un método de remoción de metales pesados, esta es una aplicación estudiada del género *Chlorella*, debido a su gran potencial bioquímico, estructural y por lo metabolitos que produce [10]; el desarrollo del método se realiza por un proceso de biorremediación, en el cual se utilizan las ventajas catalíticas de la alga *Chlorella* sp para degradar y transformar los metales pesados, en este caso el cadmio presente en los cacaoos en grano [30].

El desarrollo de este método consiste en dos procesos principales para la acumulación de metales pesados en las algas *Chlorella* sp: el primero es una adsorción rápida, como un proceso pasivo, seguido de una absorción lenta, este sería un proceso activo, la unión de estos dos métodos se llama biosorción [10].

### **3.3.9. Método 9: Reducción por micro nano burbujas (aire-ozono)**

Es clasificado como un método de pretratamiento, consiste en un equipo para generar micro-nanoburbujas de 1 a 100 micrones de tamaño, las cuales por medio de un fluido y flujo giratorio se tienen contacto las micro-nanoburbujas con el cacao en grano, la formación de las micro-nanoburbujas dentro del equipo es debido a la inyección del gas a través de un tubo que ingresa al equipo [31].

El desarrollo del método combina los poderosos efectos de las microburbujas de ozono y las nano burbujas de oxígeno en un sistema único de transferencia de fase dual. Desinfecta, elimina plaguicidas y conserva los alimentos, evita el crecimiento de microorganismos, no es tóxico, no causa corrosión, de bajo costo, desinfección libre de halógenos y es simple de usar. Además, no tiene olor y no es tóxico [32].



### **3.3.10. Método 10: Limpieza postcosecha**

Con el objetivo de reducir los niveles de cadmio en los granos de cacao, se somete el grano a un tratamiento postcosecha, utilizan soluciones acidificantes y quelantes, para posteriormente someter el grano a un proceso de pre-secado, lavado, fermentación y secado [33].

Al recibir la materia prima en la planta, se debe remojar el grano en un solución de ácido de clorhídrico con un pH de 3,0 a 4,0 en donde se deja sumergida por 60 min, posteriormente, se pone en contacto con una solución quelante de EDTA o ácido cítrico [33], luego pasa a una unidad de pre-secado en donde se le retira el agua que pudo absorber de las soluciones anteriores, en el proceso de fermentación se expone el grano de cacao al altas temperaturas con el fin de resaltar sus propiedades organolépticas, al pasar por el proceso de secado final se asegura que el grano contenga el porcentaje de humedad necesario para iniciar su proceso de fabricación en planta.

## **3.4. Criterios de selección**

En el procedimiento de selección para la alternativa de limpieza más adecuada a implementar en la empresa Luker Chocolate, requieren de unas condiciones óptimas de calidad, costos, ambiental, legal y seguridad y salud, que deben ser cumplidas con la posibilidad de adaptarse a las reglas, políticas y necesidades de la empresa, con ayuda de estos criterios se delimitaron los métodos de limpieza mecánicos y de pretratamiento encontrados en la literatura; la matriz conceptual de las alternativas con respecto a cada criterio se encuentran en el ANEXO 1.

### **3.4.1. Económico**

En el desarrollo de cualquier proyecto, un ítem que no puede faltar es el presupuesto, esta gestión de costos tiene como finalidad estimar, destinar y controlar los costos del proyecto; ayuda a la compañía a conocer por adelantado los gastos y reducir las probabilidades de que el presupuesto planteado inicialmente se supere [34], se evalúan

los costos de todas las fases en desarrollo del proyecto desde la estructuración hasta la ejecución y cierre del mismo.

Dentro de las alternativas presentadas, se tiene en cuenta, que la implementación del método de limpieza o pretratamiento debe tener un presupuesto acorde a la efectividad de la solución, también, debe tener un índice de costo beneficio mayor a 1 para presentar una solución viable a corto plazo.

### **3.4.2. Calidad**

Todos los productos al ser fabricados y comercializados deben cumplir con sus respectivas especificaciones organolépticas, fisicoquímicas y microbiológicas, las cuales son el requisito primordial para la liberación del producto final y así contar con la plena certeza que el producto que se le ofrece al consumidor va a satisfacer todas sus expectativas.

Se tiene en cuenta, que la implementación del método de limpieza no puede alterar ninguna propiedad con las que cuenta actualmente la compañía, por ende, se debe elegir el método más adecuado para cumplir con todos los requisitos. Si la elección del método es un pretratamiento al grano del cacao, se debe garantizar que las sustancias o soluciones utilizadas para remover el cadmio, no generen impacto en la composición del grano, ni alteren las propiedades organolépticas de sabor y olor, si en caso contrario, la elección del método de limpieza es de tipo mecánico se debe garantizar que los compuestos utilizados en las tuberías y equipos no dejen ningún rastro que afecten el licor de cacao.

### **3.4.3. Ambiental**

En búsqueda de fomentar el apoyo que la compañía tiene con el medio ambiente, se debe considerar un método de limpieza, tanto físico como de pretratamiento, que genere la menor cantidad de contaminantes o residuos posibles que se exponen al medio ambiente y así mismo conservar los recursos naturales tanto renovables como no

renovables; este criterio se debe considerar en todas las alternativas de métodos de limpieza encontrados, y así mismo, para la alternativa seleccionada se debe contar con un plan de acción preventivo en el tratamiento de los residuos generados antes de su liberación al ecosistema.

En las industrias, existen las “técnicas de minimización de residuos”, las cuales se encargan de prevenir la contaminación producida por los procesos industriales, generando una menor cantidad de estos, por medio de medidas operativas y organizativas, técnica y económicamente viables[35].

#### **3.4.4. Seguridad y salud**

El criterio de seguridad y salud en el trabajo es de vital importancia para mantener un ambiente sano y propicio para el desarrollo de cada una de las actividades, brindar al trabajador un espacio adecuado que le garantice salud, calidad y productividad garantiza operaciones confiables, con el máximo empeño y dedicación en las líneas de fabricación lo cual impacta directamente al cliente final.

El método de limpieza para implementar en Luker chocolate, debe garantizar en todo momento la seguridad del trabajador, brindarle todo el equipo necesario para seguir con su calidad de vida, así mismo las capacitaciones necesarias para ejecutar la limpieza de la forma más efectiva, sin desgaste del personal y protegiendo en todo momento la integridad.

#### **3.4.5. Legal**

El criterio del marco legal de un proyecto es aquel en donde se delimitan las acciones y el enfoque del método de limpieza a implementar, para este criterio se deben considerar alternativas que no posean restricciones normativas para su implementación, o en el caso contrario que llegue a poseer alguna, se debe hacer cumplir al máximo posible, con el fin de garantizar mediante las entidades reguladoras un producto de calidad para la compañía.

La normatividad principal que se debe aplicar para evaluar todas las alternativas con respecto a este criterio es la Resolución 1511 de 2011, la cual establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que debe cumplir el chocolate y productos de chocolate para consumo humano, que se procese, envase, almacene, transporte, comercialice, expendan, importe o exporte en el territorio nacional [36].

### 3.5. Selección de alternativa de limpieza

La selección del método más viable para implementar en la empresa Luker Chocolate se realizó por medio de una matriz AHP (proceso de Análisis Jerárquico) desarrollado por Thomas L. Saaty la cual está diseñada para evaluar criterios múltiples, como lo es en este caso; los valores a evaluar están en un rango de 1-9, siendo 1 el valor mínimo y 9 el valor máximo, tal como se presenta en la Tabla 22.

**Tabla 22.**

*Valores de la matriz de selección*

CRITERIOS DE EVALUACIÓN (Según la escala Thomas Saaty)		
ESCALA NUMERICA	ESCALA VERBAL	EXPLICACIÓN
1	Igualmente, importante	Dos elementos contribuyen en igual medida al objetivo
3	Moderadamente importante	Preferencia leve de un elemento sobre el otro
5	Fuertemente importante	Preferencia fuerte de un elemento sobre el otro
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Mucha más preferencia de un elemento sobre otro. Predominancia demostrada
9	Importancia extremadamente fuerte	Preferencia Clara y absoluta de un elemento sobre el otro
2,4,6,8	-	Intermedio de los valores anteriores

**Nota.** Esta tabla muestra los valores a evaluar en la matriz de decisión.

La metodología en la construcción de la matriz AHP se explica en la Figura 11., donde en primer lugar, se deben seleccionar las alternativas viables de limpieza a implementar en Luker chocolate, para este proyecto se seleccionaron diez, seis métodos mecánicos y cuatro en nivel de pretratamiento, en segundo lugar, se deben seleccionar los criterios

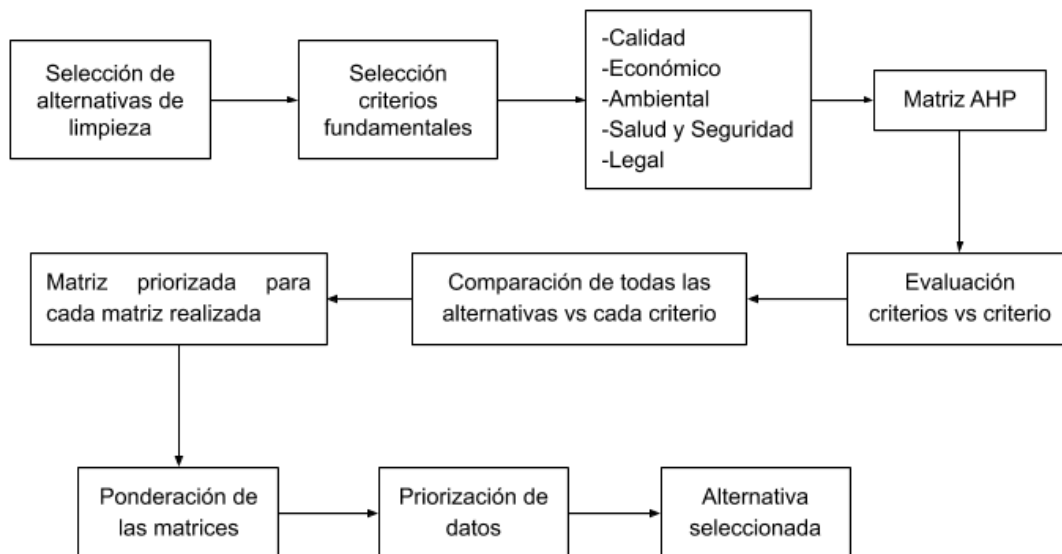
fundamentales para la elección de la mejor alternativa, en ese caso calidad, economía, ambiental, salud y seguridad y legal.

Posteriormente se desarrolla una matriz AHP, la cual compara múltiples parámetros, se realiza una primera matriz en donde se evalúan criterios vs criterios con el fin de seleccionar el criterio de mayor relevancia, luego se realiza una comparación entre todas las alternativas de limpieza con respecto a cada uno de los criterios, obteniendo así 5 matrices una para cada criterio, las cuales fueron normalizadas para obtener el porcentaje de relevancia.

Se realiza una ponderación la cual recopila la información de todas las matrices realizadas anteriormente y por último una priorización de las ponderaciones obteniendo el resultado final, el cual debe satisfacer las expectativas y condiciones descritas para cada criterio de selección.

**Figura 11.**

*Metodología Matriz AHP*



**Nota.** En la figura se muestra la metodología realizada por el método AHP.

### 3.5.1. Matriz de selección del método de limpieza

Teniendo en cuenta los valores presentados en la Tabla 22. se realizó primero la evaluación de criterios vs criterios, como se muestra en la Tabla 23 para identificar si todos los criterios influyen de la misma forma en el interés de la alternativa o si por el contrario influyen en porcentajes distintos entre los criterios, posterior a esto, se realizó una matriz normalizada la cual consiste en la relación entre el valor propuesto con la suma total de cada criterio y por último, el promedio entre los valores normalizados nos dará el porcentaje de relevancia entre los criterios evaluados, evidenciados en la Figura 12.

**Tabla 23.**

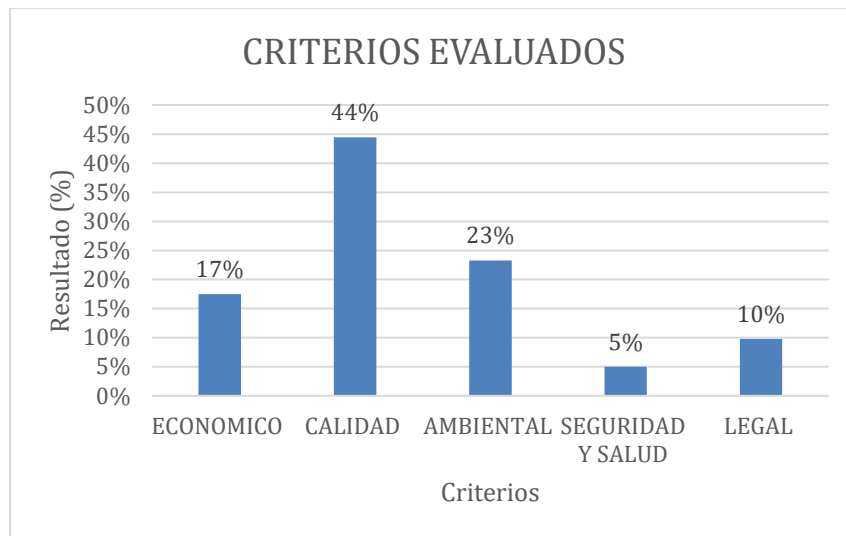
*Evaluación criterios de decisión*

CRITERIOS	ECONOMICO	CALIDAD	AMBIENTAL	SEGURIDAD Y SALUD	LEGAL	RESULTADO
ECONOMICO	1	1/3	1/3	5	3	17%
CALIDAD	3	1	7	5	3	44%
AMBIENTAL	3	1/7	1	3	5	23%
SEGURIDAD Y SALUD	1/5	1/5	1/3	1	1/3	5%
LEGAL	1/3	1/3	1/5	3	1	10%
TOTAL	7,53	2,01	8,87	17,00	12,33	

**Nota.** Esta tabla muestra los valores evaluativos de calificación entre criterios

**Figura 12.**

*Criterios evaluados*



**Nota.** Esta figura muestra el porcentaje de importancia en cada criterio evaluado.

Con los resultados obtenidos, se puede observar en la Figura 12. que el criterio que más influyen en la selección del método de limpieza es el de calidad con un 44%, seguido del criterio ambiental con un 23%, luego el económico con el 17%, posteriormente el legal con el 10% y por último el de seguridad y salud con el 5%, se tiene presente que cada uno de los criterios seleccionados es de vital importancia y que todos se deben complementar, para llevar al cliente productos que satisfagan las expectativas del comprador.

El criterio de calidad al ser el de mayor porcentaje indica como el producto no debe alterarse en ninguna de sus propiedades ya estipuladas por Luker chocolate; el impacto ambiental que genere una empresa hoy en día es de crucial importancia, ha tomado un papel fundamental en la conciencia de las personas y por ende impacta directamente las ventas de la industria.

A nivel económico, el método implementado no puede generar alzas considerables en los precios del mercado, ya que generaría posibles pérdidas de clientes; el ámbito legal se debe considerar para implementar el método, cumpliendo los reglamentos estipulados

por la ley; y por último, la seguridad y salud en el trabajo es el de menor porcentaje debido a que se tiene presente, que cada uno de los métodos se aplicara con sus respectivos implementos para garantizar la calidad de vida de las personas.

Después de determinar la influencia de los criterios, se debe realizar las matrices comparando todas las alternativas con respecto a cada criterio; para identificar cada alternativa en los resultados de las matrices se les designa una secuencia como se muestra en la Tabla 24 así mismo para cada una de las matrices se les asignan una clasificación de acuerdo con la Tabla 22., se realiza la matriz normalizada con la relación entre el valor propuesto y el total de cada método de limpieza, para posteriormente obtener el porcentaje de relevancia con el promedio de los valores normalizados.

**Tabla 24.**

*Secuencia de Alternativas*

CRITERIO 1	Secuencia
Solución extractora Agua	1
Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido	2
Limpieza de tuberías por inyección de aire	3
Limpieza de tuberías por Pig	4
Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua	5
Chorro de agua a ultra alta presión	6
Limpieza CIP	7
Remoción a partir de la microalga <i>Chlorella</i> sp.	8
Reducción por micro nano burbujas (aire-ozono)	9
Limpieza postcosecha	10

**Nota.** Esta tabla muestra la secuencia asignada a cada método de limpieza.

a. Calidad:

La primera matriz por evaluar es la de calidad, se comparan las diez alternativas y se les asigna la importancia según los valores correspondientes en la Tabla 22. Valores de la matriz de selección, la matriz se encuentra en el ANEXO 2., sin embargo, el resultado se presenta en la Figura 13., en donde se identifica que con respecto a este criterio que el



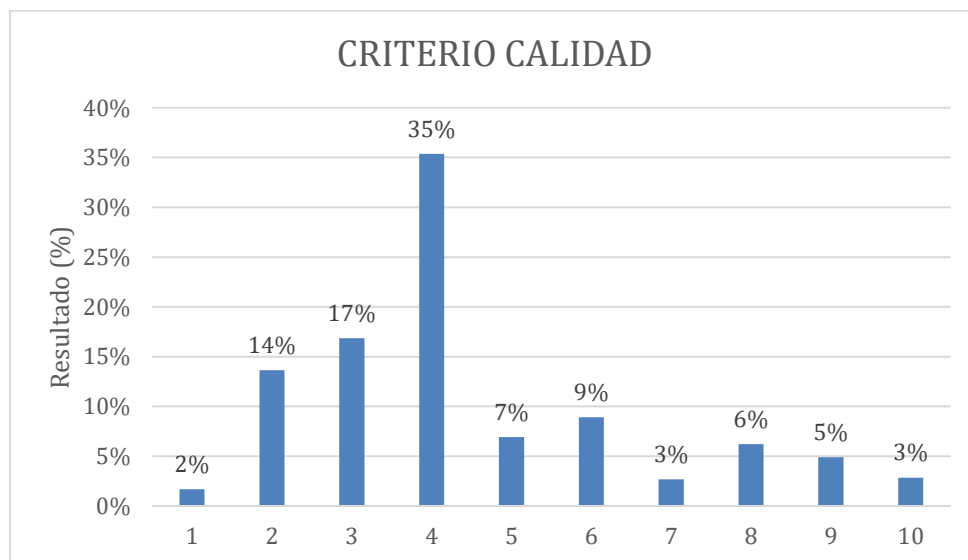
mejor método de limpieza es el de limpieza de tuberías por Pig con un 35% y el método menos favorable es el de solución extractora agua con un 2%.

También, se puede identificar que los mejores métodos son los de limpieza mecánica, ya que son aquellos en los cuales no ponen en riesgo alto el producto, al utilizar sistemas de operación que no tienen sustancias químicas, se evitaría algún tipo de contaminación cruzada con estas sustancias.

Los métodos mecánicos que utilizan como medio fundamental el agua, se ponen en consideración entre los demás métodos de este tipo, ya que se debe implementar un sistema óptimo de secado, con el fin de que el agua no vaya a estar en contacto con el chocolate y pueda alterarlo, por ende, los métodos mecánicos que utilizan implementos u objetos que no poseen ninguna clase de fluido que pueda quedar retenido en las tuberías, ponen en menos riesgo el proceso de fabricación del chocolate.

**Figura 13.**

*Resultado matriz de alternativas en función del criterio de calidad*



**Nota.** Esta figura muestra el porcentaje de importancia de cada alternativa evaluados en el criterio de calidad.

b. Económico:

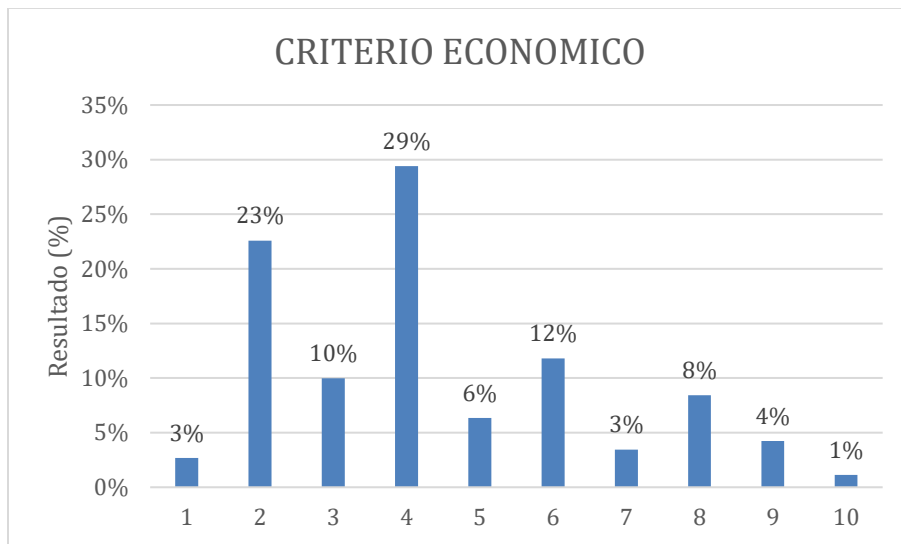
La segunda matriz por evaluar es la del criterio económico, se comparan las diez alternativas teniendo en cuenta el costo de implementación de cada método de limpieza, es decir, al valor inicial o capital de inversión que se asignan de cada alternativa para su puesta en marcha.

La matriz se presenta en el ANEXO 3. y los resultados se presentan en la Figura 14.; en donde se identifica que con respecto a este criterio los mejores métodos son los de limpieza es el de tuberías por Pig con un 29% y el de limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido con un 23%, el método menos favorable es el de limpieza postcosecha con un 1%, esta diferencia se debe a la cantidad de equipos que necesita el método de postcosecha, significándole un aumento en el costo por la compra del mismo.

Para este criterio de selección, se tienen en cuenta los equipos nuevos que se deben implementar, las posibles modificaciones que puede tener la planta en cuanto a tuberías, lo cual genera un alto en el proceso de fabricación, que se ve reflejado en costos, además para los métodos de limpieza químicos, se costearon las soluciones que se deben preparar para efectuar la limpieza y para los métodos mecánicos la adquisición de equipo u objetos necesarios.

**Figura 14.**

*Resultado matriz de alternativas en función del criterio económico*



**Nota.** Esta figura muestra el porcentaje de importancia de cada alternativas evaluados en el criterio económico.

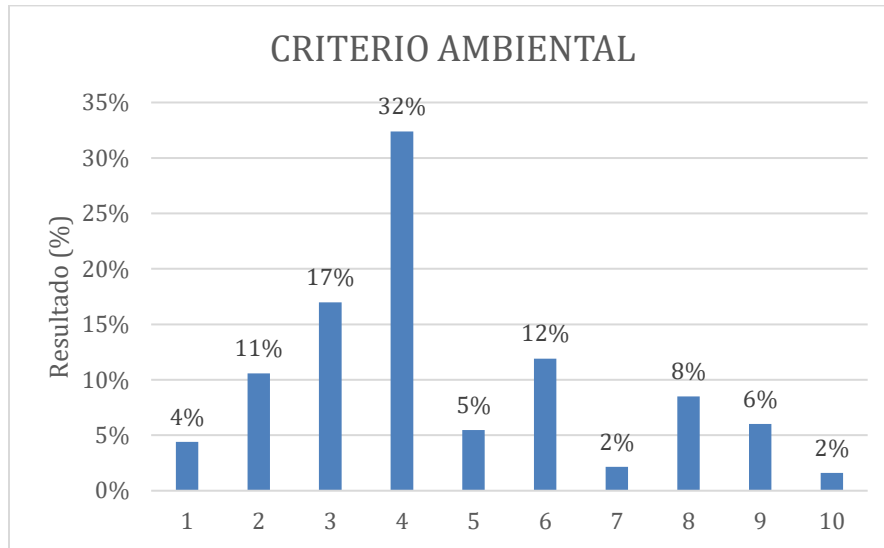
c. Ambiental:

La tercera matriz por evaluar es la del criterio ambiental, se comparan las diez alternativas teniendo en cuenta los residuos generados en cada método al usarse con el producto, en el caso de los métodos de limpieza mecánicos se tuvieron en cuentas los residuos generados que puedan contener chocolate y un fluido (agua, aire o vapor), en el caso de los de pretratamiento son los residuos generados al contacto con el cacao en grano y un fluido (agua, aire-ozono, soluciones químicas, microorganismos), así mismo, se contempló el gasto de los recursos a utilizar y cuales eran restringidos por ser de alto impacto al ecosistema.

La matriz se presenta en el ANEXO 4. y los resultados se presentan en la Figura 15., en donde se identifican que con respecto a este criterio los mejores métodos son los de limpieza es el de tuberías por Pig con un 32% y el de limpieza de tuberías por inyección de aire con un 17%, el método menos favorable es el de limpieza postcosecha y el de limpieza CIP, ambos con un 2%, esta diferencia se debe a la cantidad de residuos que genera los métodos de pretratamiento, por lo que se utilizan sustancias químicas en el proceso de extracción.

**Figura 15.**

Resultado matriz de alternativas en función del criterio ambiental



**Nota.** Esta figura muestra el porcentaje de importancia de cada alternativa evaluados en el criterio ambiental.

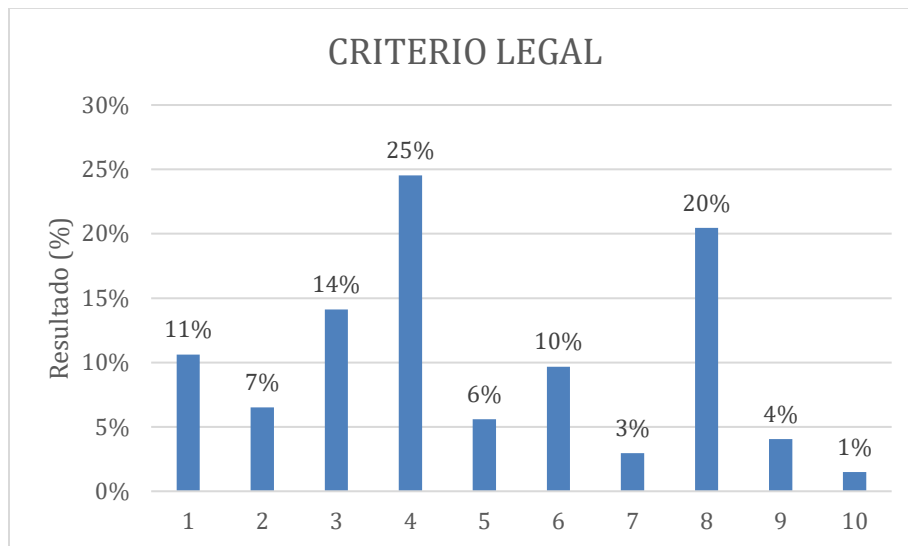
d. Legal:

La cuarta matriz por evaluar es la del criterio legal, se comparan las diez alternativas teniendo en cuenta las normativas que involucran cada método al usarse con el producto, para lo métodos de limpieza mecánicos y de pretratamiento se tuvieron en cuenta las normativas que involucran el contacto con alimentos y la inocuidad del producto (chocolate y productos derivados del chocolate), además de la normatividad para la implementación de los nuevos equipos.

La matriz se presenta en el ANEXO 5 y los resultados se presentan en la Figura 16, en donde se identifican que con respecto a este criterio los mejores métodos son los de limpieza en tuberías por Pig con un 25% y la remoción a partir de la microalga *Chlorella* sp con un 20%, el método menos favorable es el de limpieza postcosecha con un 1% y el de limpieza CIP con un 3%, esta diferencia se debe a la normatividad que debe cumplir las sustancias que se utilizan en los métodos de pretratamiento.

**Figura 16.**

*Resultado matriz de alternativas en función del criterio legal*



**Nota.** Esta figura muestra el porcentaje de importancia de cada alternativa evaluados en el criterio legal.

e. Seguridad y Salud:

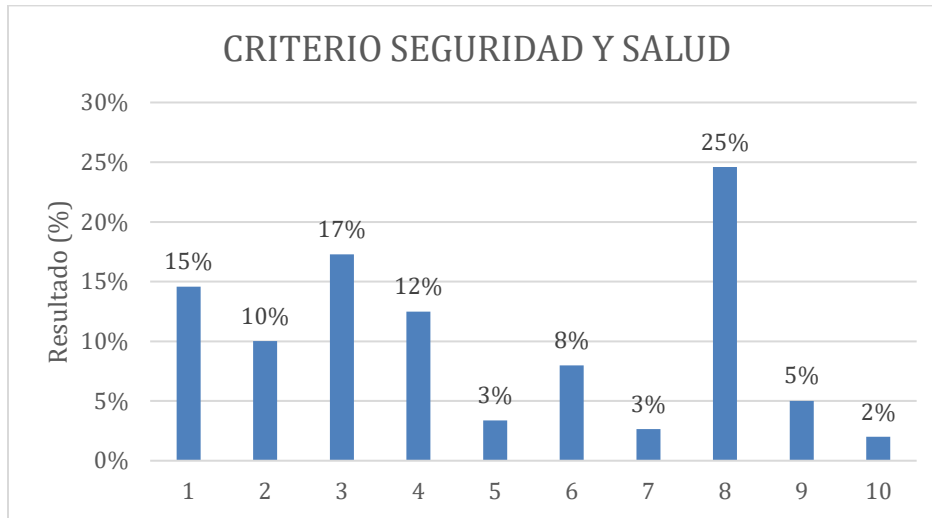
La última matriz por evaluar es la del criterio seguridad y salud, se comparan las diez alternativas teniendo en cuenta los implementos que se deben brindar a todo el personal que deba implementar el método de limpieza, generando el ambiente propenso para la ejecución de todo el proceso.

La matriz se presenta en el ANEXO 6., los resultados se presentan en la Figura 17., en donde se identifican que con respecto a este criterio los mejores métodos son los de remoción a partir de la microalga *Chlorella sp* con un 25% y el de limpieza de tuberías por inyección de aire con un 17%.

El método menos favorable es el de limpieza postcosecha con un 2%, el de limpieza CIP y limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua, ambos con un 3%, esta diferencia se debe al riesgo que puede tener el trabajador al no utilizar las protecciones adecuadas para ejecutar el método de limpieza, se tuvieron en cuenta cuales métodos son menos riesgosos, teniendo en cuenta que las soluciones acidas y básicas son más peligrosas si no se genera un manejo adecuado, a los métodos que utilizan vapor o fluidos calientes, se consideró el riesgo de las tuberías a alta temperatura y a los métodos que transportan fluidos a alta presión, posibles fugas o salidas de la tubería que impacten la salud del trabajador.

**Figura 17.**

Resultado matriz de alternativas en función del criterio seguridad y salud



**Nota.** Esta figura muestra el porcentaje de importancia de cada alternativa evaluados en el criterio de salud y seguridad.

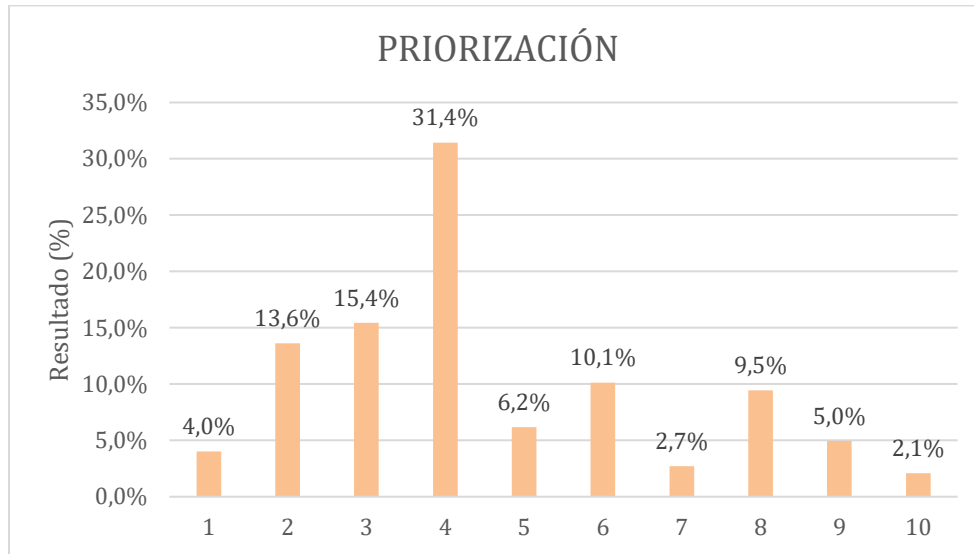
### **3.5.2. Matriz de priorización de las alternativas con respecto a los criterios**

Después de realizar el análisis de los cinco criterios con respecto a las diez alternativas se realiza una ponderación final, que se presenta en el ANEXO 7., con el fin de identificar la alternativa mejor viable para implementar en la empresa, para realizar esta matriz se tiene en cuenta cada uno de los resultados obtenidos anteriormente que comprara las alternativas con respecto a un criterio, se realiza una ponderación y posteriormente se realiza la priorización con la función suma producto de Excel la cual multiplica los valores de las matrices y devuelve la suma de los productos.

Según los resultados para cada alternativa de limpieza y los resultados de la ponderación para cada método de limpieza, se realiza la Figura 18., el resultado de la matriz de decisión, donde es el método de limpieza de tuberías por PIG, con un valor de 31,4% el elegido; este método de limpieza es mecánico y se aplicaría dentro del proceso de producción de la planta industrial, cumpliendo con el objetivo de evitar la contaminación cruzada entre productos dentro de la tubería por el transporte de este.

**Figura 18.**

*Resultado priorización del método*



**Nota.** Esta figura muestra el porcentaje de ponderación de todas las alternativas y los criterios evaluados.



#### **4. CONDICIONES TÉCNICAS Y OPERATIVAS DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA.**

En este capítulo se describirán los equipos, las condiciones técnicas y operativas de la alternativa seleccionada en el capítulo anterior, se tiene en cuenta todas las variables que se requieren para la implementación del método de limpieza; los cálculos se basan en el proceso actual de la planta de producción de Luker chocolate, centrado en los datos de la caracterización de la base de datos que se encuentran en la empresa.

##### **4.1. Principio de operación del PIG**

En los procesos de manufactura, es común que al finalizar se deba generar un proceso de limpieza antes de realizar el siguiente lote de producción, a menudo las tuberías por sus dimensiones son las que generan mayor dificultad para realizar este proceso, por ende existen métodos que se emplean para facilitarlos, un ejemplo de ello es el método Pig, el cual mediante desplazamiento por la tubería con ayuda de aire o agua genera la eliminación de posibles impurezas [37].

Este Pig es de una sola pieza y puede tener diferentes formas, en lo general se encuentra cilíndrico o esférico, sin partes arrugadas, se comercializan con anillos o discos incorporados, encargados de la limpieza; son elásticos lo cual facilita su paso en las tuberías, bidireccionales y con un adecuado manejo se puede reutilizar, por lo general se encuentran en materiales como el uretano, polietileno y caucho fluorado, sin embargo, existen Pig metálicos, se debe considerar el material de elemento y así mismo el producto de planta para no generar incompatibilidades o reacciones no deseadas [25].

El método de limpieza, puede generar mayor disponibilidad en las líneas de producción, ya que no es necesario una limpieza extrema en cada cambio de lote, ahorrando tiempo y dinero, garantizando que el elemento Pig no genera contaminación o mezcla entre los productos, es ideal para industrias que realizan varias referencias por la misma línea de producción, se reduce considerablemente, el uso del agua y de residuos por limpiezas ejecutadas con sustancias químicas, en alimentos está recomendada para empresas

lácteas, de bebidas como jugos y zumos, industrias oleo químicas e industrias chocolateras [25].

Estos elementos poseen tres partes fundamentales [37]:

- a. Cuerpo: Se considera la estructura base del Pig, se diseñan en materiales de goma para garantizar la flexibilidad y resistencia del elemento.
- b. Componentes de sello: Se pueden incorporar 3 tipos de sellos
  - i. Copas planas: Su acción de limpieza se ejerce sobre las tuberías, al generar fricción entre este tipo de disco y la línea de proceso, generalmente se encuentran de poliuretano.
  - ii. Copas cónicas: Se incorporan al cuerpo del Pig para garantizar el correcto selle entre el elemento y la tubería, se consideran una buena opción cuando se tiene tuberías de diámetros internos variables, se debe aclarar que no genera suficiente fricción para remover todas las impurezas de la tubería.
  - iii. Discos: Se incorporan para remover líquidos o sólidos incorporados en las tuberías, ejercen suficiente fricción para raspar y eliminar las impurezas, se pueden incorporar discos de sellado encargados de la limpieza o discos guías los cuales soportan el peso del cuerpo.
- c. Accesorios complementarios: Se puede considerar, la incorporación de accesorios que den soporte a la acción de sellado o raspado, como, por ejemplo, cepillos de alambre, cuchillas o gratas, eliminan las acumulaciones, así mismo se pueden adicionar elementos que faciliten la remoción de materiales metálicos.

Se encuentran 3 tipos generales de Pig [25]:

- a. Pig con labios reemplazables: Al cuerpo del Pig se le incorporan discos roscados, los cuales realizan la acción de la limpieza, mediante la actividad de raspar las tuberías, eliminan las impurezas que quedan retenidas en ella, su vida útil es corta, pero sus discos se pueden reemplazar siempre que sea necesario, se utilizan mayormente en industrias de pinturas y barnices.
- b. Pig con labios fijos: Se consideran Pig de una sola pieza, debido a que sus discos están fijos al cuerpo del elemento, son unidireccionales y pueden utilizados en tuberías con curvas de radio 3D; se emplean en industrias farmacéuticas, cosméticas y de alimentos.
- c. Pig Cilíndrico: Se considera de una sola pieza, y posee en cada extremo un anillo o disco sobredimensionado, este es el encargado de realizar la limpieza por medio de la acción de rascado en las tuberías; se emplean en industrias de alimentos, cosméticos y farmacéuticos.

El método Pig debe ser instalado para desplazarse por las tuberías, por medio de estaciones lanzadoras como se muestra en la Figura 19. y las partes se describen en la Tabla 25., estas deben ser diseñadas con el fin que, la introducción del elemento se realice con facilidad y que la posición inicial sea óptima para la correcta impulsión, se diseña una unidad de envío y otra de recepción, los cuales serán los puntos de llegada y finalización del Pig, se genera desplazamiento a partir de aire comprimido o de agua a presión [38].

**Figura 19.**

*Sistema de funcionamiento básico del Pig*



**Nota.** La figura representa el funcionamiento básico del Pig en una tubería. Tomado de: Inoxpa source solutions, “Ficha técnica Limpieza Silpig.”

**Tabla 25.**

*Partes del funcionamiento del Pig en una tubería*

NUMERAL	DESCRIPCIÓN
1	del cliente
2	bomba
3	estación SIL PIG de envío
4	PIG
5	Válvula mariposa automática
6	Válvula mariposa automática
7	Detector PIG
8	Válvula multivia KH
9	Drenaje
10	Detector PIG
11	Válvula mariposa automática
12	estación SIL PIG de recepción
13	Válvula mariposa automática
14	Válvula multivia KH
15	drenaje
16	del cliente

**Nota.** La tabla describe las partes de la Figura 19.

Sistema de funcionamiento básico del Pig en una tubería.

Tomado de: Inoxpa source solutions, “Ficha técnica Limpieza Silpig.”

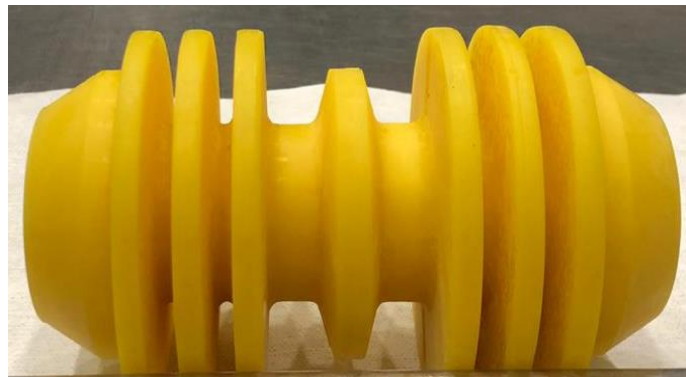
## 4.2. Planteamiento de condiciones técnicas del método PIG

### 4.2.1. Método PIG

- a. Material: Los proveedores del elemento mecánico brindan diferentes alternativas, según el tipo de material, se descarta la opción de utilizar un Pig metálico para evitar contaminación al contacto con el fluido dentro de la tubería, por ende, la opción más viable es la del material de Goma como se muestra en la Figura 20.
- b. Pig de Goma, utilizada en la industria de alimentos para asegurar la calidad del producto al momento de la limpieza.

**Figura 20.**

*Pig de Goma*



**Nota.** La figura representa un Pig de goma usados en la industria.

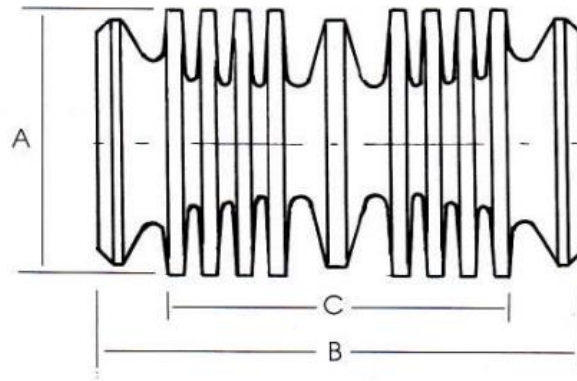
- c. Clasificación: En la industria existen diferentes clasificaciones de Pig según el uso y el objetivo que se requieren, dentro de los usados para limpieza de tuberías hay dos clases, el Uni-direccional y los Bidireccional, el primero corresponde a que el sentido en el movimiento del Pig es solamente uno, esto requiere que en el diseño de Pig tenga una copa en uno de sus extremos; el bidireccional corresponde a un diseño de doble sentido, el cual contiene dos copas, una a cada extremo del Pig.
- d. Dimensiones: Los Pig al ser elementos mecánicos, son diseñados por los proveedores que ofrecen el servicio, por ende, se debe buscar elementos que cumplan con las necesidades de la empresa y así mismo genere la mayor

rentabilidad al implementarlo, según la Figura 21. y Tabla 26. sacada del catálogo de proveedor, se puede implementar en Luker Chocolate las siguientes dimensiones especificadas representadas en la Tabla 27.

Dimensiones de PIG seleccionado

**Figura 21.**

*Diseño de PIG*



**Nota.** La figura representa el diseño del Pig. Tomado de: Flousa s.a, “efficient displacement through short-radius.”

**Tabla 26.**

*Dimensiones del Pig*

DIMENSIONES / PESO / MATERIAL						
Tamaño nominal de la tubería	DIMENSIONES (in)			Peso (lbs)	Uretano	Otro*
	A	B	C			
2"	2.16	3.85	2.69	0.50	X	
3"	3.15	5.55	3.69	1.00	X	X
4"	4.22	7.45	5.24	2.50	X	X
6"	6.33	10.76	7.38	9.00	X	
8"	8.25	15.40	10.40	20.50	X	
10"	10.15	17.74	11.96	30.00	X	
12"	12.10	21.51	14.76	50.00	X	

\*Buna o Viton / tamaños especiales bajo pedido

**Nota.** La tabla describe las dimensiones del Pig, implementados para las industrias. Tomado de: Flousa s.a, “efficient displacement through short-radius.”

**Tabla 27.**

*Dimensiones de PIG seleccionado*

Dimensión	Pulgadas(in)	Metros (m)
A	3.15	0.08001
B	5.55	0.14097
C	3.69	0.093726

**Nota.** La tabla describe las dimensiones del Pig adecuadas a la tubería de la planta.

- e. Fluido de transporte: El fluido de transporte es de vital importancia para generar el principio fundamental de desplazamiento de Pig, se elige el aire comprimido como fluido de servicio, el cual debe pasar por un filtro, evitando así que contenga algún tipo de impureza que pueda generar contaminación cruzada en las tuberías, adicionalmente se aclara que se descarta el uso de agua, por efectos de minimizar residuos y evitar que este recurso pueda entrar en contacto con el producto en proceso, generando cambios en las características fisicoquímicas evaluadas por calidad [38].

El aire se obtendrá del ambiente, pasando primero por el compresor Atlas de 100 hp, el cual ya está instalado en la planta industrial para suministrar a los equipos que lo requieran; luego, el aire pasa por tres diferentes filtros, para asegurar un aire inocuo al momento de tener contacto con el alimento. Los tres filtros son UD, PDp y QD, siendo el primero un filtro eficiente para retener sustancias como el aerosol en aceite, polvo húmedo y gotas de agua, el segundo es un filtro eficiente para retener todo el material particulado o polvo seco, ayuda a retener la carga microbiana que tiene el aire y por último, un filtro eficiente para retener el vapor de aceite; el orden es sugerido así como se explicó respectivamente según los proveedores de aire comprimido [40].

- f. Lavado del PIG: Después de realizar la limpieza en las tuberías, el Pig es desmontado y debe pasar por un proceso de lavado antes de iniciar su nuevo ciclo al cambio de lote, este consiste en un lavado con agua caliente el cual asegura

que los residuos de chocolate que retire el instrumento de las tuberías se desprendan de la superficie del Pig.

En los tres cambios de lote diarios contemplados para el proyecto se puede solamente lavar con agua caliente asegurándose que no quede ningún tipo de residuo en el Pig y además el secado del instrumento antes del nuevo montaje de limpieza es fundamental para evitar algún tipo de contaminación, al finalizar la jornada laboral el Pig debe ser lavado con un jabón especial que no posea olor ni color, con el fin de asegurar la calidad del producto que pase por la tubería intervenida para la limpieza y así mismo debe ser secado antes de iniciar su nuevo ciclo.

#### **4.2.2. Tuberías**

- a. Tuberías: Se contemplan los puntos críticos del proceso, en donde se evidencia el aumento significativo de los niveles de cadmio, comprendidos entre dos tramos de tuberías que conectan: los molinos de bolas con el tanque de acopio y los molinos refinadores con el tanque de acopio; actualmente, Luker Chocolate cuenta con tuberías de 2 ½ in para estos tramos del proceso, por ende, según la Tabla 26., se deben realizar modificaciones en estas dos secciones de la planta, para lograr el tamaño adecuado en la implementación del método Pig, se ajusta la tubería a 3 in lo cual no genera un cambio impactante en el espacio ocupado y además por la demanda del flujo de producción, no sería pertinente considerar la disminución del tamaño de las tuberías.

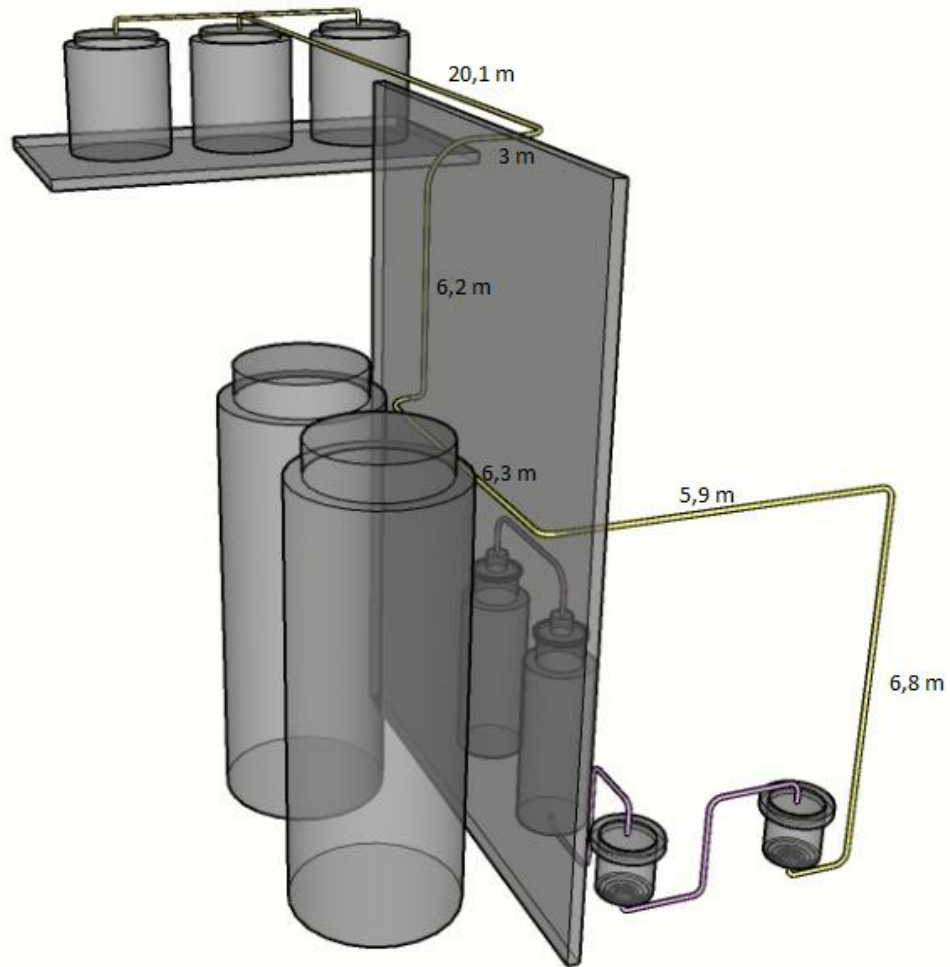
Se debe tener presente, que la tubería, aunque puede cambiar de orientación, ya sea vertical u horizontal, debe conservar el mismo diámetro interno desde la estación de envío hasta la unidad receptora. Las figuras 10,11,12 y 13 muestran el trazado de la tubería de los puntos críticos seleccionados dentro del proceso industrial, con las respectivas longitudes, tramos verticales y horizontales de las líneas 1,2 y 3, que corresponden a molino de bolas tanque de acopio, del molino



refinador 1 al tanque de acopio y del molino refinador 2 al tanque de acopio respectivamente.

**Figura 22.**

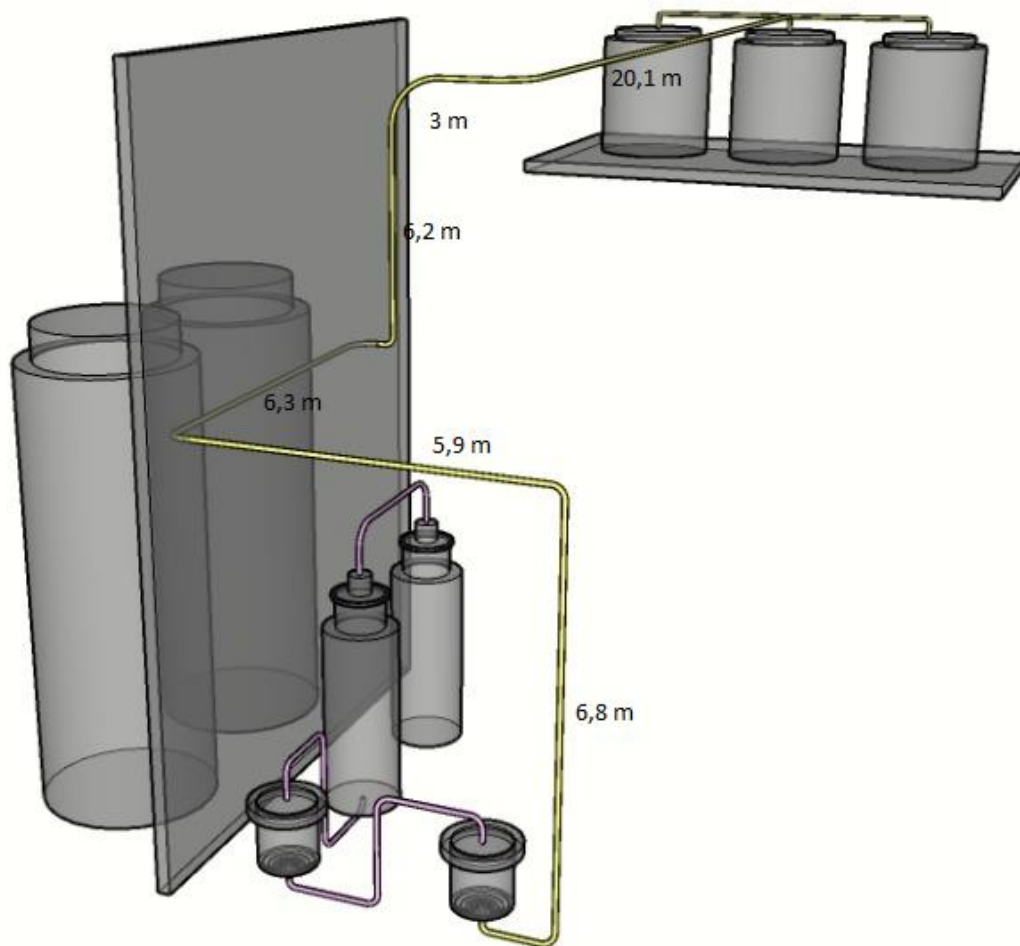
*Línea 1: Molinos de bolas a Tanques de acopio – Vista 1*



**Nota.** La figura representa la línea de tubería 1, desde molinos de bolas hasta tanque de acopio con una vista 1.

### Figura 23.

*Línea 1: Molinos de bolas a Tanques de acopio – Vista 2*



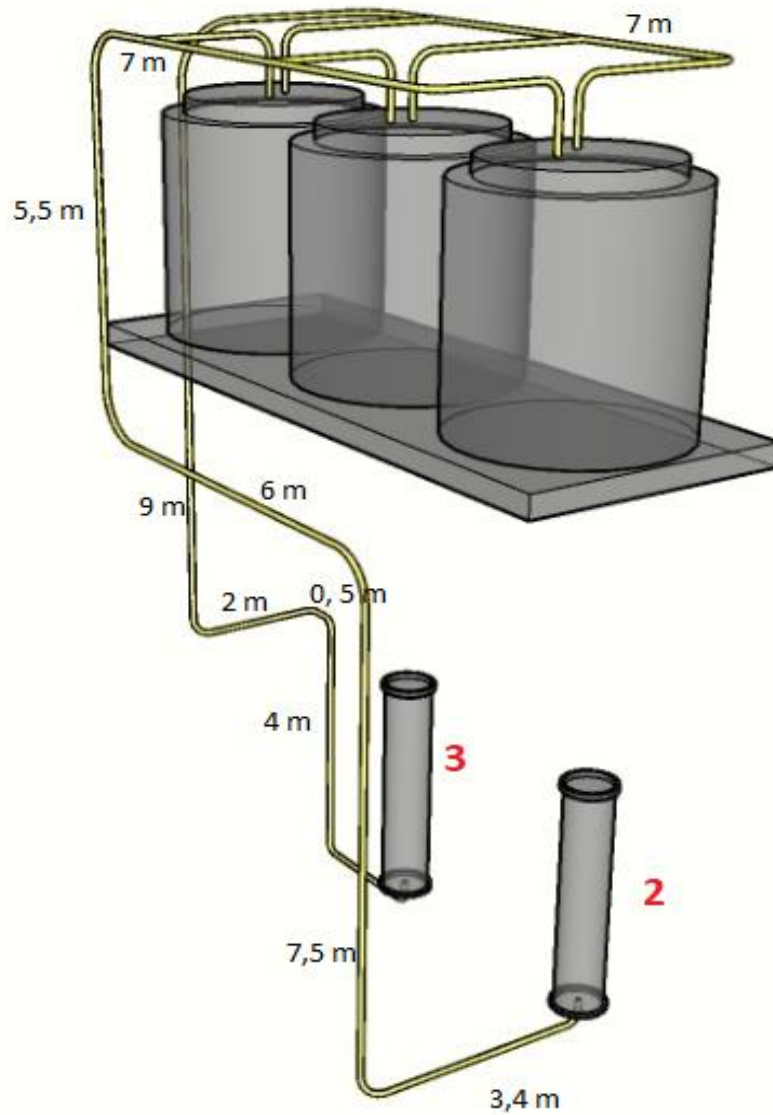
**Nota.** La figura representa la línea de tubería 1, desde molinos de bolas hasta tanque de acopio con una vista 2.

En la línea de producción 1, que se muestran en las Figura 22. y Figura 23. se puede observar dos diferentes vistas o perspectivas de cómo se encuentra la planta actualmente en estos sectores, se evidencian en color amarillo las tuberías que deben ser intervenidas con 48,3 m totales para esta primera línea de fabricación, se tiene en cuenta que el elemento Pig no tiene funcionamiento en las

tuberías con accesorios en T, por ende, el sistema de limpieza finalizaría en la tubería de 20,1 m.

**Figura 24.**

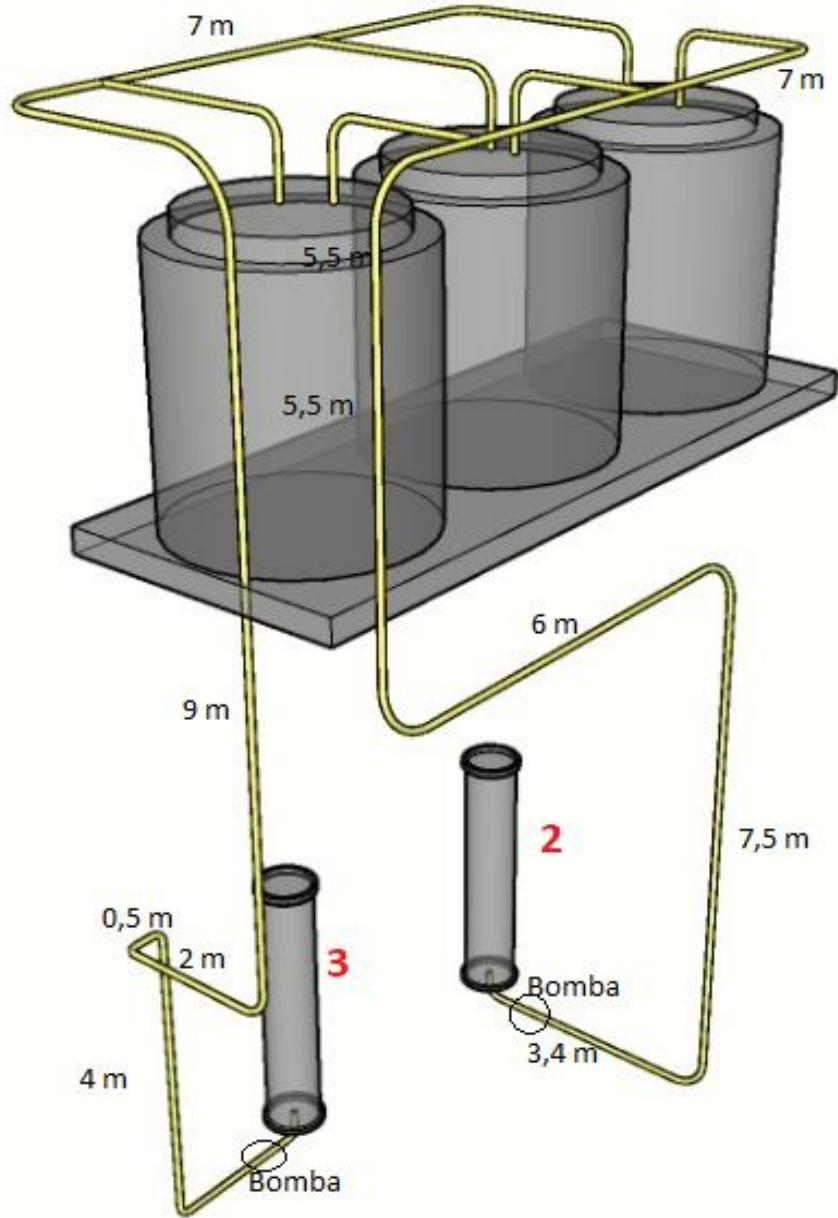
*Línea 2 y 3: Tanques de acopio a molinos refinadores – Vista 1*



**Nota.** La figura representa la línea de tubería 2 y 3, desde tanque de acopio hasta molinos refinadores 1 y 2 con una vista 1.

**Figura 25.**

*Línea 2 y 3: Tanques de acopio a molinos refinadores – Vista 2*



**Nota.** La figura representa la línea de tubería 2 y 3, desde tanque de acopio hasta molinos refinadores 1 y 2 con una vista 2.

En la línea de producción 2 y 3, que se muestran en las Figura 24. y Figura 25. se puede observar dos diferentes vistas o perspectivas de cómo se encuentra la planta actualmente en estos sectores, se evidencian en color amarillo las tuberías que deben ser intervenidas con 22,4 m totales para esta segunda línea de fabricación, y 18,5 m para la tercera línea de fabricación, se tiene en cuenta que el elemento Pig no tiene funcionamiento en las tuberías con accesorios en T, por ende el proceso de limpieza debe finalizar justo antes de la tuberías que conectan los tanques de acopio.

b. Potencia de la bomba

Al cambiar las tuberías de diámetro, de 2 ½ in a 3 in, se tiene en cuenta el cálculo de la potencia de la bomba que debe tener para poder transportar el licor de cacao con la nueva tubería. Lo primero que se tiene en cuenta son las pérdidas del licor de cacao por la tubería y por los accesorios de cada línea, luego de tener las pérdidas se halla la presión en el punto 2 de cada línea y por último se determina la potencia requería por cada bomba, los resultados se muestran en la Tabla 28. y la muestra de cálculo se presenta en el Anexo 8.

**Tabla 28.**

*Resultados cálculo de la potencia*

<b>Tuberías</b>	<b>h<sub>f</sub> (m)</b>	<b>P<sub>2</sub> (Pa)</b>	<b>Potencia (W)</b>
Línea 1: Molinos de bolas a Tanques 28, 50 y 107	0,67	161917	645
Línea 2: Molino refinador 1 a Tanques 28, 50 y 107	0,33	65285	430
Línea 3: Molino refinador 2 a Tanques 28, 50 y 107	0,31	65562	429,7

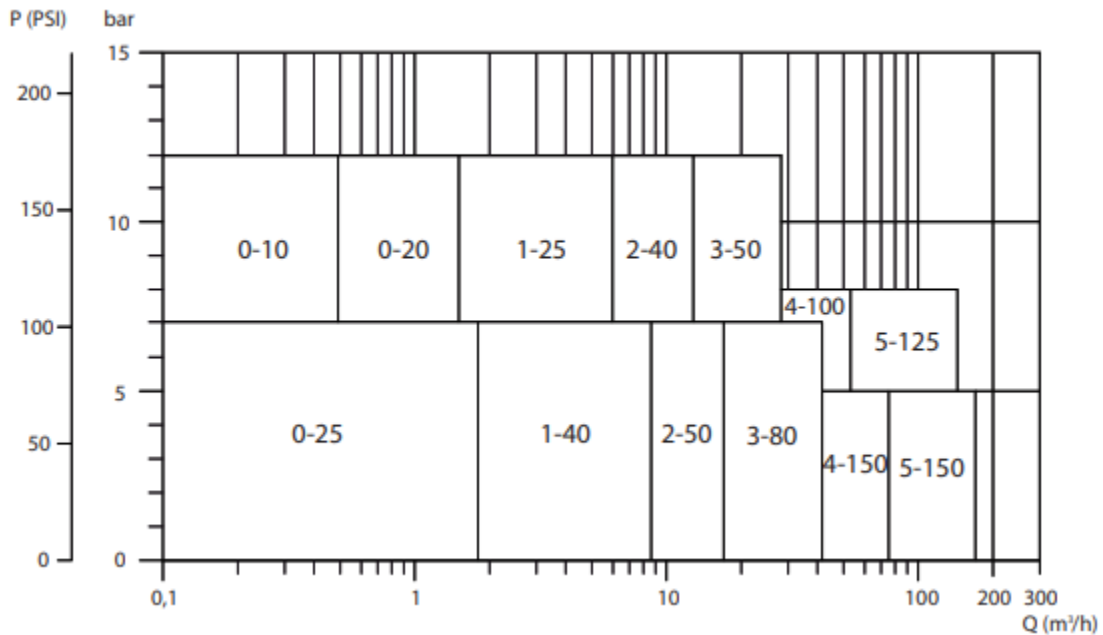
**Nota.** La tabla muestra los valores de potencia calculado para cada línea de tubería.

Con la potencia definida se deduce que las bombas que se tienen actualmente para estas tres líneas en la planta de Luker chocolate, se adaptan al cambio de diámetro, debido a

que según ficha técnica la bomba SLR1-40 maneja como caudal máximo 7,9 m<sup>3</sup>/s y Presión máxima de trabajo 7 bar.

**Figura 26.**

*Área de Selección de bomba*



**Nota.** La figura representa el área de selección de una bomba. Tomado de: B. Lobular, "Bomba lobular," no. 0, 2019.

c. Transferencia de calor

Se realizó la transferencia de calor que ocurre desde el agua de calentamiento a la tubería que transporta el licor de cacao, esto con el fin de determinar el flujo masico del agua que debe pasar por la tubería encamisada para cumplir con el requerimiento de la temperatura a 45°C. Como datos para tener en cuenta dentro del proceso, se conoce que el licor de cacao en las etapas del proceso se encuentra a 45°C, en el transporte de la tubería entre una etapa y otra debe permanecer a esta misma temperatura para poder

ser movilizado el fluido, es por esto, que se hace pasar agua caliente a 50°C por la camisa de la tubería, con el fin de realizar la transferencia de calor necesaria al sistema.

Se obtuvo que el calor cedido por el agua caliente para mantener la temperatura a 45°C para cada línea se presenta en la Tabla 29, junto con el flujo masico necesarios de agua caliente que se debe aplicar en cada línea de tubería, la muestra de cálculo se presenta en el Anexo 9.

**Tabla 29.**

*Resultados Calor y flujo masico del agua caliente*

<b>Tuberías</b>	<b>Q(w)</b>	<b><math>\dot{m}_{H_2O}</math> (kg/s)</b>
Línea 1: Molinos de bolas a Tanques 28, 50 y 107	-3783,40	2,72
Línea 2: Molino refinador 1 a Tanques 28, 50 y 107	-1754,62	1,26
Línea 3: Molino refinador 2 a Tanques 28, 50 y 107	-1449,13	1,04

**Nota.** La tabla muestra el calor y el flujo masico que se requiere para cada línea de tubería.

**4.2.3. Accesorios**

- a. Codos: Al realizar cambios en la orientación de la tubería, se deben contemplar uniones que lo permitan, por lo tanto, los codos implementados en estos tramos de la línea de operación no pueden ser de ángulos de 90°, ya que pueden impedir el paso continuo del elemento mecánico, se consideran uniones de 45° que permitan mediante la elasticidad del Pig el desplazamiento sin inconvenientes. En la Figura 27. se muestran algunos ejemplos.

**Figura 27.**

*Tipo de codos*



**Nota.** La ilustración representa los codos de 90° y 45°. Tomado de: Crane, “Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías,” 1989.

- b. Válvulas de bola: En los procesos de fabricación se deben tener accesorios que faciliten el apoyo en caso de emergencia, por ende, se instalan válvulas en las tuberías; actualmente, los tramos seleccionados cuentan con válvulas mariposas las cuales deben ser cambiadas por válvulas de bola, que permiten el paso continuo y sin inconveniente del Pig por medio de la tubería. En la Figura 28 y Figura 29.

**Figura 28.**

*Válvulas mariposas alimentarias*



**Nota.** La figura representa unas válvulas mariposa usadas en la industria alimentaria. Tomado de: Inoxalia zona centro, “Válvulas de Mariposa Alimentarias.”



### **Figura 29.**

#### *Válvulas de bola alimentarias*



**Nota.** La figura representa unas válvulas de bola usadas en la industria alimentaria. Tomado de: Inoxalia zona centro, “Válvulas de Bola con o sin Actuador (Línea Alimentaria).”

### **4.3. Planteamiento de condiciones operativas del método PIG**

En las condiciones operativas del método de limpieza Pig, se tuvieron en cuentas todos los panoramas relacionados de manera directa e indirecta con el funcionamiento del Pig por las tuberías, como el fluido en la tubería, el producto remanente en la tubería, las propiedades físicas de las tuberías, la fuerza necesaria para transportarse por medio de la tubería, entre otros.

#### **4.3.1. Características del licor de cacao dentro de la tubería**

El fluido que pasa a través de la tubería es licor de cacao, este se transporta a una velocidad de 51,57 L/min desde los molinos de bolas ubicados en la etapa de molienda principal, hasta los tanques de acopio; todas las bombas ubicadas en estas dos etapas involucradas manejan el mismo caudal del proceso.

Conociendo el caudal del proceso y el área transversal de la tubería de transporte se halla la velocidad del fluido como se muestra en la Ecuación 1, donde  $v$  es la velocidad del licor de cacao ( $\frac{m}{s}$ ),  $Q$  es el caudal del licor de cacao ( $\frac{m^3}{s}$ ) y  $A$  es el área transversal de la tubería ( $m^2$ ), expresada con la Ecuación 2, siendo  $D$  el diámetro de la tubería ( $m$ ), para el cálculo del peso específico se utiliza la Ecuación 16, los resultados se muestran en la Tabla 30.

*Ecuación 1*

$$v = \frac{Q}{S}$$

*Ecuación 2*

$$S = \frac{\pi(D^2)}{4}$$

**Tabla 30.**

Características del fluido

<b>CARACTERISTICAS DEL LICOR DE CACAO</b>			
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	1100	Velocidad (m/s)	0,27
Gravedad (m/s <sup>2</sup> )	9,81	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	0,00086
Peso específico (N/m <sup>3</sup> )	11,77	Viscosidad (Pa*s)	7,0

**Nota.** La tabla describe las características fisicoquímicas del licor de cacao

#### **4.3.2. Características de la tubería**

La tubería utilizada en el transporte de alimentos ya sea bebida, alimentos, lácteos, etc deben cumplir con la norma ASTM A270, la cual determina el acabado superficial de la tubería interna y externa, en función del tipo de material a utilizar en el pulido [45], para el caso del licor de cacao las tuberías están fabricadas bajo esta norma, el material es de acero inoxidable 304 y los diámetros usados para los cálculos fueron dos: 2 ½ in y 3 in, en la Tabla 31. se describen las dimensiones, peso y demás características de la tubería [46] .

**Tabla 31.**

*Características tubería*

<b>Material</b>	<b>Acero inoxidable 304</b>			
DN (in)	DN (mm)	OD (mm)	Wall (mm)	W <sub>pe</sub> (kg/m)
2 1/2	65	73	5,16	8,63
3	80	88,9	5,49	11,29

**Nota.** La tabla describe las tuberías utilizadas en la empresa Luker Chocolate.

**4.3.3. Cálculos masa retenida en tuberías**

Como se mencionó anteriormente, los niveles de cadmio en cada producción cambian de acuerdo al lote anterior procesado en Luker Chocolate, se considera una contaminación cruzada por los residuos o masa retenida del licor de cacao que queda adherida a la tubería en cada cambio de lote, el flujo del fluido a través de las tuberías seleccionadas debe mantener una temperatura óptima de 45°C, la cual asegure que a pesar de ser un fluido viscoso, el paso se realice de forma continua y sin inconvenientes con ayuda de las bombas.

Al considerar el fluido transportado a través de la tubería, como un fluido viscoso que adquiere la propiedad de ser pegajoso ante cualquier superficie, se comprueba como la adhesión del licor de cacao a la tubería es la principal causa de la contaminación cruzada en los procesos de manufactura del chocolate, cabe aclarar que el fluido mientras se encuentre en operación de fabricación y/o de limpieza, no cambiará a estado sólido ya que la tubería encamisada con agua caliente mantendrá el licor de cacao a la temperatura adecuada.

La cantidad de masa en licor de cacao que queda retenida en las tuberías después de terminar el proceso de transporte, se calcularon en base a las fórmulas del volumen de un cilindro, lo primero que se determinó fueron las longitudes totales de las tuberías, sus tramos, como se indican en la Figura 22., se sumaron todos los tramos verticales y horizontales que conforman cada línea de tubería, estos datos se representan en la Tabla 32.

**Tabla 32.***Longitudes totales por la línea de tubería*

<b>Tuberías</b>	<b>Diámetro (m)</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Longitud Vertical (m)</b>	<b>Longitud Horizontal (m)</b>
Línea 1: Molinos de bolas a Tanques 28, 50 y 107	0,08	48,3	13	35,3
Línea 2: Molino refinador 1 a Tanques 28, 50 y 107	0,08	22,4	13	9,4
Línea 3: Molino refinador 2 a Tanques 28, 50 y 107	0,08	18,5	13	5,5

**Nota.** La tabla describe las longitudes totales por la línea de tubería, desglosada entre verticales y horizontales.

En las líneas de la tubería 2 y 3, no se tuvieron en cuenta los últimos 7 m de longitud horizontal, que son la vía de llegada a cada tanque de acopio, debido a que en ese tramo de tubería se tiene como accesorio tes para cada tanque, hay que recordar que el sistema Pig no le es posible pasar por estos accesorios porque se desviaría de la ruta del destino, todo esto en recomendaciones de proveedores consultados para el método; por lo tanto, no se sumaran ni se tendrán en cuenta para el desarrollo del proyecto.

Luego de identificar las longitudes en cada línea de tubería, se halló el volumen ocupado de cada tubería vertical y horizontal, expresados en la Ecuación 3 y Ecuación 4 respectivamente; donde  $R$  es el radio de la tubería ( $m$ ), tomando el dato de la Tabla 31. para un diámetro de 3 pulgadas y  $L$  es la longitud de la tubería ( $m$ ) tomando el dato de la Tabla 32.

Como dato de referencia, según los ensayos, seguimientos y base de datos de la empresa Luker Chocolate, como ejemplo claro se tiene que de una tubería con orientación vertical de 7,9 m se le extrajo una masa de licor de cacao de 44 kg aproximadamente, por ende, para las tuberías verticales el volumen se considera completo mientras que en las tuberías horizontales la masa retenida es igual a la mitad del volumen  $\frac{V}{2}$ .

*Ecuación 3*

$$V_{vertical} = \pi * R^2 * L$$

*Ecuación 4*

$$V_{Horizontal} = \frac{\pi * R^2 * L}{2}$$

Al conocer el volumen de las tuberías en cada línea, se halla la masa retenida con ayuda de la densidad del licor de cacao, expresada en la Ecuación 5, donde  $M$  es igual a la masa de licor de cacao ( $Kg$ ),  $V$  es igual al volumen de la tubería ( $m^3$ ) y  $\rho$  es la densidad del licor de cacao ( $\frac{Kg}{m^3}$ ) tomando los datos de la Tabla 30.

Características del fluido.

*Ecuación 5*

$$M = V * \rho$$

Dará como resultado, una masa total de 169 kg para la línea 1, 98 kg para la línea 2 y 87 kg para la línea 3, en la Tabla 33. se resume todos los resultados de cada ecuación propuesta anteriormente para llegar a la Masa total ( $Kg$ ).

**Tabla 33.**

*Masa total por la línea de tubería*

<b>Tuberías</b>	<b>Volumen Vertical (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Masa tubería vertical (kg)</b>	<b>Volumen Tubería Horizontal (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Masa tubería horizontal (kg)</b>	<b>Masa total (kg)</b>
Línea 1: Molinos de bolas a Tanques 28, 50 y 107	0,065	71,88	0,09	97,59	169
Línea 2: Molino refinador 1 a Tanques 28, 50 y 107	0,065	71,88	0,02	25,99	98
Línea 3: Molino refinador 2 a Tanques 28, 50 y 107	0,065	71,88	0,01	15,21	87

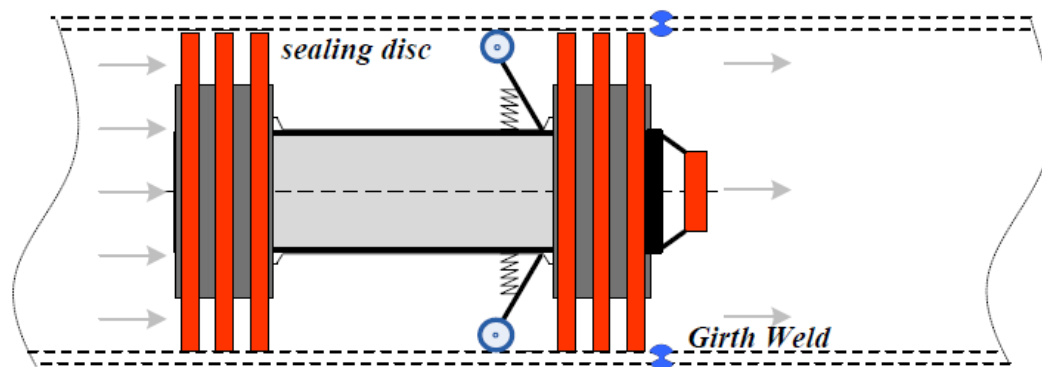
**Nota.** La tabla describe los resultados de cada ecuación que se realizó para hallar la masa total que queda retenida en cada línea de tubería.

#### 4.3.4. Cálculos movimiento del Pig en tuberías sin pérdidas de fricción

El Pig está conformado por un marco y dos secciones de goma, se mueve a través de la tubería gracias al fluido que empuja el objeto por la parte de atrás, como se muestra en la Figura 30., en este caso el fluido que empuja el Pig es el aire, por lo tanto, se debe calcular la fuerza necesaria a través de la tubería que se le aplicaría al objeto.

**Figura 30.**

*Movimiento del Pig por la tubería*



**Nota.** La figura representa el movimiento del Pig por la tubería interna en dirección al flujo. Tomado de: H. Zhang, S. Zhang, S. Liu, and Y. Wang, "Collisional vibration of PIGs (pipeline inspection gauges) passing through girth welds in pipelines," J. Nat. Gas Sci. Eng., vol. 37, pp. 15–28, 2017, doi: 10.1016/j.jngse.2016.11.035.

La presión diferencial que se genera por el movimiento del Pig en la tubería debe ser la fuerza que se aplicará para lograr el movimiento de este, según la literatura, la fórmula para hallar la fuerza total es representada en la Ecuación 6, donde  $F$  es la fuerza necesaria para el movimiento del Pig ( $N$ ),  $\Delta p$  es la diferencia de presión ( $Pa$ ),  $S$  es el área transversal que atraviesa el Pig ( $m^2$ ) y  $e$  es la eficiencia del sistema Pig[47].

*Ecuación 6*

$$F(N) = \Delta p * S * e$$

El área transversal que atraviesa el Pig por la tubería se determina por medio de la Ecuación 2 y la diferencia de presión se determina por medio de la ecuación de Bernoulli [48], expresada en la Ecuación 7, donde  $P_A$  y  $P_B$  son la presión al inicio y al final de la tubería,  $v_A$  y  $v_B$  es la velocidad del fluido de empuje y la del Pig respectivamente,  $\rho$  es la densidad del licor de cacao  $\frac{Kg}{m^3}$ ,  $g$  es la gravedad  $\frac{m}{s^2}$  y  $h_A$  y  $h_B$  es la altura al inicio y al final de la tubería.

*Ecuación 7*

$$\frac{v_1^2}{2 * g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{v_2^2}{2 * g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + h_f$$

Despejando de la Ecuación 7,  $P_A - P_B$ , se obtiene como resultado la Ecuación 8 representada a continuación:

*Ecuación 8*

$$\Delta P(Pa) = \left( \frac{v_2^2}{2 * g} + Z_2 + h_f - \frac{v_1^2}{2 * g} - Z_1 \right) * \gamma$$

Donde,  $v_A$  y  $v_B$  es la velocidad del fluido de empuje y la del Pig respectivamente, las cuales para este caso es la misma velocidad y según la literatura el valor a tomar es de  $0,8 \frac{m}{s}$  [24]; la densidad y gravedad toman valores de acuerdo a la Tabla 30., la Ecuación 8 se aplicará para los tramos de tubería verticales solamente, presentes en cada línea de tubería, tomando así  $h_A = 0$  y  $h_B$  dependiendo de la altura de la tubería.

**Tabla 34.**

*Resultados tramos verticales línea 1, línea 2 y línea 3*

$v_A(\frac{m}{s})$	$v_B(\frac{m}{s})$	$h_A(m)$	$h_B(m)$	$S(m^2)$	$\Delta P(Pa)$
0,8	0,8	0	13	0,00503	140.283

**Nota.** La tabla representa los resultados de los tramos verticales en cada línea de tubería.

Como la altura de las tres líneas de tubería a intervenir es la misma, los resultados del  $\Delta P$  van a ser los mismos para todos los casos, por lo tanto, en la Tabla 34., se muestra

solamente un cálculo. En el cálculo del área, se toma como diámetro el valor de 3 pulgadas, debido a que son las tuberías que se cambiarán para el paso del Pig.

Para determinar el  $\Delta P$  en los tramos horizontales, los cálculos se basaron en una fórmula diferente a la de Bernoulli, usando como base la ley de Poiseuille que determina esta variable, en la Ecuación 9 se presenta la fórmula, donde  $R_h$  es la resistencia al flujo ( $\frac{Pa \cdot s}{m^3}$ ),  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido retenido dentro de la tubería ( $Pa \cdot s$ ) tomando como base el dato de la Tabla 30.,  $L$  es la longitud de la tubería ( $m$ ) con base a la Tabla 32. y  $r$  es el radio de la tubería ( $m$ ) con base a la Tabla 31., siendo 3 pulgadas el diámetro a tomar.

*Ecuación 9*

$$R_h = \frac{8 * \mu * L}{\pi * r^4}$$

Esta ecuación representa la resistencia de arrastre ejercida por cada capa del fluido retenido en la tubería, también es ideal cuando se tiene un flujo laminar, siendo la velocidad mayor en todo el centro de la tubería y menor cerca de las paredes de la tubería [49]. Luego de determinar la resistencia al fluido, se calcula el caudal según la Ecuación 1 y para determinar el  $\Delta P$  que ejerce los tramos de tubería horizontales, en la Ecuación 10 se presenta la fórmula y los resultados se muestran en la Tabla 35.

*Ecuación 10*

$$\Delta P(Pa) = Q * R_h$$



**Tabla 35.***Resultados tramos horizontales línea 1, línea 2 y línea 3*

<b>Tuberías</b>	<b>Longitud Horizontal (m)</b>	$R_h \left( \frac{Pa * s}{m^3} \right)$	$\Delta P (Pa)$
Línea 1: Molinos de bolas a Tanques 28, 50 y 107	35,3	$5,62 * 10^6$	22592
Línea 2: Molino refinador 1 a Tanques 28, 50 y 107	9,4	$1,50 * 10^6$	6016
Línea 3: Molino refinador 2 a Tanques 28, 50 y 107	5,5	$8,75 * 10^5$	3520

**Nota.** La tabla representa los resultados de los tramos horizontales de cada línea.

Posteriormente, con los resultados obtenidos de la diferencia de presión de cada tramo y línea de tubería, se determina la fuerza (N) necesaria para el movimiento del Pig en la tubería, utilizando la Ecuación 6, donde el área es  $s = 0,00503 m^2$ , claramente sin tener en cuenta las pérdidas que ejerce el objeto a través de la tubería, los resultados se muestran en la Tabla 36.

**Tabla 36.***Resultados Fuerza por cada línea de tubería*

<b>Tuberías</b>	$\Delta P (Pa)$	$s (m^2)$	$F (N)$
Línea 1: Molinos de bolas a Tanques 28, 50 y 107	162.875	0,00503	819
Línea 2: Molino refinador 1 a Tanques 28, 50 y 107	146.299		735
Línea 3: Molino refinador 2 a Tanques 28, 50 y 107	143.803		723

**Nota.** La tabla representa los resultados en la fuerza necesaria para el movimiento del Pig, sin tener en cuenta las pérdidas.

#### **4.3.5. Cálculo pérdidas por fricción en tuberías y accesorios**

Las pérdidas generadas por la fricción en la tubería y/o accesorios son parte del proceso, por eso, según la literatura se encuentra la Tabla 37. [50], la cual nos indica diferentes factores de fricción a diferentes presiones del sistema cuando el Pig se mueve por la tubería, con los datos obtenidos, se realiza la Figura 31., la cual nos brinda información

del comportamiento del Pig, la ecuación obtenida es de polinomio grado 4, obteniendo el mejor  $R^2$ , igual a 1, con la Ecuación 11 de la función:

*Ecuación 11*

$$y = -4,9167x^4 + 10,483x^3 - 6,0558x^2 + 1,2287x - 0,0645$$

**Tabla 37.**

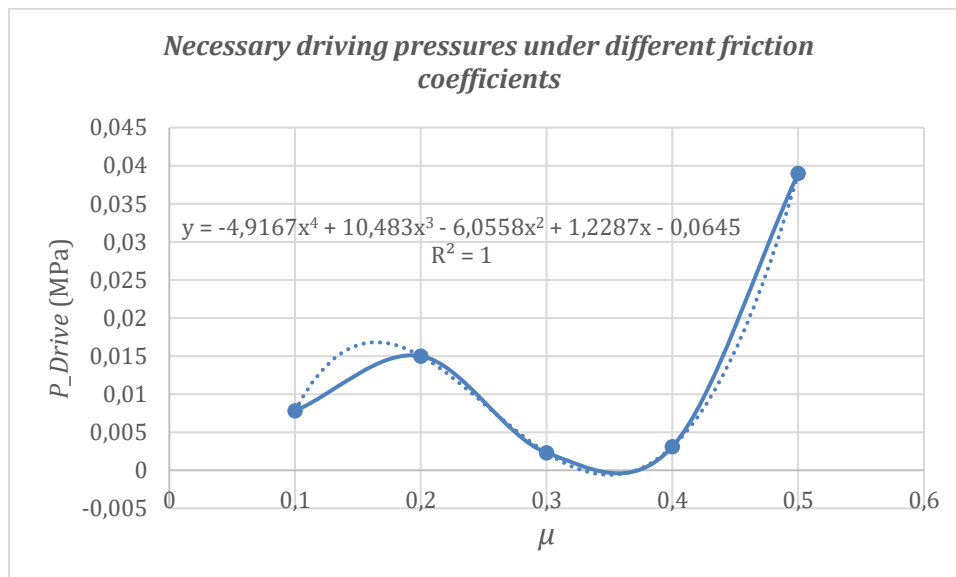
*Necessary driving pressures under different friction coefficients*

Variable	Datos				
$\mu$ (coeficiente de fricción)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
PDrive (MPa)	0,0078	0,015	0,0023	0,0031	0,039

**Nota.** La tabla representa los datos experimentales del coeficiente de fricción. Tomado de: Journal of Natural Gas Science and Engineering [50].

**Figura 31.**

*Coefficients of friction with respect to the pressure*



**Nota.** La figura representa los datos del Coeficiente de fricción con respecto a la presión de conducción para tuberías

a. Pérdidas por fricción en tuberías:

Las pérdidas en tuberías son frecuentes gracias a la fricción que se ejerce entre la pared de la tubería y los elementos que pasan por ella, en este caso el contacto entre el Pig de

goma y la pared de la tubería. Para cada línea a intervenir, se calculó el factor de fricción con la presión necesaria calculada en la Tabla 36. en el desplazamiento del Pig de cada tramo, con base a la Ecuación 11, posteriormente se calculó la pérdida con la Ecuación 12 [42], en donde se tiene en cuenta la fricción, la longitud y diámetro de la tubería según la Tabla 32. y la Tabla 31. respectivamente.

La velocidad del Pig para desplazarse se toma según la Tabla 34. y la gravedad como variables según la Tabla 30.; los resultados se pueden observar en la Tabla 38.

*Ecuación 12*

$$K = f_T * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g}$$

**Tabla 38.**

*Pérdidas en tuberías en las líneas de producción intervenidas*

Tuberías	Factor de Fricción $f_T$	Pérdidas ( $h_f=m$ )
Línea 1: Molinos de bolas a Tanques 28, 50 y 107	0,64	12,6
Línea 2: Molino refinador 1 a Tanques 28, 50 y 107	0,64	5,8
Línea 3: Molino refinador 2 a Tanques 28, 50 y 107	0,64	4,8

**Nota.** La tabla representa los datos hallados de las pérdidas por tuberías.

b. Pérdidas por fricción en accesorios

Así mismo, se contemplan las pérdidas por accesorios que posee las tres líneas, con la Tabla 37. y las presiones de las líneas a intervenir se calculan las fricciones para cada una, con el fin de poder implementar la Ecuación 13 y Ecuación 14 [42], las cuales nos brindan la información para la pérdida de una sola pieza de accesorio.

En el caso de los codos que hacen parte de las líneas de operación, codos de 45°, se obtiene para la primera línea 6 codos, para la segunda 4 codos y para la tercera 5 codos; con las válvulas de bola se contempló el cambio de las existentes en la tubería y además las válvulas de control para el método del Pig, obteniendo así para cada línea 3 válvulas por las cuales atraviesa el Pig, la información consolidada se puede ver en la Tabla 39. Pérdidas por accesorios en las líneas de tubería intervenidas [42].

El valor de la velocidad a tomar para el cálculo se basa en la Tabla 34. y el de la gravedad se toma según la Tabla 30.

*Ecuación 13*

$$K = 16 * f_T * \frac{v^2}{2 * g}$$

*Ecuación 14*

$$K = 3 * f_T * \frac{v^2}{2 * g}$$

**Tabla 39.**

*Pérdidas por accesorios en las líneas de tubería intervenidas*

	Factor de Fricción $f_T$	PÉRDIDA ( $h_f=m$ ) Codos	Cantidad	Pérdida Válvulas ( $h_f=m$ )	Cantidad	Pérdidas Totales (m)
Línea 1	0,64	10,22	6	1,92	3	2,19
Línea 2	0,64	10,22	4	1,92	3	1,52
Línea 3	0,64	10,22	5	1,92	3	1,85

**Nota.** La tabla representa los datos hallados de las pérdidas por accesorios.

#### **4.3.6. Cálculos movimiento del Pig en tuberías con pérdidas de fricción**

Al definir las pérdidas que genera el Pig con su movimiento a través de la tubería, se plantea el cálculo de la diferencia de presión teniendo en cuenta todos los factores anteriormente descritos, con base a la ecuación de Bernoulli [48], se describe la Ecuación 15, donde  $Z_1$  y  $Z_2$  son las alturas en el punto inicial y punto final de la tubería completa, según la Tabla 34.,  $h_f$  son las pérdidas totales generadas por la fricción en tuberías y accesorios y  $\gamma$  es el peso específico, el cual se determina según la Ecuación 16.

*Ecuación 15*

$$\frac{v_1^2}{2 * g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{v_2^2}{2 * g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + h_f$$

Ecuación 16

$$\gamma = \rho * g$$

De la Ecuación 15 se despeja la diferencia de presión  $P_1 - P_2$  ( $\Delta P$ ), dando como resultado la Ecuación 17, para así hallar nuevamente la fuerza necesaria que requiere el Pig en su movimiento por cada línea de tubería teniendo en cuenta la eficiencia del sistema Pig, la cuál es del 95%, tal como se muestra en la Tabla 40., en la última columna se deja la  $\Delta P$  en bares, debido a que según los proveedores consultados la presión necesaria para el movimiento del Pig por la tubería debe estar entre 2-4 bares.

Ecuación 17

$$\Delta P(Pa) = \left( \frac{v_2^2}{2 * g} + Z_2 + h_f - \frac{v_1^2}{2 * g} - Z_1 \right) * \gamma$$

**Tabla 40.**

*Resultados finales fuerza necesaria en el movimiento del Pig*

Tubería	$\Delta P(Pa)$	$F(N)$	$\Delta P(Bar)$
Línea 1: Molinos de bolas a Tanques 28, 50 y 107	299.593	1431	3,0
Línea 2: Molino refinador 1 a Tanques 28, 50 y 107	219.629	1049	2,2
Línea 3: Molino refinador 2 a Tanques 28, 50 y 107	212.267	1014	2,1

**Nota.** La tabla representa los resultados finales de la fuerza necesaria para el movimiento del Pig por las tuberías.

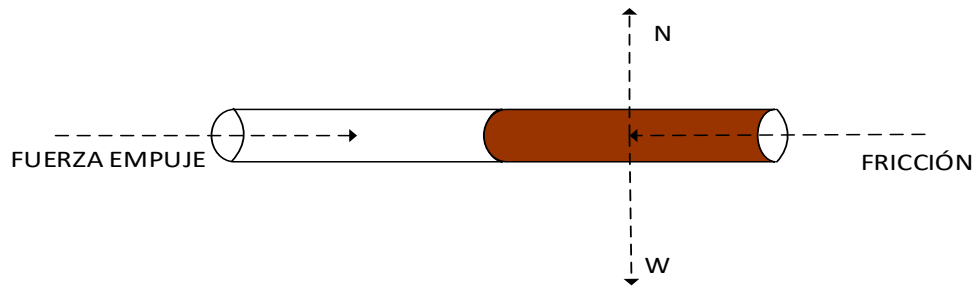
- Fricción del licor de cacao dentro de la tubería:

Se conoce que dentro de las tuberías queda material acumulado adherido a las paredes, este material acumulado es el licor de cacao, el cuál ejercerá una fuerza de resistencia o fricción al Pig cuando inicie su movimiento por las tuberías; esta fricción será comparada con la fuerza de empuje calculada anteriormente para el Pig, con el fin de determinar si la fuerza de empuje del Pig es suficiente para vencer la fuerza de fricción ejercida por el licor de cacao retenido en las tuberías.

Para determinar las fuerzas que le ejercen al licor de cacao dentro de las tuberías se plantea la Figura 32 para los tramos de tubería horizontal y la Figura 33 para los tramos de la tubería vertical.

**Figura 32.**

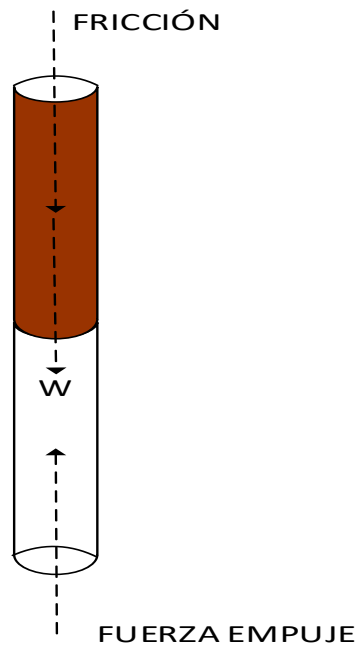
*Diagrama de fuerzas del licor de cacao dentro de la tubería horizontal*



**Nota.** La figura representa las fuerzas que ejercen para el licor de cacao dentro de la tubería horizontal.

**Figura 33.**

*Diagrama de fuerzas del licor de cacao dentro de la tubería vertical*



**Nota.** La figura representa las fuerzas que ejercen para el licor de cacao dentro de la tubería vertical.

En las tuberías horizontales ejercen 4 fuerzas, la fuerza de empuje, la de fricción, el peso y la normal, en este caso el peso y la fuerza normal se anulan debido a que tiene el mismo valor, pero en sentido opuesto, por lo tanto, nos queda que la  $F_{\text{empuje}} \geq \text{Fricción}$ . Los cálculos se basaron en la Ecuación 18, donde  $m$  es igual a la masa retenida en la tubería, Kg, y  $a$  es la aceleración,  $m/s^2$ .

*Ecuación 18*

$$F = m * a$$

En las tuberías verticales ejercen 3 fuerzas, la fuerza de empuje, la de fricción y el peso, por lo tanto, nos queda que  $F_{\text{empuje}} \geq \text{Fricción} + \text{Peso}$ . Los cálculos se basaron en la misma Ecuación 18. Los resultados se presentan en la Tabla 41. y la muestra de cálculo en el Anexo 10.

**Tabla 41.**

*Resultados de la fuerza de fricción en las tuberías*

<b>Tuberías</b>	<b>Fuerza de Fricción (N) Tramos Horizontales</b>	<b>Fuerza de Fricción (N) Tramos verticales</b>
Línea 1: Molinos de bolas a Tanques 28, 50 y 107	7,08	712,22
Línea 2: Molino refinador 1 a Tanques 28, 50 y 107	3,54	712,22
Línea 3: Molino refinador 2 a Tanques 28, 50 y 107	5,31	712,22

**Nota.** La tabla representa los resultados de la fricción ejercida por el licor de cacao en las tuberías.

Luego de determinar la fricción en los tramos de tubería tanto horizontal como vertical, se compara la suma total por cada línea con la fuerza de empuje ejercida por el Pig, los resultados se presentan en la Tabla 42; se puede observar que la fuerza de empuje calculada para el movimiento del Pig por la tubería es mayor que la fuerza de fricción ejercida por el licor de cacao retenido en la tubería.

**Tabla 42.**

*Comparación de la fuerza de empuje con la fricción.*

<b>Tuberías</b>	<b>Fuerza de Fricción (N)</b>	<b>Fuerza del PIG (N)</b>
Línea 1: Molinos de bolas a Tanques 28, 50 y 107	719,3	1431
Línea 2: Molino refinador 1 a Tanques 28, 50 y 107	715,8	1049
Línea 3: Molino refinador 2 a Tanques 28, 50 y 107	717,5	1014

**Nota.** La tabla representa los resultados de la fricción ejercida por el licor de cacao en las tuberías y la fuerza de empuje ejercida por el Pig en las tuberías.

#### **4.3.7. Cálculo Eléctrico del método Pig**

Para el debido funcionamiento del método de limpieza se debe considerar la parte eléctrica a implementar, como son válvulas neumáticas, controladores y sensores cableados y conectados, esto reduce considerablemente el tiempo de instalación y de operación, controlando el sistema ante posibles errores manuales [25].

Se tiene en cuenta, que en las estaciones de salida y llegada, deben contar con una conexión al PLC el cual controle el método de manera eléctrica, la adquisición del Pig se realizara con una pequeña pieza metálica en su interior, el cual será el elemento a detectar, las válvulas neumáticas se instalaran en cada punto de partida y llegada, siendo estas las encargas de ejecutar o finalizar el trabajo de limpieza, para la determinación del consumo de energía se presenta la Ecuación 19.

*Ecuación 19*

$$\text{Energía consumida} = \text{Potencia eléctrica} * \text{Tiempo utilización}$$

En donde se considera según los proveedores, que la potencia de estas válvulas neumáticas es de 220 V, su tiempo de acción es de 50,6 Hz [51] y los amperios que requiere son 18 A, utilizando la Ecuación 19 se obtiene un consumo aproximado de 4 KW representada en la Ecuación 20.

*Ecuación 20*

$$\text{Potencia Eléctrica} = 220 \text{ V} * 18 \text{ A} = 3960 \text{ W} \approx 4000 \text{ W}$$



## 5. EVALUACIÓN FINANCIERA

En el presente capítulo, se presenta el análisis de los costos de la propuesta de implementación del método de limpieza PIG en las tuberías de Luker Chocolate, se tiene en cuenta la adquisición de los nuevos equipos y tuberías, además de los costos por los servicios necesarios para el buen funcionamiento del método, se contempla la mano de obra y por último la viabilidad financiera teniendo en cuenta indicadores como la TIR y VPN.

### 5.1. Costos fijos

#### 5.1.1. Costo de implementación

En la implementación del método se debe realizar un cambio de tubería a 3 pulgadas en las zonas seleccionadas, para un total de tubería de cambio de 89,2m, se debe adquirir para cada línea intervenida un elemento mecánico "Pig" cada 3 meses, por ende, se contempla en la inversión inicial, la adquisición de 4 Pig por línea al año, así mismo se deben instalar 15 codos de 45° para cada cambio de dirección en la tuberías y 9 válvulas de globo para el correcto paso del Pig en las mismas. En el presupuesto del cambio de tubería de 2" ½ a 3" se contempla el costo de implementación.

Se considera que al instalar el sistema, se debe adicionar 4 electroválvulas en cada estación de envío y de recepción, es decir, que cada tramo de tubería donde se implemente el sistema Pig debe contar con 8 electroválvulas; además, un sistema eléctrico, el cual será controlado por un PLC, para este caso, el sistema eléctrico se debe adquirir totalmente para cada línea de tubería, haciendo uso de los PLC de la empresa Luker chocolate disponibles, por lo cual, solo se contempla la programación, estos costos se evidencian en la Tabla 43.

**Tabla 43.***Costos de equipos, implementos, accesorios y tubería*

<b>Elemento</b>	<b>Costo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Total</b>
Electroválvula	\$ 3.769.970	24	\$ 90.479.280
Pig	\$ 45.000	12	\$ 540.000
Metro de tubería (3")	\$ 1.100.000	89,2	\$ 98.120.000
Codos de 45°	\$ 35.494	15	\$ 532.410
Válvulas de globo (3")	\$ 209.990	9	\$ 1.889.910
materiales eléctricos	\$ 4.200.000	3	\$ 12.600.000
programación del PLC	\$ 10.000.000	3	\$ 30.000.000
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 234.161.600</b>

**Nota.** La tabla representa el costo de cada equipo, implemento, accesorios y tuberías a implementar para lograr el funcionamiento del método de limpieza.

Obteniendo una inversión de equipos, implementos, accesorios y tuberías total de \$234.161.600 (*doscientos treinta y cuatro millones ciento sesenta y seis mil seiscientos*) pesos colombianos.

### **5.1.2. Costo mano de obra**

La mano de obra siendo un valor fijo durante el año trabajado, se considera una sola persona de apoyo que realice el método de limpieza, la cual estará amparada bajo el ministerio del trabajo que considera el salario mínimo legal vigente y todas las prestaciones de ley, los valores se muestran en la Tabla 44.

**Tabla 44.***Costos de mano de obra*

<b>Mano de Obra</b>	<b>Gasto anual</b>
Salario	\$ 10.533.636
Vacaciones	\$ 438.902
Cesantías	\$ 877.803
Interés de cesantía	\$ 105.336
Prima de servicios	\$ 877.803
Subsidio de transporte	\$ 1.234.248
Pensión	\$ 421.345
ARL	\$ 421.345
Salud	\$ 421.345
Total	\$ 15.331.764

**Nota.** La presente tabla presenta el gasto que debe realizar la empresa por concepto de una persona de apoyo en el proceso.

## 5.2. Costos variables

### 5.2.1. Consumo energético

Para el consumo energético usado en el funcionamiento del método, se tienen en cuenta las electroválvulas, las cuales consumen 4kw cada vez que se realice la activación de las mismas, Luker chocolate tiene estandarizado en promedio sacar 3 lotes diarios, por lo cual se debe considerar que las electroválvulas serán activadas cada vez que se desee realizar un cambio de batch, así mismo se consideran las 24 electroválvulas instaladas en las 3 líneas intervenidas y los días trabajados para obtener el costo de consumo anual, se establecen 294 días trabajados al año, 6 días trabajados por semana y 18 días de descanso por concepto de semana santa, Navidad y Año nuevo; se obtiene la cantidad de energía consumida anual de las electroválvulas evidenciada en la Tabla 45. de la siguiente forma:

*Ecuación 21*

$$\text{Cantidad energía (anual)} = P * \text{Batch día} * \# \text{Electrovalvulas} * \text{Días trabajo}$$

*Ecuación 22*

$$\text{Cantidad energía (anual)} = 4000 \text{ W} * 3 * 24 * 294 = 84672 \text{ kW}$$

**Tabla 45.**

*Costo del consumo energético de las electroválvulas*

Recurso	Costo (kw)	Cantidad	Total
Consumo de electroválvulas	\$ 536	84672	\$ 45.395.199

**Nota.** La tabla representa el costo por concepto de consumo energético al año de las 24 electroválvulas instaladas en las líneas de producción intervenidas.

Así mismo, según las condiciones de operación establecidas, se considera que el desplazamiento del Pig se realiza por medio de aire comprimido, el servicio de aire será gratuito al obtenerlo del medio ambiente, sin embargo, se debe utilizar un compresor que

pueda almacenar y purificar este aire, este equipo no se considera en la inversión inicial debido a que la empresa ya cuenta con uno en sus instalaciones, por ende se considera el consumo energético extra para realizar esta operación de limpieza; Para tal efecto se considera un consumo de 5,5 kW para almacenar la presión requerida en las 3 líneas de producción, los 3 batch al día y los días trabajados, obteniendo la cantidad de energía anual que utiliza el compresor, se representa en la Tabla 46. de la siguiente manera:

*Ecuación 23*

$$\text{Cantidad Energía (anual)} = P (\text{compresor}) * \text{Batch día} * \text{Días trabajados}$$

*Ecuación 24*

$$\text{Cantidad Energía (anual)} = 5,5 \text{ kW} * 3 * 294 = 4851 \text{ kW}$$

**Tabla 46.**

*Costo del consumo energético del compresor*

<b>Recurso</b>	<b>Costo(kW)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total</b>
Compresor	\$ 536	4851	\$ 2.600.767

**Nota.** La tabla representa el costo por concepto de consumo energético para realizar la operación del compresor.

Obteniendo un valor total de *Dos millones seiscientos mil setecientos sesenta y siete* pesos colombianos por consumo energético anual para el funcionamiento del método de limpieza.

### **5.2.2. Consumo de agua**

Se considera el agua de lavado necesario para realizar la limpieza del elemento mecánico “Pig”, este debe ser lavado en cada cambio de batch, es decir, al terminar un trabajo de arrastre por la tubería debe ser lavado antes de empezar su siguiente ciclo; se consideran los siguientes criterios: el metro cubico de agua tiene un valor de \$7.550 según la base de datos actual de la empresa, la cantidad utilizada en un año laborado, es decir 294 días trabajados, 3 batch por día y 0,1 metros cúbicos de agua utilizados

para lavar los 3 Pig las 3 veces al día, obteniendo el consumo anual de agua, evidenciado en la Tabla 47. de la siguiente manera:

*Ecuación 25*

$$\text{Cantidad Agua (anual)} = m^3(\text{consumidos por batch}) * \text{Batch día} * \text{Días trabajados}$$

*Ecuación 26*

$$\text{Cantidad Agua (anual)} = 0,3 m^3 * 3 * 294 = 264,6 m^3$$

**Tabla 47.**

*Costos del consumo de agua para lavado*

<b>Recurso</b>	<b>Costo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total</b>
Metro cubico de agua	\$ 7.550	264,6	\$ 1.997.730

**Nota.** La tabla representa el costo total del agua para realizar el lavado de los elementos mecánicos.

### **5.2.3. Mantenimiento**

El mantenimiento prioritario para el método de limpieza, en donde se tiene en cuenta las recomendaciones del proveedor, donde se evidencia que el elemento mecánico “Pig” se debe cambiar cada 3 meses, es decir, que deben adquirir 4 Pig al año por cada línea, evidenciado en la Tabla 48., los equipos adquiridos como las electroválvulas se consideran despreciables debido a que son pequeños equipos que tiene larga vida útil más de 5 años, si las condiciones de operación son las requeridas y especificadas por el proveedor, el cual se calcula de la siguiente manera:

*Ecuación 27*

$$\text{Gasto mantenimiento Pig} = \text{Costo Pig (und)} * \#\text{Pig año} * \#\text{Líneas}$$

*Ecuación 28*

$$\text{Gasto mantenimiento Pig} = \$ 45.000 * 4 * 3 = \$ 540.000$$

**Tabla 48.**

*Costos de mantenimiento prioritario*

<b>Mantenimiento</b>	<b>Gasto</b>
Pig	\$ 540.000

**Nota.** La tabla representa el gasto que se debe adquirir para el cambio del Pig anual.

### **5.3. Indicadores de costos**

Para realizar la viabilidad y rentabilidad del proyecto, se tienen en cuenta parámetros como la tasa interna de retorno (TIR) y valor presente neto (VPN), estos indicadores fueron cálculos por medio de Excel, en donde en primer lugar se realizó el flujo de caja a 5 años, evidenciado que el valor de la inversión se recupera en el segundo año, por ende, en la Tabla 50., se observa estos dos periodos anuales, en donde por concepto de ingresos se contempla el producto que queda retenido en las tuberías, junto con la efectividad del Pig que al ser del 95% se obtiene un producto recuperado es 336,3 kilos de licor de cacao, se considera para los 5 años siguientes un incremento de PIB del 4% [52] para la industria dedicada a la fabricación del chocolate.

Se debe considerar el gasto del licor de cacao que utilizan para la purga de los tanques de acopio, la cual debe pasar por la tubería intervenida para llegar a los equipos deseados, el sistema de Luker chocolate define que se debe utilizar para la purga de estos equipos 312 kilos de licor de cacao, este se debe contemplar en los costos junto con el gasto de energía, consumo de agua, costos del personal y mantenimiento.

Así mismo, para proyectar los costos para los siguientes 5 años se tuvo en cuenta el aumento del salario mínimo establecido para el año 2020 el cual fue del 6%, según el ministerio del trabajo, los demás servicios se considera que su aumento es proporcional al aumento del salario mínimo, los datos necesario para realizar el flujo de caja se evidencian en la Tabla 49.

**Tabla 49.***Datos para el desarrollo del flujo de caja*

Producto en tuberías	354	Valor por Kilo	\$ 9.800
Efectividad Pig	95%	Incremento PIB-Industria Chocolatera 2019	4%
Producto recuperado	336,3	Incremento del agua, energía, salario mínimo y Mantenimiento	6%
Producto Purga	312		

**Nota.** En la presente tabla se describen los valores importantes a tener en cuenta para el desarrollo del flujo de caja.

**Tabla 50.***Flujo de caja a dos años*

<b>FLUJO DE CAJA</b>			
	<b>AÑO 0</b>	<b>AÑO 1</b>	<b>AÑO 2</b>
<b>Ingresos</b>		\$ 2.906.842.680	\$ 3.023.116.387
<b>Costos</b>		\$ 2.762.128.660	\$ 2.874.492.716
Producto Purga		\$ 2.696.803.200	\$ 2.804.675.328
Servicio de Energía		\$ 47.995.966	\$ 50.875.724
Servicio del Agua		\$ 1.997.730	\$ 2.117.594
Costos del personal		\$ 15.331.764	\$ 16.251.670
Mantenimiento		\$ 0	\$ 572.400
<b>Inversión en equipos</b>	\$ 234.161.600	\$ 0	\$ 0
<b>Total</b>	-\$ 234.161.600	\$ 144.714.020	\$ 148.623.671

**Nota.** La tabla representa el flujo de caja a dos años del proyecto.

### **5.3.1. TIR**

La TIR conocida como la tasa interna de retorno o tasa interna de rentabilidad es uno de los indicadores utilizados para proyectar la rentabilidad del proyecto, se considera una buena inversión cuando este valor es igual o mayor a la tasa exigida por el cliente o la empresa, generalmente se considera desde el 20% [53], para el cálculo del indicador se tuvo en cuenta el flujo de caja del proyecto junto con la inversión inicial, el cual fue obtenido con el programa de Excel, ver resultado en la Tabla 51.

### 5.3.2. VPN

El valor presente se considera los flujos de caja a futuro del proyecto, es la cantidad que se asegura de dinero a futuro, es decir, lo equivalente a los flujos de caja que se recibirán en el futuro, si el este valor es positivo es proyecto es rentable, si por el contrario es negativo no deberá aceptarse y si es igual a 0 el proyecto es indiferente, por ende se tomaran en concepto otros factores como el ámbito social o de ventas para la toma de decisión [53], para el cálculo del indicador se tuvieron en cuenta el valor total de la inversión y el valor actual neto, ver resultado en la Tabla 51.

**Tabla 51.**

*Indicadores de viabilidad del proyecto*

<b>TIR</b>	57%
<b>VPN</b>	\$ 219.724.742

**Nota.** La presente tabla describe los indicadores para la toma de decisión para realizar el proyecto.

Los indicadores seleccionados, cumplen con el concepto de viabilidad para realizar el proyecto, la TIR con un valor positivo de 57% el cual representa la rentabilidad del proyecto, evaluando que se requiere en un inicio un retorno del 20%, dando 37 puntos porcentuales por arriba del valor requerido y el VPN con una valor de \$219.724.742 pesos colombiano representa los flujos de caja que hoy se recibirán en un futuro.

### 5.4. Concepto Final

Se debe aclarar que este proyecto, genera estas ganancias al ahorrarse kilos de licor de cacao, que hoy en día utilizan para la purga de tuberías, Luker chocolate tiene estandarizado utilizar 5 kilos de licor de cacao por cada metro de tubería, es decir, que para las tuberías intervenidas con una longitud de 89,2m, se debe utilizar 446 kilos de licor de cacao, es decir, que si se consideran 3 batch al día por 294 días laborados al año, se obtiene al final 393.372 kilos de licor de cacao gastados para realizar la purga en las líneas de tubería escogidas.



Lo que a su vez representa 473.942,17 kilogramos en grano de cacao anual, considerando que el 83% del grano es transformado en licor de cacao y el 17% se considera merma, por ende, esta cantidad de materia prima será ahorrada y muy seguramente empleada para la fabricación de otros lotes de producción.

**Tabla 52.**

*Licor de cacao y grano de cacao gastado en el proceso actual de purga*

PURGA TOTAL ACTUALMENTE			
	Licor de cacao (Kg)	Cacao en grano (Kg)	Cacao en grano (Ton)
Un batch al día	758	913,25	0,91
En el año	668.556	805489,2	805,49

**Nota.** La tabla presenta las cantidades de licor de cacao y cacao en grano utilizado en la purga de las tuberías y equipos actualmente.

**Tabla 53.**

*Licor de cacao y grano de cacao gastado en el proceso de purga de las tuberías intervenidas*

PURGA DE LAS TUBERIAS			
	Licor de cacao (Kg)	Cacao en grano (Kg)	Cacao en grano (Ton)
Un batch al día	446	537,34	0,54
En el año	393.372	473.942	473,94

**Nota.** La tabla presenta las cantidades de licor de cacao y cacao en grano utilizado en la purga de las tuberías intervenidas.

**Tabla 54.**

*Licor de cacao y grano de cacao gastado en el proceso de purga de los tanques de acopio*

PURGA DE LOS TANQUES DE ACOPIO			
	Kg Licor	Kg Cacao en grano	Ton Cacao en grano
un batch al día	312	375,9037	0,37
En el año	275.184	331.547,03	331,55

**Nota.** La tabla presenta las cantidades de licor de cacao y cacao en grano utilizado en la purga de los tanques de acopio.

Al comparar la Tabla 52 y Tabal 54 se evidencia como el gasto de materia prima anual se reduce de 805,49 toneladas de cacao en grano a 331,55 toneladas de cacao en grano, por ende, según la Tabla 53. la empresa obtendrá 473,94 toneladas de cacao en grano libre del sistema de purga, el cual podrá utilizar en otros lotes de producción.

## 6. CONCLUSIONES

Se identificó que durante el proceso de producción del chocolate, las etapas críticas en donde se aumenta significativamente el cadmio son las de tanques de acopio y molinos refinadores, siendo la línea de operación entre molienda principal y tanques de acopio, Tanques de acopio y molinos refinadores; la etapa de los tanques de acopio tienen un aumento del 11.1% para el licor Tumaco B y 8.9% para el licor de la mezcla (Huila, Santander y Perú), la etapa de los molinos refinadores con un aumento del 1% para el licor Tumaco B y 67.3% para el licor de la mezcla (Huila, Santander y Perú).

Se seleccionó el método de limpieza más viable, donde se compararon 10 alternativas de limpieza tanto mecánicas como de pretratamiento por medio de una matriz de decisión AHP (Analytic Hierarchy Process), ideal para la toma de decisiones con multicriterio, en este caso se evaluaron cinco criterios (Calidad, Económica, Ambiental, Legal, Salud y seguridad); la ponderación final de los métodos y los criterios da como resultado el método de limpieza de tuberías "Pig", con un porcentaje de 31,4%.

Se estableció que para las condiciones de operación del método Pig, en primer lugar, se debe cambiar las tuberías de 2" ½ a 3", también cambiar e implementar los codos de 90° a codos de 45° y las válvulas de mariposa a las de globo; así mismo se requiere un sistema de electroválvulas en cada estación de envío y de recepción, junto con un sistema eléctrico que se controla mediante un PLC.

Se realizó la evaluación financiera del proyecto, utilizando indicadores como el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR) para el desarrollo del proyecto, dando como resultado una TIR de 57%, y un VPN de \$ 219.724.742 pesos colombianos, usando una tasa del inversionista del 20%, lo que indica la viabilidad y rentabilidad de la implementación del método en la empresa Luker chocolate.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. M. Velásquez, “Influencia del proceso de fermentación sobre las características de calidad del grano de cacao (*Theobroma cacao*),” p. 99, 2016.
- [2] A. Meter, R. Atkinson, and B. LAbiberte, *Cadmio en el cacao de America Latina y el Caribe*, vol. 53, no. 9. 2019.
- [3] S. Waizel-Haiat, J. Waizel-Bucay, J. Antonio Magaña-Serrano, P. Campos-Bedoya, J. Eduardo San Esteban-Sosa, and I. Politécnico Nacional México, “Anales Médicos Cacao y chocolate: seducción y terapéutica.” [En Línea]: [www.medigraphic.org.mxhttp://www.medigraphic.com/analesmedicos](http://www.medigraphic.org.mxhttp://www.medigraphic.com/analesmedicos).
- [4] N. de chocolates S.A.S, “El cultivo del cacao.”
- [5] J. De La, C. Medina, M. A. Vargas Ortiz, O. A. Del, and A. Coronel, “CACAO: Operaciones Poscosecha.”
- [6] A. Gramlich *et al.*, “Cadmium uptake by cocoa trees in agroforestry and monoculture systems under conventional and organic management,” *Sci. Total Environ.*, vol. 580, pp. 677–686, 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.014.
- [7] G. Sanchez Barrón, “Ecotoxicología del cadmio: riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio,” *Fac. Farm. Univ. Complut. Trab.*, p. 23, 2016.
- [8] University Pedagógica, “Heavy metals remediation with potential application in cocoa Javier Andrés Castebianco,” vol. 27, no. 1, pp. 21–35, 2018.
- [9] CAOBISCO/AEC/FCC, *Chocolate and Cocoa Industry Quality Requirements*, vol. 69, no. 12. 2015.
- [10] P. Decana, T. Libio, and S. Rojas, “Evaluación de la eficiencia de biosorción de cadmio por levaduras nativas para cultivos agrícolas usando tomate *Solanum lycopersicum* L . como modelo biológico en cultivos hidropónicos,” 2018.
- [11] C. S. Jiménez Tobón, “Global legal status of cadmium in cacao (*Theobroma cacao*): a fantasy or a reality,” *Prod. + Limpia*, vol. 10, no. 1, pp. 89–104, 2015.
- [12] J. M. Oliveras, “La elaboración del chocolate , una técnica dulce y ecológica,” *Técnica Ind.*, vol. 268, pp. 47–51, 2007.
- [13] R. A. Bermeo Quinde, “Estudio para la implementación de una microempresa de

- coberturas de chocolate,” pp. 1–145, 2009.
- [14] T. Monográfico, “Desarrollo y costeo de cobertura sabor a chocolate para aplicación industrial en galletas,” 2017.
- [15] M. R. Ceballos, “Estudio de los efectos de modificadores del comportamiento reológico y del estado sólido en chocolate y sus ingredientes.,” 2016.
- [16] B. Kruszewski, M. W. Obiedziński, and J. Kowalska, “Nickel, cadmium and lead levels in raw cocoa and processed chocolate mass materials from three different manufacturers,” *J. Food Compos. Anal.*, vol. 66, pp. 127–135, 2018, doi: 10.1016/j.jfca.2017.12.012.
- [17] J. F. C. C. on C. in Foods, “9th session of the Joint FAO/WHO Food Standards Programme: Proposed draft maximum levels for cadmium in chocolate and cocoa-derived products,” *Codex*, 2015.
- [18] S. Martinez, “Limpieza de Equipos de Proceso y Tuberías,” pp. 1–213, 2010.
- [19] D. O. Siringi, P. P. G. Home, and P. E. Koehn, “Cleaning Methods for Pipeline Renewals,” *Int. J. Eng. techincal Res.*, no. 9, pp. 44–47, 2014.
- [20] S. Mounicou, J. Szpunar, D. Andrey, C. Blake, and R. Lobinski, “Concentrations and bioavailability of cadmium and lead in cocoa powder and related products,” *Food Addit. Contam.*, vol. 20, no. 4, pp. 343–352, 2003, doi: 10.1080/0265203031000077888.
- [21] C. L. S. Geovanny and I. G. M. Vinicio, “Implementación de un plan de mantenimiento predictivo mediante la técnica de ultrasonido en la tubería de perforación de la empresa nabors drilling servies,” p. 33, 2014.
- [22] E. Santos De La Cruz, N. Cancino Vera, J. Yenque Dedios, D. Ramírez Morales, and M. Palomino Pérez, “El Ultrasonido Y Su Aplicación,” *Ind. Data*, vol. 8, no. 1, p. 025, 2014, doi: 10.15381/idata.v8i1.6153.
- [23] M. Gonzalez, “Limpieza de tuberías con Aire,” *19 de mayo*, 2014. .
- [24] G. L. Adolfo, “Prototipo PIG Intelligent,” *Univ. Nac. Colomb. Fac. Ing.*, vol. 0932, pp. 147–173, 2003.
- [25] Gasso Comercial, “Pigging - Sistema de limpieza para tuberías industriales,” 2020.
- [26] G. en FISIOTERAPIA, “Buenas practicas de operación en el lavado de plantas y equipos,” *Zaguan.Unizar.Es*, pp. 0–43, 2014.

- [27] A. Rangel Muñoz Jorge Armando Toledo Alfonso, “Diseño e implementación de sistema CIP para industria productora de leche,” 2012.
- [28] R. Ryther, “Development of a Comprehensive Cleaning and Sanitizing Program for Food Production Facilities,” *Food Saf. Manag. A Pract. Guid. Food Ind.*, pp. 741–768, 2014, doi: 10.1016/B978-0-12-381504-0.00027-5.
- [29] I. L. Miyar, “Validación de limpieza CIP en instalaciones de una fábrica de producción industrial de levadura,” *Univ. Valladolid*, pp. 1–37, 2015.
- [30] C. Garbisu, I. Amézaga, and I. Alkorta, “Biorremediación y ecología,” *Rev. Cient. y técnica Ecol. y medio*, vol. XI, no. 3, p. 2, 2002.
- [31] H. L. Y. Ivone, “Reducción de concentración de cadmio en aguas de lavado con RAEE mediante micro-nanoburbujas (aire - ozono) del Taller Ascope – Cercado de Lima,” 2017.
- [32] Distriambiente, “Desinfección y limpieza con ozono en la conservación de alimentos,” 2019. <https://distriambiente.com/soluciones-con-ozono/higiene-alimentaria/lavado-de-alimentos/>.
- [33] M. Ácidos and L. Y. Presecado, “Remoción de cadmio en almendras de cacao en proceso poscosecha con agentes quelantes, medios ácidos, lavado y presecado,” 2020.
- [34] C. del P. Hualpa Figueroa, “Gestión de costos basado en el PMBOK para una Empresa Contratista,” 2016.
- [35] M. Cardona Gallo, “Minimización de Residuos: una política de gestión ambiental empresarial,” 2006.
- [36] M. de la protección Social, “Resolución 1511 de 2011,” *gobierno*, pp. 1–15, 2020.
- [37] G. Z. PERDOMO, “Metodología para la selección de la herramienta adecuada en la inspección y limpieza interior de gasoductos,” 2018.
- [38] Inoxpa source solutions, “Ficha técnica Limpieza Silpig.”
- [39] FLOUSA S.A, “Efficient displacement through short-radius.”
- [40] Atlas Copco, “Filtros de aire Comprimido,” *La importancia del filtro aire del coche*, 2015.
- [41] B. Lobular, “Bomba lobular,” no. 0, 2019.
- [42] Crane, “Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías,” 1989.

- [43] Inoxalia zona centro, “Válvulas de Mariposa Alimentarias.”  
<https://www.inoxalia.net/productos/valvulas/mariposa-alimentarias/>.
- [44] Inoxalia zona centro, “Válvulas de Bola con o sin Actuador (Línea Alimentaria).”  
<https://www.inoxalia.net/productos/valvulas/alimentaria-bola-actuador/>.
- [45] A. Sanitario, “Tubos Inoxidable Grado Sanitario ASTM A270,” p. 270.
- [46] 10M ASME B26, “Stainless Steel Pipe,” *Standard*, vol. 2004, no. New York, pp. 1–6, 2004.
- [47] H. Zhang, S. Zhang, S. Liu, and Y. Wang, “Collisional vibration of PIGs (pipeline inspection gauges) passing through girth welds in pipelines,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 37, pp. 15–28, 2017, doi: 10.1016/j.jngse.2016.11.035.
- [48] Y. D. F. Munson Bruce R, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Blucher. 2004.
- [49] C. Malagón, “Fluidos reales,” pp. 1–12.
- [50] C. Liu, Y. Wei, Y. Cao, S. Zhang, and Y. Sun, “Traveling ability of pipeline inspection gauge (PIG) in elbow under different friction coefficients by 3D FEM,” *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 75, no. March 2018, 2020, doi: 10.1016/j.jngse.2019.103134.
- [51] Micro automacion, “Válvulas direccionales 3/2 y 5/2.”
- [52] D. Lopez Sepulveda, “Análisis económico de la agrocadena del cacao-chocolate en colombia.”
- [53] M. P. Muñoz, “VAN y TIR,” *Univ. Arturo Prant*.
- [54] A. Otin, S. Celma, and C. Aldea, “Coeficiente de transferencia convectiva h en el interior de un destilador tipo batea,” pp. 133–136.
- [55] M. A. Egas, “Evaluación y análisis técnico financiero del proceso de prensado de licor de cacao (theobroma cacao) para la obtención de manteca y polvo de cacao,” pp. 1–126, 2015, [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11477>.
- [56] B. I. Guerrero, “Diseño del Sistema de Esterilización Experimental en la Obtención de Licor de Cacao,” pp. 1–71, 2006, [Online]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/88584/D-79985.pdf>.

## **ANEXOS**



## ANEXO 1.

### MATRIZ CONCEPTUAL DE LAS ALTERNATIVAS A EVALUAR

METODO	APLICACIÓN	TIPO DE ANALISIS				
		ECONOMICO	CALIDAD	AMBIENTAL	SEGURIDAD Y SALUD	LEGAL
Solución extractora con agua	Pretratamiento	<p>*Adecuar línea de operación para realizar el proceso enzimático.</p> <p>*Costos de operación y de nuevos implementos y equipos</p> <p>*Compra de insumo y material necesario para la operación</p>	<p>*Se debe garantizar que el proceso enzimático se lleve a cabo en la línea de operación y al continuar su proceso el grano del cacao este 100% libre de cualquier compuesto que no corresponda a su taxonomía.</p>	<p>*Las enzimas no representan gran riesgo para los ecosistemas, sin embargo, se debe considerar sus residuos del proceso y su buen tratamiento.</p>	<p>* Se debe trabajar con todos los equipos de protección y seguridad</p>	<p>* RESOLUCIÓN 1511 DE 2011: Por la cual se establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que debe cumplir el chocolate y productos de chocolate para consumo humano, que se procese, envase, almacene, transporte, comercialice, expendan, importe o exporte en el territorio nacional.</p>
Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido	En el proceso de fabricación	<p>*Costos de la implementación altos y del proceso se elevan</p> <p>*Gastos energético</p>	<p>*Se debe implementar un proceso de secado efectivo para evitar agua en las tuberías que pueda alterar el producto.</p>	<p>*Implementar un sistema de uso adecuado de recursos, en donde sea posible recuperar el agua logrando reciclo en el proceso, aprovechando al máximo los recursos</p>	<p>*Protección adecuada por las frecuencias que se puedan producir</p>	<p>La implementación de los equipos debe realizarse con todas las normas de seguridad civil, además al generar ruido se debe constatar que este no exceda lo permitido</p>
Limpieza de tuberías por inyección de aire	En el proceso de fabricación	<p>*Adecuar equipos capaces de lograr las condiciones del proceso</p> <p>*Costo de mantenimiento</p> <p>*Gasto energético</p>	<p>*Al generar un sistema de secado posterior a la solución jabonosa se asegura que no queden restos de agua en las tuberías</p>	<p>* Mediante sea posible recuperar los recursos utilizados, invitando desperdicio</p>	<p>*Se debe brindar la protección adecuada a los trabajadores con un equipo de seguridad.</p>	<p>No exceder los límites permitidos de la exposición al ruido</p>
Limpieza de tuberías por Pig	En el proceso de fabricación	<p>* Costos bajo de equipos e implementación.</p> <p>* Adecuar equipos capaces de lograr las condiciones del proceso</p>	<p>* Se asegura una óptima desinfección del Pig antes de ingresarlo al proceso, no corre riesgo alguno el producto.</p>	<p>*Requiere uso del aire</p> <p>* Gasto energético</p>	<p>* Se debe operar el equipo con las precauciones adecuadas para no generar riesgos.</p>	<p>RESOLUCIÓN 1511 DE 2011: Todo material que tenga contacto con las materias primas y chocolates, o productos de chocolate, en cualquier momento de su elaboración, distribución y consumo, no debe alterar las características de composición ni los caracteres organolépticos de los productos.</p>

Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua	En el proceso de fabricación	<p>*Facilita el acceso a puntos del proceso limitados</p> <p>*Gasto energético mayor</p> <p>*Deterioro de las tuberías y empaques</p>	Siempre y cuando se genere un sistema de secado optimo en las tuberías y equipos, no debe generarse ninguna reacción alternativa que pueda poner en riesgo el producto final que llega al consumidor	<p>* El agua al ser un recurso natural primario, se debe conservar por ende se debe utilizar con conciencia.</p> <p>*Puede generar emisiones que no se consideran dañinas para el medio ambiente</p>	*Puede general inconvenientes en las partes soldadas del proceso, provocando desgaste y por ende si no se mantiene controlado un posible accidente	DECRETO 1090 DE 2018: Con el cual se debe contar con mecanismos los cuales estén enfocados al uso eficiente y ahorro de este recurso
Chorro de agua a ultra alta presión	En el proceso de fabricación	<p>*Adecuar equipos y herramientas que logren obtener las condiciones requeridas.</p> <p>* Daño físico en las tuberías</p>	Siempre y cuando se genere un sistema de secado optimo en las tuberías y equipos, no debe generarse ninguna reacción alternativa que pueda poner en riesgo el producto final que llega al consumidor	Utilizar el recurso de manera adecuada, previniendo impacto ambiental significativo	*puede presentar lesiones a los trabajadores si no se maneja adecuadamente	DECRETO 1090 DE 2018: Con el cual se debe contar con mecanismos los cuales estén enfocados al uso eficiente y ahorro de este recurso
limpieza CIP	En el proceso de fabricación	<p>* Se debe adecuar implementos, soluciones y equipos que permitan el proceso de limpieza</p> <p>* Gasto energético por uso de nuevos equipos</p> <p>*Posible daño o desgaste.</p>	* El proceso se debe llevar con todas las normas de seguridad y efectividad para que no queden trazas de compuestos que puedan alterar el proceso del chocolate.	* Los efluentes de las soluciones utilizadas deben tarazarse para no generar daño al ecosistema	* Las soluciones deben ser preparadas y manejadas con todas las normas de seguridad para evitar daños al personal de la planta y así mismo a los equipos y tuberías.	<p>*La fabricación de nuevos equipos debe seguir estándares que cumplan con todas las normas para la adecuación en la planta</p> <p>* Las soluciones deben prepararse según los establecido para evitar corrosión</p> <p>* Uso adecuado de recursos naturales.</p>

Remoción a partir de la microalga <i>Chlorella</i> sp.	Pretratamiento	*Se debe adecuar la planta al inicio del proceso para tratar el cacao en grano * Compra de insumos y materiales necesarios para el proceso	* Se debe asegurar que el paso de pretratamiento no genere impacto en el grano del cacao, generando pérdida de sus propiedades organolépticas	* Se deben tratar los efluentes cuando ya su tiempo medio de vida haya terminado.	*No se conoce aspectos negativos que pueda producir la microalga y el medio de cultivo	El uso de algas no se encuentra restringido. * RESOLUCIÓN 1511 DE 2011: Por la cual se establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que debe cumplir el chocolate y productos de chocolate para consumo humano, que se procese, envase, almacene, transporte, comercialice, expendan, importe o exporte en el territorio nacional.
Reducción por micro burbujas (aire-ozono)	Pretratamiento	*Se debe adecuar la planta al inicio del proceso para tratar el cacao en grano * Compra de insumos y materiales necesarios para el proceso *Costos altos de mantenimientos de los nuevos equipos	* Se debe asegurar que el paso de pretratamiento no genere impacto en el grano del cacao, generando pérdida de sus propiedades organolépticas	* Se debe considerar el tratamiento de los residuos después de haber tratado el lote del cacao.	* Se debe operar el equipo con las precauciones adecuadas para no generar riesgos.	*El equipo se puede implementar sin inconvenientes.
Limpieza postcosecha	Pretratamiento	*Adecuar en la recepción de la materia prima, una línea de operación, la cual logre llevar a cabo el proceso	*Las soluciones utilizadas en el proceso deben ser utilizadas con precaución y uso correcto.	*Se deben tratar los efluentes resultantes de proceso de limpieza	*Manipulación y manejo de las soluciones, implementos y equipos adecuadamente	* Las soluciones deben prepararse según los parámetros establecidos.

**ANEXO 2.**

**MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO DE CALIDAD**

<b>CALIDAD</b>						
<b>CRITERIO 1</b>	Solución extractora Agua	Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido	Limpieza de tuberías por inyección de aire	Limpieza de tuberías por Pig	Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua	<b>RESULTADO</b>
Solución extractora Agua	1	1/7	1/7	1/9	1/3	2%
Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido	7	1	1/3	1/5	5	14%
Limpieza de tuberías por inyección de aire	7	3	1	1/7	5	17%
Limpieza de tuberías por Pig	9	5	7	1	9	35%
Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua	3	1/5	1/5	1/9	1	7%
Chorro de agua a ultra alta presión	3	1/5	1/5	1/9	3	9%
limpieza CIP	5	1/5	1/5	1/9	1/5	3%
remoción a partir de la microalga <i>Chlorella</i> sp	3	1/3	1/5	1/5	1/3	6%
Reducción por micro nano burbujas (aire-ozono)	3	1/5	1/5	1/7	1/3	5%
Limpieza postcosecha	3	1/5	1/5	1/9	1/5	3%

**ANEXO 3.**

**MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO ECONÓMICO**

<b>ECONOMICO</b>						
<b>CRITERIO 2</b>	Solución extractora Agua	Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido	Limpieza de tuberías por inyección de aire	Limpieza de tuberías por Pig	Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua	<b>RESULTADO</b>
Solución extractora Agua	1	1/7	1/5	1/9	1/5	3%
Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido	7	1	5	1/3	7	23%
Limpieza de tuberías por inyección de aire	5	0,2	1	1/5	3	10%
Limpieza de tuberías por Pig	9	3	5	1	7	29%
Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua	5	1/7	1/3	1/7	1	6%
Chorro de agua a ultra alta presión	5	1/5	3	1/5	3	12%
limpieza CIP	3	1/7	1/5	1/7	1/5	3%
remoción a partir de la microalga <i>Chlorella</i> sp.	5	1/5	1/3	1/5	3	8%
Reducción por micro nano burbujas (aire-ozono)	3	1/7	1/5	1/7	1/3	4%
Limpieza postcosecha	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1%

**ANEXO 4.**

**MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO AMBIENTAL**

<b>AMBIENTAL</b>						
<b>CRITERIO 3</b>	Solución extractora Agua	Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido	Limpieza de tuberías por inyección de aire	Limpieza de tuberías por Pig	Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua	<b>RESULTADO</b>
Solución extractora Agua	1	1/5	1/7	1/9	1/5	4%
Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido	5	1	1/3	1/5	5	11%
Limpieza de tuberías por inyección de aire	7	3	1	1/5	3	17%
Limpieza de tuberías por Pig	9	5	5	1	7	32%
Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua	5	1/5	1/3	1/7	1	5%
Chorro de agua a ultra alta presión	5	3	1/3	1/5	3	12%
limpieza CIP	1/5	1/5	1/7	1/9	1/5	2%
remoción a partir de la microalga <i>Chlorella</i> sp.	3	1/3	1/5	1/5	3	8%
Reducción por micro nano burbujas (aire-ozono)	5	1/3	1/3	1/5	3	6%
Limpieza postcosecha	1/9	1/5	1/7	1/9	0,2	2%

**ANEXO 5.**

**MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO LEGAL**

<b>LEGAL</b>						
<b>CRITERIO 4</b>	Solución extractora Agua	Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido	Limpieza de tuberías por inyección de aire	Limpieza de tuberías por Pig	Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua	<b>RESULTADO</b>
Solución extractora Agua	1	5	1/5	1/5	7	11%
Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido	1/5	1	1/3	1/5	3	7%
Limpieza de tuberías por inyección de aire	5	3	1	1/3	5	14%
Limpieza de tuberías por Pig	5	5	3	1	5	25%
Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua	1/7	1/3	1/5	1/5	1	6%
Chorro de agua a ultra alta presión	3	3	1/3	1/3	3	10%
limpieza CIP	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	3%
remoción a partir de la microalga <i>Chlorella</i> sp.	3	5	5	1/3	3	20%
Reducción por micro nano burbujas (aire-ozono)	1/3	1/3	1/3	1/5	1/3	4%
Limpieza postcosecha	1/7	1/5	1/7	1/7	1/5	1%

**ANEXO 6.**

**MATRIZ DE ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL CRITERIO SEGURIDAD Y SALUD**

<b>SEGURIDAD Y SALUD</b>						
<b>CRITERIO 5</b>	Solución extractora Agua	Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido	Limpieza de tuberías por inyección de aire	Limpieza de tuberías por Pig	Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua	<b>RESULTADO</b>
Solución extractora Agua	1	5	1/3	3	5	15%
Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido	1/5	1	0,2	1/3	3	10%
Limpieza de tuberías por inyección de aire	3	5	1	3	5	17%
Limpieza de tuberías por Pig	1/3	3	1/3	1	7	12%
Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua	1/5	1/3	1/5	1/7	1	3%
Chorro de agua a ultra alta presión	1/3	1/3	1/3	1/3	5	8%
limpieza CIP	1/5	1/7	1/5	1/5	1/3	3%
remoción a partir de la microalga <i>Chlorella</i> sp.	3	5	5	3	5	25%
Reducción por micro nano burbujas (aire-ozono)	1/3	1/5	1/3	1/5	3	5%
Limpieza postcosecha	1/5	1/7	1/5	1/5	1/3	2%



**ANEXO 7.**

**RESULTADO PRIORIZACIÓN DEL MÉTODO**

<b>CRITERIO</b>	<b>ECONOMICO</b>	<b>CALIDAD</b>	<b>AMBIENTAL</b>	<b>SEGURIDAD Y SALUD</b>	<b>LEGAL</b>	<b>PRIORIZACIÓN</b>
Solución extractora Agua	0,027	0,017	0,044	0,146	0,106	4,0%
Limpieza de tuberías por equipos de ultrasonido	0,226	0,136	0,106	0,100	0,065	13,6%
Limpieza de tuberías por inyección de aire	0,100	0,168	0,170	0,173	0,141	15,4%
Limpieza de tuberías por Pig	0,294	0,354	0,324	0,125	0,245	31,4%
Limpieza de tuberías y equipos con vapor de agua	0,063	0,069	0,055	0,034	0,056	6,2%
Chorro de agua a ultra alta presión	0,118	0,089	0,119	0,080	0,097	10,1%
limpieza CIP	0,035	0,027	0,022	0,026	0,030	2,7%
remoción a partir de la microalga Chlorella sp.	0,084	0,062	0,085	0,246	0,204	9,5%
Reducción por micro nano burbujas (aire-ozono)	0,042	0,049	0,060	0,050	0,041	5,0%
Limpieza postcosecha	0,011	0,028	0,016	0,020	0,015	2,1%

## ANEXO 8.

### CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LAS BOMBAS PARA LA LINEA 1,2 Y 3

Se determino la potencia de las bombas en cada línea de tubería a intervenir, lo primero que se tiene que hallar son las pérdidas del licor de cacao por la tubería y por los accesorios, en la Datos Generales para el cálculo de la potencia se muestran los datos generales que se requieren para los cálculos.

*Datos Generales para el cálculo de la potencia*

Datos Generales		
Caudal (Q)	3	m <sup>3</sup> /h
Longitud(L)	48,3	m
Diámetro (D)	0,083	m
Viscosidad( $\mu$ )	0,16	Pa*s
Densidad( $\rho$ )	1100	kg/m <sup>3</sup>
Velocidad(vel)	0,171	m/s

El primer parámetro para definir es el número de Reynolds del licor de cacao, luego determinar si el comportamiento del flujo por la tubería es laminar (<2100), turbulento (<4000) o transitorio (2100-4000) y luego, determinar el coeficiente de fricción.

$$Re = \frac{D * v * \rho}{\mu}$$

Donde:

$Re =$  Numero de Reynolds

$D(m) =$  Diametro de la tubería

$v\left(\frac{m}{s}\right) =$  Velocidad del fluido

$\rho\left(\frac{kg}{m^3}\right) =$  Densidad del fluido

$\mu (Pa * s) =$  Viscosidad Cinematica

$$Re = \frac{0,083m * 0,171 \frac{m}{s} * 1100 kg/m^3}{0,16 Pa * s} = 98,11 < 2100: \text{Flujo Laminar}$$

$$f = \frac{64}{Re}$$

$$f = \frac{64}{98,11} = 0,652$$

Luego de determinar el coeficiente de fricción, se debe determinar las pérdidas en la tubería y accesorios.

$$h_f = \left[ f * \frac{L}{D} + K \right] \frac{v^2}{2 * g}$$

Donde:

$f$  = Coeficiente de fricción

$L$  (m) = Longitud de la tubería

$K$  = Coeficiente de Resistencia

- Línea 1:

Para tuberías se aplica la ecuación de Darcy

$$h_L = \left( f * \frac{L}{D} \right) * \frac{v^2}{2 * g}$$

De donde resulta que:

$$K_{Tubería} = \left( f * \frac{L}{D} \right)$$

$$K_{Tubería} = \left( 0,652 * \frac{48,3 \text{ m}}{0,083 \text{ m}} \right) = 377,74$$

Para los accesorios se aplica la ecuación del coeficiente de resistencia (K), teniendo en cuenta que para los codos de 45° son 6 y válvulas 3.

$$K_{Válvulas} = 3 * f$$

$$K_{Válvulas} = 3 * 0,652 * 3 = 5,87$$

$$K_{\text{Codos}} = 16 * f$$

$$K_{\text{Codos}} = 16 * 0,652 * 6 = 62,62$$

Dando como resultado de pérdidas de carga total:

$$h_f = [377,74 + 68,49] \frac{(0,171 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,67 \text{ m}$$

- Línea 2

Para tuberías se aplica la ecuación de Darcy

$$K_{\text{Tubería}} = \left( 0,652 * \frac{22,4 \text{ m}}{0,083 \text{ m}} \right) = 175,18$$

Para los accesorios se aplica la ecuación del coeficiente de resistencia (K), teniendo en cuenta que para los codos de 45° son 4 y válvulas 3.

$$K_{\text{Válvulas}} = 3 * 0,652 * 3 = 5,87$$

$$K_{\text{Codos}} = 16 * 0,652 * 4 = 41,75$$

Dando como resultado de pérdidas de carga total:

$$h_f = [175,18 + 47,62] \frac{(0,171 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,33 \text{ m}$$

- Línea 3

Para tuberías se aplica la ecuación de Darcy

$$K_{\text{Tubería}} = \left( 0,652 * \frac{18,5 \text{ m}}{0,083 \text{ m}} \right) = 146,11$$

Para los accesorios se aplica la ecuación del coeficiente de resistencia (K), teniendo en cuenta que para los codos de 45° son 5 y válvulas 3.

$$K_{Válvulas} = 3 * 0,652 * 3 = 5,87$$

$$K_{Codos} = 16 * 0,652 * 5 = 52,44$$

Dando como resultado de pérdidas de carga total:

$$h_f = [146,11 + 58,31] \frac{(0,171 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} = 0,31 \text{ m}$$

Después de tener las pérdidas en cada línea, se debe hallar la presión  $P_2$  en el punto 2 del trayecto en cada línea, el cálculo se realizó en base a la ecuación de Bernoulli y se tiene en cuenta que la velocidad en ambos puntos es constante.

$$\frac{v_1^2}{2 * g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{v_2^2}{2 * g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + h_f$$

$$P_2 = \left( \left( \frac{P_1}{\gamma} \right) + Z_1 - Z_2 - h_f \right) * \gamma$$

- Línea 1:

$$P_2 = \left( \left( \frac{3 \text{ bar}}{10104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}^2}} \right) + 0 \text{ m} - 13 \text{ m} - 0,67 \text{ m} \right) * 10104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}^2} = 1,62 \text{ bar}$$

- Línea 2:

$$P_2 = \left( \left( \frac{2 \text{ bar}}{10104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}^2}} \right) + 0 \text{ m} - 13 \text{ m} - 0,33 \text{ m} \right) * 10104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}^2} = 0,65 \text{ bar}$$

- Línea 3:

$$P_2 = \left( \left( \frac{2 \text{ bar}}{10104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}^2}} \right) + 0 \text{ m} - 13 \text{ m} - 0,31 \text{ m} \right) * 10104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}^2} = 0,66 \text{ bar}$$

Después de determinar la presión se determina la cabeza de la bomba  $H_{pump}$ , para así, determinar la potencia de la bomba para cada línea.

$$H_{pump} = \frac{v_2^2}{2 * g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + h_f - \frac{v_1^2}{2 * g} - \frac{P_1}{\gamma} - Z_1$$

- Línea 1:

$$H_{pump} = \frac{1,62 \text{ Bar}}{10104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}^2}} + 13 \text{ m} + 0,67 \text{ m} - \frac{3 \text{ bar}}{10104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}^2}} = 59,8 \text{ m}$$

- Línea 2:

$$H_{pump} = \frac{0,65 \text{ Bar}}{10104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}^2}} + 13 \text{ m} + 0,33 \text{ m} - \frac{2 \text{ bar}}{10104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}^2}} = 39,59 \text{ m}$$

- Línea 3:

$$H_{pump} = \frac{0,65 \text{ Bar}}{10104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}^2}} + 13 \text{ m} + 0,31 \text{ m} - \frac{2 \text{ bar}}{10104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}^2}} = 39,56 \text{ m}$$

$$P(W) = \frac{Q * \gamma * H_{pump}}{n}$$

Donde:

$$Q \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \text{Caudal del fluido}$$

$$\gamma \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 * \text{s}^2} \right) = \text{Peso Especifico del fluido}$$

$$H_{pump}(m) = \text{Cabeza de la bomba}$$

$$n = \text{Eficiencia de la bomba}$$

- Línea 1:

$$P(W) = \frac{0,00086 \frac{m^3}{h} * 10104 \frac{kg}{m^2 * s^2} * 59,8 m}{0,8} = 645 W$$

- Línea 2:

$$P(W) = \frac{0,00086 \frac{m^3}{h} * 10104 \frac{kg}{m^2 * s^2} * 39,59 m}{0,8} = 430 W$$

- Línea 3:

$$P(W) = \frac{0,00086 \frac{m^3}{h} * 10104 \frac{kg}{m^2 * s^2} * 39,56 m}{0,8} = 429,7 W$$

## ANEXO 9.

### TRANSFERENCIA DE CALOR EN TUBERÍAS ENCAMISADAS PARA EL LICOR DE CACAO

Al realizar el análisis de la pérdida de energía para las tuberías, se contempla en primer lugar una tubería enchaqueta que brinda soporte al licor de cacao, mediante agua caliente que ingresa a 50°C de una etapa anterior del proceso de manufactura de la empresa, con el fin de mantener el licor de cacao a una temperatura constante de 45°C garantizando así el paso del flujo por la tubería sin inconvenientes, para lograr este objetivo el agua caliente debe ceder calor hacia el licor de cacao evidenciando en la salida de la tubería de agua caliente la disminución de temperatura a 47°C.

Se realiza un análisis el cual nos demuestra que se realiza dos transferencias por convección por los dos fluidos tratados (agua caliente y licor de cacao) y una transferencia con conducción debido a la pared cilíndrica de la tubería, obteniendo la siguiente ecuación para el cálculo de la pérdida de energía en una tubería cilíndrica:

*Perdida de energía para un tubería cilíndrica*

$$Q = \frac{2\pi L(T_1 - T_2)}{\frac{1}{h_1 r_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{K} + \frac{1}{h_2 r_2}}$$

En la siguiente tabla se presentan los datos generales para la realización del cálculo:

*Datos generales del proceso de manufactura*

<b>Datos Generales</b>		<b>Unidades</b>
Diámetro (D)	0,080	<i>m</i>
Viscosidad ( $\mu$ )	0,160	$\frac{kg}{m * s}$
Densidad ( $\rho$ )	1100	$\frac{kg}{m^3}$
Velocidad (V)	0,171	$\frac{m}{s}$
$r_1$	0,042	<i>m</i>
$r_2$	0,044	<i>m</i>
$L_1$	48,300	<i>m</i>
$L_2$	22,400	<i>m</i>
$L_3$	18,500	<i>m</i>



Los datos del agua son tomados de las tablas termodinámicas a la temperatura de 50°C [54], mientras que la capacidad calorífica del licor de cacao, la conductividad del licor de cacao [55] y del acero inoxidable son tomados de la bibliografía [56].

*Parámetros del licor de cacao y del agua*

$h_2(\text{agua})$	78,100	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
$C_{p-\text{agua}}$	4,177	$\frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C}$
$C_{p-\text{licor}}$	1,373	$\frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C}$
$K_{\text{licor}}$	0,302	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$
$K_{\text{acero}}$	16	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$

A continuación, se realiza el cálculo para el coeficiente de convección " $h_1$ " del licor de cacao, se deben calcular dos números adimensionales en primer lugar el número de Reynolds y posterior el número de Nusselt.

*Calculo número de Reynolds*

$$Re = \frac{D * V * \rho}{\mu}$$

$$e = \frac{0,080m * 0,171 \frac{m}{s} * 1100,0 \frac{kg}{m^3}}{0,160 \frac{kg}{m * s}} = 94,100$$

Obtenido un fluido totalmente laminar, con un valor de Reynolds menor a 2100.

*Calculo número de Nusselt*

$$Nu = 0,669 * Re^{\frac{1}{2}} * Pr^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 0,669 * (94,100)^{\frac{1}{2}} * \left( \frac{1,373 \frac{KJ}{Kg * ^\circ C} * 0,160 \frac{kg}{m * s}}{0,000302 \frac{kw}{m * s}} \right)^{\frac{1}{3}} = 58,369$$

Se utiliza la ecuación de Nusselt con el fin de despejar el  $h_{1-licor}$

*Número de Nusselt para tubos cilíndricos*

$$Nu = \frac{D * h_{1-licor}}{K_{licor}}$$

Obteniendo la siguiente ecuación:

$$h_{1-licor} = \frac{Nu * K_{licor}}{D}$$

$$h_{1-licor} = \frac{58,369 * 0,302 \frac{W}{m^{\circ C}}}{0,080m} = 220,342 \frac{W}{m^{\circ C}}$$

Se utiliza la ecuación de pérdida de energía, para hallar el calor en cada línea intervenida del proyecto, se realizará una muestra de cálculo para la línea 1, debido a que el único parámetro variable es la longitud de cada tubería.

- Línea 1:

$$Q = \frac{2 * \pi * 48,3m (45 - 50)^{\circ C}}{\frac{1}{220,342 \frac{W}{m^{\circ C}} * 0,042m} + \frac{\ln(\frac{0,044m}{0,042m})}{16,000 \frac{W}{m * ^\circ C}} + \frac{1}{78,100 \frac{W}{m^{\circ C}} * 0,044m}} = -3783,4 W$$

- Línea 2:

$$Q = \frac{2 * \pi * 22,4 m (45 - 50)^{\circ C}}{\frac{1}{220,342 \frac{W}{m^{\circ C}} * 0,042m} + \frac{\ln(\frac{0,044m}{0,042m})}{16,000 \frac{W}{m * ^\circ C}} + \frac{1}{78,100 \frac{W}{m^{\circ C}} * 0,044m}} = -1754,62 W$$

- Línea 3:

$$Q = \frac{2 * \pi * 18,5 m (45 - 50)^{\circ C}}{\frac{1}{220,342 \frac{W}{m^{\circ C}} * 0,042m} + \frac{\ln(\frac{0,044m}{0,042m})}{16,000 \frac{W}{m * ^\circ C}} + \frac{1}{78,100 \frac{W}{m^{\circ C}} * 0,044m}} = -1449,13 W$$

Por último, se utiliza la ecuación del calor sensible, para determinar el flujo de agua caliente que requiere cada línea de producción y cumplir con el objetivo de mantener el licor de cacao a la temperatura optima.

*Calculo para el calor sensible*

$$Q = m_{licor}C_{p(licor)}(T_f - T_i) + m_{agua}C_{p(agua)}(T_f - T_i)$$

Se considera en primer lugar que la temperatura inicial y final del licor de cacao es constante en 45°C, por ende, el primer factor  $(T_f - T_i)$  para el agua será igual a 0, lo que en consecuencia invalida el factor  $m_{licor}C_{p(licor)}(T_f - T_i)$  del licor de cacao, obteniendo así que el flujo de agua dependerá de la perdida de energía en las tuberías, la capacidad calorífica y las temperaturas de entrada y salida del agua.

$$m_{agua} = \frac{Q}{C_{p(agua)}(T_f - T_i)}$$

- Línea 1:

$$m_{agua} = \frac{3,783 \frac{KJ}{s}}{4,177 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C} (50 - 47)^{\circ}C} = 2,72 \frac{Kg}{s}$$

- Línea 2:

$$m_{agua} = \frac{1,754 \frac{KJ}{s}}{4,177 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C} (50 - 47)^{\circ}C} = 1,26 \frac{Kg}{s}$$

- Línea 3:

$$m_{agua} = \frac{1,449 \frac{KJ}{s}}{4,177 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C} (50 - 47)^{\circ}C} = 1,04 \frac{Kg}{s}$$

## ANEXO 10.

### CALCULO DE LA FUERZA DE FRICCIÓN EJERCIDA POR EL LICOR DE CACAO DENTRO DE LA TUBERÍA

Al analizar las fuerzas necesarias ejercidas por el licor de cacao dentro de la tubería, se procede a calcular la fuerza de fricción en los tramos horizontales y verticales; como datos generales se conoce que la velocidad del Pig es constante a lo largo de la tubería, el cual es 0,8 m/s para todos los casos, lo primero que se debe determinar es el tiempo que tarda el Pig en pasar por los tramos horizontales, se utilizó la ecuación de la velocidad, pero despejando el tiempo, luego se halló la aceleración, la masa retenida y finalmente la fuerza.

$$V = \frac{x}{t}$$

$$t = \frac{x}{v} \quad a = \frac{v}{t} \quad m = \frac{\pi * R^2 * L}{2} * \rho \quad F = m * a$$

- Línea 1
  - Tramo 1

$$t = \frac{5,9 \text{ m}}{0,8 \text{ m/s}} = 7,38 \text{ s}$$

$$a = \frac{0,8 \text{ m/s}}{7,38 \text{ s}} = 0,108 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = \frac{\pi * 0,04^2 * 5,9 \text{ m}}{2} * 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 16,3 \text{ kg}$$

$$F = 16,3 \text{ kg} * 0,108 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1,77 \text{ N}$$

- Tramo 2

$$t = \frac{6,3 \text{ m}}{0,8 \text{ m/s}} = 7,88 \text{ s}$$

$$a = \frac{0,8 \text{ m/s}}{7,88 \text{ s}} = 0,102 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = \frac{\pi * 0,04^2 * 6,3 \text{ m}}{2} * 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 17,4 \text{ kg}$$

$$F = 17,4 \text{ kg} * 0,102 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1,77 \text{ N}$$

- Tramo 3

$$t = \frac{3 \text{ m}}{0,8 \text{ m/s}} = 3,75 \text{ s}$$

$$a = \frac{0,8 \text{ m/s}}{3,75 \text{ s}} = 0,213 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = \frac{\pi * 0,04^2 * 3 \text{ m}}{2} * 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 8,3 \text{ kg}$$

$$F = 8,3 \text{ kg} * 0,213 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1,77 \text{ N}$$

- Tramo 4

$$t = \frac{20,1 \text{ m}}{0,8 \text{ m/s}} = 25,13 \text{ s}$$

$$a = \frac{0,8 \text{ m/s}}{25,13 \text{ s}} = 0,032 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = \frac{\pi * 0,04^2 * 20,1 \text{ m}}{2} * 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 55,6 \text{ kg}$$

$$F = 55,6 \text{ kg} * 0,032 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1,77 \text{ N}$$

- Línea 2

- Tramo 1

$$t = \frac{3,4 \text{ m}}{0,8 \text{ m/s}} = 4,25 \text{ s}$$

$$a = \frac{0,8 \text{ m/s}}{4,25 \text{ s}} = 0,188 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = \frac{\pi * 0,04^2 * 3,4 \text{ m}}{2} * 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 9,4 \text{ kg}$$

$$F = 9,4 \text{ kg} * 0,188 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1,77 \text{ N}$$

- Tramo 2

$$t = \frac{6 \text{ m}}{0,8 \text{ m/s}} = 7,50 \text{ s}$$

$$a = \frac{0,8 \text{ m/s}}{7,50 \text{ s}} = 0,107 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = \frac{\pi * 0,04^2 * 6 \text{ m}}{2} * 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 16,6 \text{ kg}$$

$$F = 16,6 \text{ kg} * 0,107 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1,77 \text{ N}$$

- Línea 3

- Tramo 1

$$t = \frac{2,5 \text{ m}}{0,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 3,13 \text{ s}$$

$$a = \frac{0,8 \text{ m/s}}{3,13 \text{ s}} = 1,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = \frac{\pi * 0,04^2 * 2,5 \text{ m}}{2} * 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 6,9 \text{ kg}$$

$$F = 6,9 \text{ kg} * 1,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1,77 \text{ N}$$

- Tramo 2

$$t = \frac{3 \text{ m}}{0,8 \text{ m/s}} = 3,75 \text{ s}$$

$$a = \frac{0,8 \text{ m/s}}{3,75 \text{ s}} = 0,213 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = \frac{\pi * 0,04^2 * 3 \text{ m}}{2} * 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 8,3 \text{ kg}$$

$$F = 8,3 \text{ kg} * 0,213 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1,77 \text{ N}$$

En las tuberías verticales se determinó la misma fuerza, pero adicional se calculó el peso el cual fue sumado con la fricción para obtener un valor de fuerza ejercida por el licor de cacao total.

$$W = m * g$$

- Línea 1

- Tramo 1

$$t = \frac{6,8 \text{ m}}{0,8 \text{ m/s}} = 8,50 \text{ s}$$

$$a = \frac{0,8 \text{ m/s}}{8,50 \text{ s}} = 0,094 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = \pi * 0,04^2 * 6,8 \text{ m} * 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 37,6 \text{ kg}$$

$$F_f = 37,6 \text{ kg} * 0,094 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3,54 \text{ N}$$

$$W = 37,6 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 368,84 \text{ N}$$

$$F_T = 3,54 \text{ N} + 368,84 \text{ N} = 372,4 \text{ N}$$

- Tramo 2

$$t = \frac{6,2 \text{ m}}{0,8 \text{ m/s}} = 7,75 \text{ s}$$

$$a = \frac{0,8 \text{ m/s}}{7,75 \text{ s}} = 0,103 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = \pi * 0,04^2 * 6,2 \text{ m} * 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 34,3 \text{ kg}$$

$$F_f = 37,6 \text{ kg} * 0,094 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3,54 \text{ N}$$

$$W = 37,6 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 336,30 \text{ N}$$

$$F_T = 3,54 \text{ N} + 336,30 \text{ N} = 339,8 \text{ N}$$

- Línea 2

- Tramo 1

$$t = \frac{7,5 \text{ m}}{0,8 \text{ m/s}} = 9,38 \text{ s}$$

$$a = \frac{0,8 \text{ m/s}}{9,38 \text{ s}} = 0,085 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = \pi * 0,04^2 * 7,5 \text{ m} * 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 41,5 \text{ kg}$$

$$F_f = 41,5 \text{ kg} * 0,085 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3,54 \text{ N}$$

$$W = 41,5 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 406,81 \text{ N}$$

$$F_T = 3,54 \text{ N} + 406,81 \text{ N} = 410,3 \text{ N}$$

- Tramo 2

$$t = \frac{5,5 \text{ m}}{0,8 \text{ m/s}} = 6,88 \text{ s}$$

$$a = \frac{0,8 \text{ m/s}}{7,75 \text{ s}} = 0,116 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = \pi * 0,04^2 * 5,5 \text{ m} * 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 30,4 \text{ kg}$$

$$F_f = 30,4 \text{ kg} * 0,116 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3,54 \text{ N}$$

$$W = 30,4 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 298,33 \text{ N}$$

$$F_T = 3,54 \text{ N} + 298,33 \text{ N} = 301,9 \text{ N}$$

- Línea 3

- Tramo 1

$$t = \frac{4 \text{ m}}{0,8 \text{ m/s}} = 5 \text{ s}$$

$$a = \frac{0,8 \text{ m/s}}{5 \text{ s}} = 0,16 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = \pi * 0,04^2 * 4 \text{ m} * 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 22,1 \text{ kg}$$

$$F_f = 22,1 \text{ kg} * 0,16 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3,54 \text{ N}$$

$$W = 22,1 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 216,97 \text{ N}$$

$$F_T = 3,54 \text{ N} + 216,97 \text{ N} = 220,5 \text{ N}$$

- Tramo 2

$$t = \frac{9 \text{ m}}{0,8 \text{ m/s}} = 11,25 \text{ s}$$



$$a = \frac{0,8 \text{ m/s}}{7,75 \text{ s}} = 0,071 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$m = \pi * 0,04^2 * 9 \text{ m} * 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 49,8 \text{ kg}$$

$$F_f = 49,8 \text{ kg} * 0,071 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3,54 \text{ N}$$

$$W = 49,8 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 488,17 \text{ N}$$

$$F_T = 3,54 \text{ N} + 488,17 \text{ N} = 491,7 \text{ N}$$

**ANEXO 11.**  
**RECOMENDACIONES**

- Evaluar el método de limpieza variando la velocidad del Pig y la temperatura del ambiente, pero asegurando una mejor efectividad o la misma del 95%.
- Evaluar el método de limpieza Pig a escala industrial con el cuál se logra eliminar la contaminación cruzada en las tuberías con los productos de alto en cadmio y los bajos cadmio.
- Evaluar la vida útil del Pig con respecto a las producciones que se generen en la planta de producción.
- Se debe tener claro que los valores de costos utilizados en la evaluación financiera de la implementación del método son tomados al año 2020, si se desea implementar el método en otro año diferente, se recomienda actualizar el análisis de costos.