



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA**

**DETERMINACIÓN DE LOS PERFILES TEÓRICOS DE PRESIÓN Y VELOCIDAD EN
UN EXTRUSOR MONOHUSILLO MEELKO Y CARACTERIZACIÓN PROXIMAL DE
UNA FORMULACIÓN DE ALIMENTO PARA PECES**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
QUÍMICA DE ALIMENTOS**

**PRESENTA:
HEIMPEL COVARRUBIAS MARIA FERNANDA**

MTRO. HERNÁNDEZ MELÉNDEZ ÓSCAR



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., AÑO 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: PROFESOR NAVARRO OCAÑA ARTURO

VOCAL: PROFESOR HERNÁNDEZ MELÉNDEZ ÓSCAR

SECRETARIO: PROFESOR NIETO PINEDA FEDERICO

1er. SUPLENTE: PROFESOR CONCA TORRES ARMANDO

2do. SUPLENTE: PROFESOR DÍAZ ÁLVAREZ JUAN MANUEL

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: LABORATORIO DE INGENIERÍA QUÍMICA, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

MTRO. ÓSCAR HERNÁNDEZ MELÉNDEZ

SUPERVISOR TÉCNICO:

QFB. JUAN MANUEL DÍAZ ÁLVAREZ

SUSTENTANTE:

MARIA FERNANDA HEIMPEL COVARRUBIAS

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Agroindustrial, en el Laboratorio de Ingeniería Química, de la Facultad de Química de la UNAM, con el apoyo del proyecto PAPIIME PE203419: “El proceso de extrusión como una herramienta didáctica para diseñar alimentos novedosos para humanos y mascotas”.

Le agradezco a mi gran asesor Óscar Hernández, a mi asesor técnico Juan Manuel Díaz y a mi jurado, conformado por Arturo Navarro, Federico Nieto y Armando Conca, por todo el apoyo brindado en la elaboración de esta tesis.

Gracias a la Facultad de Química de la UNAM, por guiarme para obtener esta perspectiva de la vida.

ÍNDICE GENERAL.

| | |
|--|------|
| Índice de Figuras..... | VI |
| Índice de Tablas..... | VIII |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1 Partes del extrusor monohusillo..... | 3 |
| 1.1.1 TOLVA..... | 4 |
| 1.1.2 Cilindro..... | 5 |
| 1.1.3 Garganta de alimentación..... | 5 |
| 1.1.4 Tornillo / Husillo..... | 6 |
| 1.1.5 Cabezal y boquilla/dado..... | 7 |
| 1.2 Funciones del extrusor monohusillo..... | 7 |
| 1.2.1 Transporte de sólidos (zona de alimentación)..... | 8 |
| 1.2.2 Fusión (zona de transición)..... | 9 |
| 1.2.3 Transporte del fundido (zona de dosificado)..... | 10 |
| 1.2.4 Conformado (cabezal)..... | 11 |
| 1.3 Materias primas de la formulación de alimento para peces..... | 12 |
| 1.3.1 Cereales..... | 12 |
| 1.3.2 Leguminosas..... | 23 |
| 1.3.3 Alimentos de la pesca..... | 29 |
| 1.3.4 Aceites y grasas..... | 32 |
| 1.3.5 Aditivos..... | 36 |
| 1.4 Cambios producidos en los principales macronutrientes de la formulación durante el proceso de extrusión..... | 38 |
| 1.4.1 Carbohidratos..... | 38 |
| 1.4.2 Proteínas..... | 39 |
| 1.5 Alimentación para peces..... | 40 |
| 1.5.1 Alimentos naturales..... | 40 |
| 1.5.2 Alimentos completos..... | 40 |
| 1.5.3 Alimentos complementarios..... | 41 |
| 2. Justificación..... | 44 |
| 2.1 Producción de cereales..... | 44 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.2 | <i>Producción acuícola</i> | 46 |
| 2.3 | <i>Producción de leguminosas</i> | 46 |
| 3. | Hipótesis..... | 46 |
| 4. | Objetivos..... | 47 |
| 4.1 | <i>Objetivo general</i> | 47 |
| 4.2 | <i>Objetivos particulares</i> | 47 |
| 5. | Metodología experimental..... | 48 |
| 5.1 | <i>Análisis de materias primas</i> | 48 |
| 5.1.1 | <i>Contenido de humedad por termobalanza (Unidades: % Humedad)</i> . 49 | |
| 5.1.2 | <i>Contenido de celulosa y lignina por ADF (Unidades: % Celulosa y lignina)</i> 49 | |
| 5.1.3 | <i>Contenido de fibra insoluble por NDF (Unidades: % fibra insoluble)</i> . 50 | |
| 5.1.4 | <i>Contenido de proteína por Bio-Rad Protein Assay (Unidades: % Proteína)</i> | 50 |
| 5.2 | <i>Determinación de perfiles de velocidad y flujo en la zona de compresión del husillo</i> | 54 |
| 5.2.1 | <i>Calibrado de la tolva (Unidades: kg/h y m³/s)</i> | 54 |
| 5.2.2 | <i>Medición del husillo en la zona de compresión (Unidades: m y °)</i> | 54 |
| 5.2.3 | <i>Modelo matemático en la zona de compresión, tomado del capítulo 5 del libro de Tecnología de Polímeros (Beltrán, 2012)</i> | 56 |
| 5.3 | <i>Determinación de recta de esfuerzo de cizalla y recta característica para una boquilla circular sencilla</i> | 62 |
| 5.3.1 | <i>Esfuerzo de cizalla frente a velocidad de cizalla en la boquilla</i> | 62 |
| 5.3.2 | <i>Recta característica de la boquilla circular sencilla</i> | 62 |
| 6. | Resultados experimentales y análisis de resultados. | 63 |
| 6.1 | <i>Resultados del análisis de materias primas</i> | 63 |
| 6.1.1 | <i>Resultados análisis de humedad</i> | 64 |
| 6.1.2 | <i>Resultados análisis de celulosa y lignina</i> | 65 |
| 6.1.3 | <i>Resultados análisis de fibra insoluble</i> | 66 |
| 6.1.4 | <i>Resultados análisis de proteína</i> | 67 |
| 6.2 | <i>Resultados perfiles de flujo y velocidad en la zona de compresión del husillo</i> | 69 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6.2.1 | <i>Resultados del calibrado de la tolva</i> | 69 |
| 6.2.2 | <i>Resultados de las mediciones del husillo en la zona de compresión</i> | 70 |
| 6.2.3 | <i>Resultados de la recta operativa del husillo (perfil de flujo), tomando como base la harina de maíz y harina de trigo</i> | 70 |
| 6.2.4 | <i>Resultados de las modificaciones en los parámetros de la geometría del husillo en la recta operativa</i> | 72 |
| 6.2.5 | <i>Resultados del perfil de velocidad del husillo, tomando como base la harina de maíz y la harina de trigo</i> | 74 |
| 6.2.6 | <i>Resultados de la modificación del ángulo del filete para el perfil de velocidad</i> | 77 |
| 6.3 | <i>Resultados de la determinación de la recta de esfuerzo de cizalla y recta característica para una boquilla circular sencilla</i> | 79 |
| 6.3.1 | <i>Resultados de la recta de esfuerzo de cizalla, tomando en cuenta harina de trigo y harina de maíz</i> | 79 |
| 6.3.2 | <i>Resultados de la recta característica de la boquilla circular sencilla, tomando como base harina de maíz y harina de trigo</i> | 80 |
| 7. | Conclusiones | 84 |
| 8. | Referencias..... | 86 |
| 9. | Anexo 1..... | 99 |

Índice de Figuras.

| | |
|---|----|
| Figura 1. Joseph Bramah con prensa de pistón manual (MUIB, 2016) | 1 |
| Figura 2. Extrusor de husillo simple y doble husillo (Moscicki, 2011) | 2 |
| Figura 3. Extrusor isotérmico, autógeno y politrópico (Engormix, 2017) | 3 |
| Figura 4. Representación de extrusor monohusillo Meelko (Beltrán, 2012) | 4 |
| Figura 5. Tolva de sección circular y de sección rectangular (Beltrán, 2012) | 4 |
| Figura 6. Secciones del cilindro (Flores, 2020) | 5 |
| Figura 7. Vista superior y sección AA de la garganta de alimentación (Beltrán, 2012) | 6 |
| Figura 8. Husillo de extrusor monohusillo (Beltrán, 2012) | 6 |
| Figura 9. Zonas del husillo y evolución de la presión (Beltrán, 2012) | 7 |
| Figura 10. Flujo del material en la tolva de alimentación (Beltrán, 2012) | 8 |
| Figura 11. Pozo de polímero fundido en la zona de transición (Beltrán, 2012) | 10 |
| Figura 12. Perfil de velocidad originado por el flujo de arrastre (Beltrán, 2012) | 10 |
| Figura 13. Perfil de velocidad originado por el flujo de presión (Beltrán, 2012) | 11 |
| Figura 14. Perfil de velocidad del flujo total (Beltrán, 2012) | 11 |
| Figura 15. Estructura química del almidón (Birt, 2013) | 13 |
| Figura 16. Morfología de los cereales (Wrigley, 2015) | 15 |
| Figura 17. Grano de maíz (Bonavia, 2013) | 16 |
| Figura 18. Estructura y composición del trigo (Parada, 2010) | 18 |
| Figura 19. Gluten (Parada, 2010) | 19 |
| Figura 20. Estructura y composición de la cebada (Serna, 2013) | 21 |
| Figura 21. Planta de frijol en simbiosis fijadora de nitrógeno con <i>Rhizobium</i> (Lara, 2015) | 24 |
| Figura 22. Morfología de un grano de soya (Campomanes, 2008) | 26 |
| Figura 23. Variaciones de color en la soya (Rosas, 2006) | 27 |
| Figura 24. Morfología de <i>M. sativa</i> en floración (Fresquet, 2015) | 28 |
| Figura 25. Anatomía de un pez (Gutiérrez, 2017) | 30 |
| Figura 26. Partes del palangre horizontal y vertical (AUNAP, 2017) | 31 |
| Figura 27. Estructura química ácido oleico, linoleico y linolénico (American Chemical Society, 2021) | 33 |
| Figura 28. Productos de mayor interés comercial de la palma aceitera (Sierra-Márquez, 2017) | 34 |
| Figura 29. Estructura química celulosa y hemicelulosa (Lérida, 2018) | 35 |
| Figura 30. Proceso de gelatinización en almidón (Wilhelm, 2016) | 39 |
| Figura 31. Hábitos alimenticios de diferentes especies de peces importantes para la acuicultura (FAO, 2003) | 40 |
| Figura 32. Pez hacha (Portillo, 2017) | 41 |
| Figura 33. <i>Botia kubotai</i> (Kottelat, 2004) | 42 |
| Figura 34. Cíclido <i>Haplochromis moorii</i> (Nochebuena, 2020) | 42 |

| | |
|---|-----|
| Figura 35. Producción, utilización y existencias de cereales (FAO, 2020) | 45 |
| Figura 36. Calibrado de la tolva del extrusor monohusillo Meelko (MKED040C) | 54 |
| Figura 37. Sistema de coordenadas y nomenclatura (Beltrán, 2012) | 55 |
| Figura 38. Husillo cortado a lo largo de su eje y desenrollado (Beltrán, 2012) | 59 |
| Figura 39 Recta operativa de un husillo | 61 |
| Figura 40. Dado de extrusor monohusillo Meelko con boquilla circular sencilla | 62 |
| Figura 41. Recta operativa harina de maíz | 71 |
| Figura 42. Recta operativa para harina de trigo | 71 |
| Figura 43. Perfil de velocidad del husillo para harina de maíz | 75 |
| Figura 44. Perfil de velocidad del husillo para harina de trigo | 76 |
| Figura 45. Perfil de velocidad ideal del husillo para harina de trigo | 77 |
| Figura 46. Perfil de velocidad del husillo para harina de maíz con $\theta=90^\circ$ | 78 |
| Figura 47. Perfil de velocidad del husillo para harina de trigo con $\theta=90^\circ$ | 78 |
| Figura 48. Esfuerzo de cizalla frente a velocidad de cizalla para harina de maíz | 79 |
| Figura 49. Esfuerzo de cizalla frente a velocidad de cizalla para harina de trigo | 80 |
| Figura 50. Recta característica de la boquilla circular sencilla para harina de maíz | 81 |
| Figura 51. Recta característica de la boquilla circular sencilla para harina de trigo | 82 |
| Figura 52. Localización de la cuchilla del extrusor monohusillo Meelko | 83 |
| Figura 53. Recta operativa para harina de maíz modificada a la mitad de D | 99 |
| Figura 54. Recta operativa para harina de maíz modificada al doble de D | 99 |
| Figura 55. Recta operativa para harina de trigo modificada a la mitad de D | 99 |
| Figura 56. Recta operativa para harina de trigo modificada al doble de D | 100 |
| Figura 57. Recta operativa para harina de maíz modificada a la mitad de h | 100 |
| Figura 58. Recta operativa para harina de maíz modificada al doble de h | 100 |
| Figura 59. Recta operativa para harina de trigo modificada a la mitad de h | 101 |
| Figura 60. Recta operativa para harina de trigo modificada al doble de h | 101 |
| Figura 61. Recta operativa para harina de maíz modificada a la mitad de N | 101 |
| Figura 62. Recta operativa para harina de maíz modificada al doble de N | 102 |
| Figura 63. Recta operativa para harina de trigo modificada a la mitad de N | 102 |
| Figura 64. Recta operativa para harina de trigo modificada al doble de N | 102 |
| Figura 65. Recta operativa para harina de maíz modificada a la mitad de L | 103 |
| Figura 66. Recta operativa para harina de maíz modificada al doble de L | 103 |
| Figura 67. Recta operativa para harina de trigo modificada a la mitad de L | 103 |
| Figura 68. Recta operativa para harina de trigo modificada al doble de L | 104 |
| Figura 69. Recta operativa para harina de maíz modificada a la mitad de θ | 104 |
| Figura 70. Recta operativa para harina de maíz modificada al doble de θ | 104 |
| Figura 71. Recta operativa para harina de trigo modificada a la mitad de θ | 105 |
| Figura 72. Recta operativa para harina de trigo modificada al doble de θ | 105 |

Índice de Tablas.

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Formulación de alimento para peces..... | 12 |
| Tabla 2. Tipos de maíz..... | 16 |
| Tabla 3. Tipos de trigo..... | 18 |
| Tabla 4. Contenido de proteínas presentes en la cebada..... | 21 |
| Tabla 5. Tipos de cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)..... | 22 |
| Tabla 6. Vitaminas hidrosolubles y liposolubles requeridas por los peces..... | 37 |
| Tabla 7. Macroelementos y microelementos minerales esenciales para peces.... | 38 |
| Tabla 8. Comparación de formulaciones de alimento para peces..... | 43 |
| Tabla 9. Reactivos empleados en el procedimiento experimental..... | 48 |
| Tabla 10. Especificaciones físicas y químicas de la harina de maíz..... | 51 |
| Tabla 11. Especificaciones físicas y químicas de la harina de trigo..... | 52 |
| Tabla 12. Especificaciones físicas y químicas del salvado de trigo..... | 52 |
| Tabla 13. Especificaciones físicas y químicas de la harina de cebada..... | 52 |
| Tabla 14. Especificaciones fisicoquímicas de la torta de soya..... | 53 |
| Tabla 15. Propiedades químicas de la harina de alfalfa..... | 53 |
| Tabla 16. Especificaciones de la harina de pescado con solubles..... | 53 |
| Tabla 17. Precio y lugar de procedencia de las materias primas..... | 63 |
| Tabla 18. Materias primas, ordenadas de mayor a menor proporción..... | 63 |
| Tabla 19. % HR, % HA y a_w de los ingredientes para alimento para peces..... | 64 |
| Tabla 20. Porcentaje en base seca de celulosa y lignina en las materias primas. | 65 |
| Tabla 21. Porcentaje en base seca de fibra en las materias primas para el alimento expandido para peces..... | 66 |
| Tabla 22. Concentración de hemicelulosa, obtenida por la resta de los detergentes neutro y ácido..... | 67 |
| Tabla 23. Concentración obtenida y concentración en la literatura de proteína en las materias primas..... | 68 |
| Tabla 24. Flujo másico de la tolva del extrusor monohusillo..... | 69 |
| Tabla 25. Flujo volumétrico de la tolva del extrusor monohusillo..... | 70 |
| Tabla 26. Mediciones del husillo en la zona de compresión..... | 70 |
| Tabla 27. Resultados del ΔP y Q para harina de maíz..... | 71 |
| Tabla 28. Resultados del ΔP y Q para harina de trigo..... | 71 |
| Tabla 29. Modificaciones diámetro del husillo al doble y a la mitad..... | 72 |
| Tabla 30. Modificaciones profundidad del canal al doble y a la mitad..... | 72 |
| Tabla 31. Modificaciones número de revoluciones a las que gira el husillo al doble y a la mitad..... | 73 |
| Tabla 32. Modificaciones longitud del cilindro al doble y a la mitad..... | 73 |
| Tabla 33. Modificaciones ángulo al doble y a la mitad..... | 74 |
| Tabla 34. Resultados velocidades de rotación del husillo para harina de maíz.... | 75 |
| Tabla 35. Resultados velocidades de rotación del husillo para harina de trigo.... | 76 |

| | |
|--|----|
| <i>Tabla 36. Resultados σ y τ para harina de maíz</i> | 79 |
| <i>Tabla 37. Resultados σ y τ para harina de trigo</i> | 80 |
| <i>Tabla 38. Resultados ΔP y Q para harina de maíz</i> | 81 |
| <i>Tabla 39. Resultados ΔP y Q para harina de trigo</i> | 81 |
| <i>Tabla 40. Valores de ΔP obtenidos en recta operativa y recta característica de la boquilla circular sencilla</i> | 82 |

1. Introducción.

En este trabajo se aborda la determinación de los perfiles teóricos de presión y velocidad en la zona de dosificación y en la boquilla, para un extrusor monohusillo Meelko y la caracterización proximal de una formulación de alimento para peces.

El proceso de extrusión se refiere a cualquier operación de transformación, donde un material fundido es forzado a atravesar una boquilla para generar productos con una sección transversal constante y de longitud programable. Existen muchos materiales que se procesan mediante la extrusión, tal es el caso de los plásticos, metales, cerámicos y alimentos. El material que pasa por el proceso de extrusión se transforma, dando origen a cambios fisicoquímicos debido a la tensión mecánica de los husillos y la temperatura del barril (Beltrán, 2012, Emin, 2016).

El desarrollo de los extrusores data de 1797, cuando Joseph Bramah, en Inglaterra, aplicó por primera vez el principio de la extrusión con una prensa de pistón operada manualmente, para extruir tuberías de plomo de una pieza, ilustrado en la Figura 1.

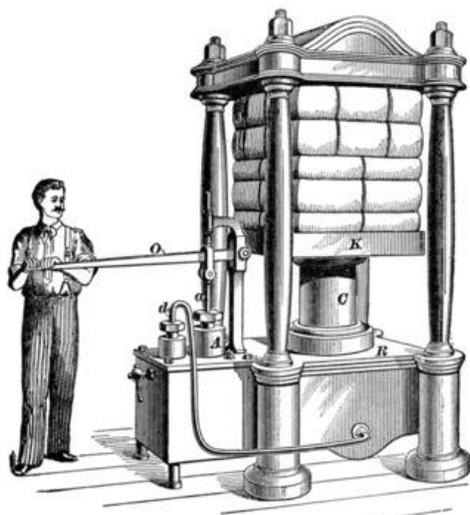


Figura 1. Joseph Bramah con prensa de pistón manual (MUIB, 2016)

En 1960, los extrusores simples se desarrollaron en Estados Unidos para la cocción de semillas de soya y piensos en las granjas, teniendo como objetivo la inhibición por calor del factor anticrecimiento del inhibidor de tripsina. Para 1970, los extrusores de doble husillo para alimentos se introdujeron, ampliando el alcance de la elaboración de productos alimentarios, adaptándose en la utilización de proyectos de intervención en nutrición en muchos países subdesarrollados.

Existe una clasificación basada en la configuración de los husillos del extrusor: de husillo simple y doble husillo, ilustrado en la Figura 2 (Bauser, 2006, Riaz, 2004).

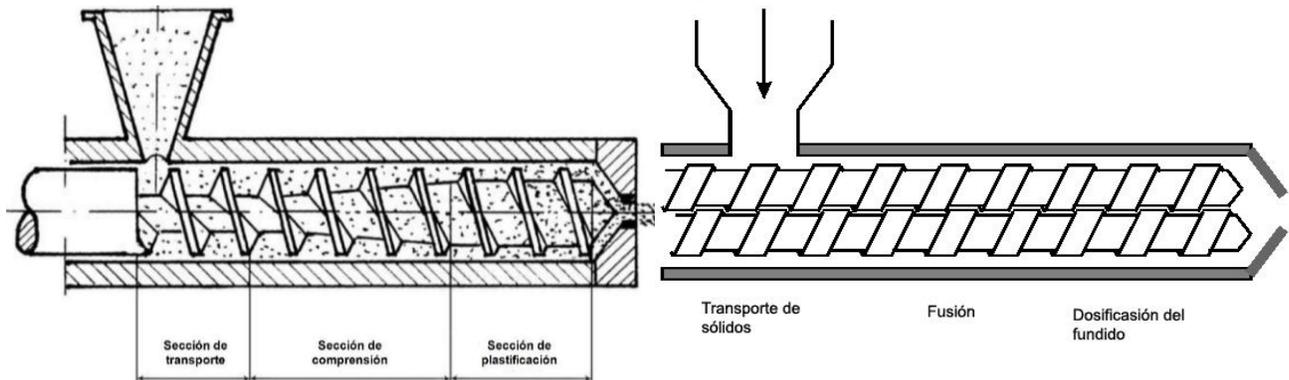


Figura 2. Extrusor de husillo simple y doble husillo (Moscicki, 2011)

El extrusor Meelko, considerado en este trabajo, es de husillo simple, el cual se emplea para cocer, moldear, mezclar y texturizar productos alimentarios (Beltrán, 2012).

De acuerdo a la clasificación de extrusores monohusillo, basada en la amplitud del cizallamiento, el extrusor Meelko es un extrusor de cocción de alto cizallamiento, diseñado para minimizar el tiempo que los materiales permanecen a la máxima temperatura como aparatos de alta temperatura por un corto tiempo (HT/ST) (Emin, 2016).

Tomando en cuenta la operación de un extrusor monohusillo, se clasifica en extrusión en caliente o termoplástica y extrusión en frío:

- La extrusión en caliente o termoplástica, se lleva a cabo a temperaturas mayores a 100°C, por lo que se da una combinación de calor y esfuerzos mecánicos, las cuales propician en las materias primas con alto contenido proteico y de almidón, la gelatinización y dextrinización de los gránulos de almidón, la desnaturalización de proteínas, la inactivación de enzimas y la destrucción de microorganismos (Conca, 2019).
- La extrusión en frío se utiliza para mezclar y dar forma, se presenta una baja presión, la cual genera una temperatura menor a 100°C en el interior del cilindro.

De acuerdo a la clasificación anterior, el extrusor Meelko opera en frío, debido a que las fuerzas de cizalla generan el calor suficiente para inducir la fusión del material dentro del extrusor (Fellows, 2017).

Los extrusores para alimentos se clasifican termodinámicamente, por la presión que generan o por las características de funcionalidad de las materias primas, los cuales se ilustran en la Figura 3 (Ojokoh, 2015):

- Isotérmico, el cual mantiene la temperatura constante a lo largo del equipo.
- Autógeno (adiabático), desarrolla esencialmente todo el calor por fricción, libera agua, gelatiniza y opera a niveles bajos de humedad (8-14%) (Riaz, 2004).
- Politrópico, el cual trabaja entre las condiciones de los isotérmicos y autógenos, clasificándose de acuerdo a la presión que generan; el calor generado proviene de la disipación de la energía mecánica y fuentes auxiliares.

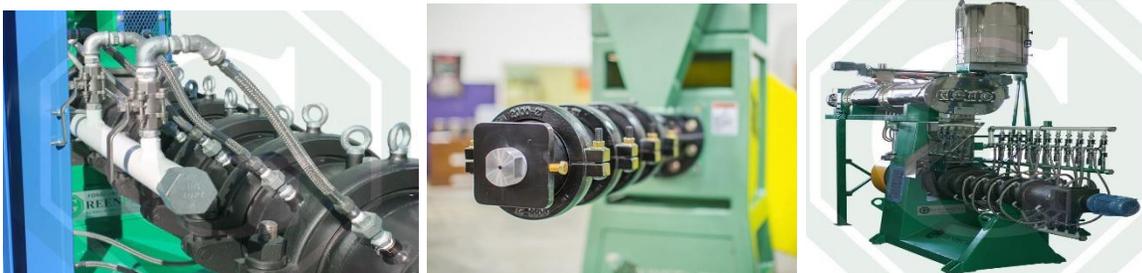


Figura 3. Extrusor isotérmico, autógeno y politrópico (Engormix, 2017)

De acuerdo a esta clasificación, el extrusor Meelko es considerado autógeno.

1.1 Partes del extrusor monohusillo

El extrusor Meelko es de husillo simple, ilustrado en la Figura 4, el cual dispone de un sistema de alimentación del material (tolva y garganta de alimentación), un sistema de fusión-plastificación, un sistema de bombeo y presurización (husillo y cilindro), que generará el efecto de mezclado, y un dispositivo para conformar el material fundido (cabezal y boquilla).

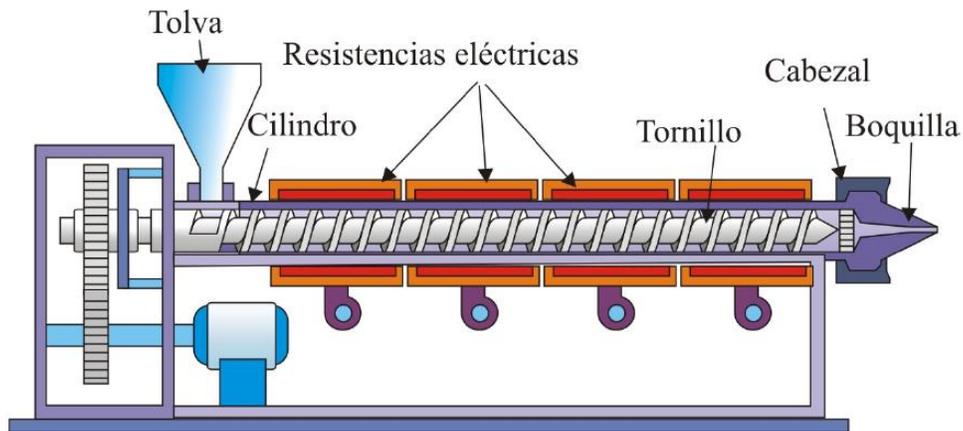


Figura 4. Representación de extrusor monohusillo Meelko (Beltrán, 2012)

Los componentes del extrusor son los siguientes:

1.1.1 Tolva

Contenedor que se utiliza para introducir el material en el extrusor. Debe estar bien ensamblada a la garganta de alimentación y a la boquilla de entrada. Existen 2 tipos de tolvas, como se ilustra en la Figura 5, de sección circular y de sección rectangular; la de sección circular ejerce una compresión gradual sobre el material, proporcionando un mejor flujo del mismo, mientras que la de sección rectangular, tendrá compresiones poco uniformes, lo que provoca que el material se estanque; se diseñan con un volumen suficiente para mantener el proceso de extrusión durante 2 h.

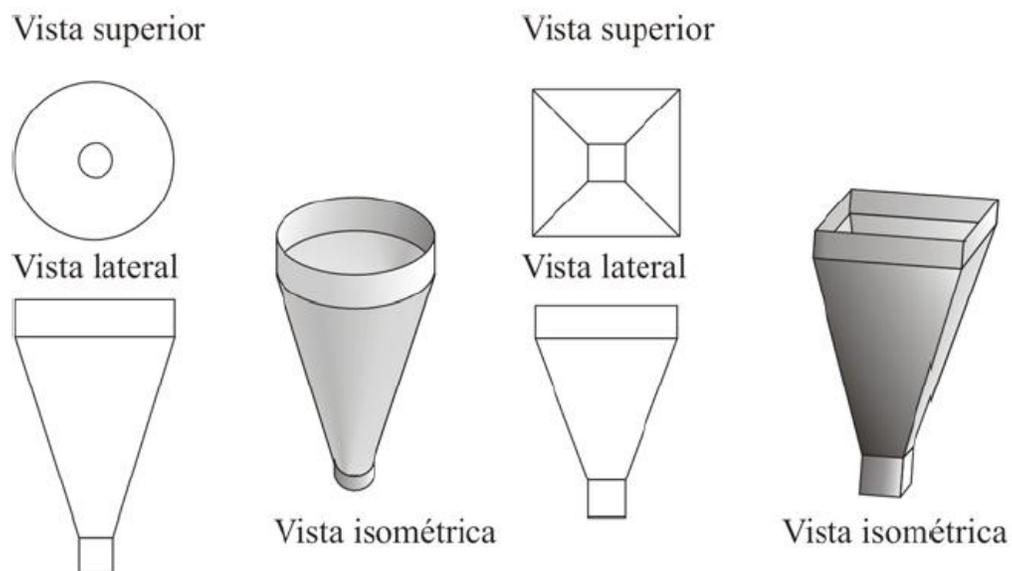


Figura 5. Tolva de sección circular y de sección rectangular (Beltrán, 2012)

1.1.2 Cilindro

El cilindro alberga al husillo en su interior, como se ilustra en la Figura 6, desde la sección de alimentación hasta la sección dosificadora. La superficie del cilindro debe ser rugosa, para aumentar las fuerzas de cizalla en el material y lograr que éste fluya a lo largo del mismo.

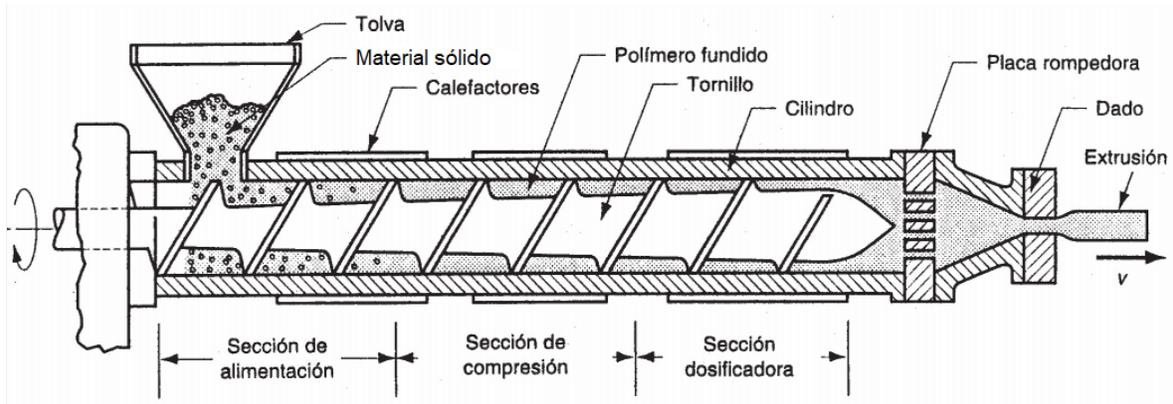


Figura 6. Secciones del cilindro (Flores, 2020)

El cilindro tiene un sistema de transferencia de calor, por medio de resistencias eléctricas circulares, denominadas calefactores, o mediante radiación o encamisado con fluidos refrigerantes; esto con el objetivo de conseguir un gradiente de temperatura razonable desde la tolva hasta la boquilla.

Se debe tomar en cuenta que los sensores de control de temperatura se encuentran en el cilindro, por lo que el material estará siempre a una temperatura más elevada a la que se indica en el control.

1.1.3 Garganta de alimentación

La garganta de alimentación se encuentra en la sección de alimentación del cilindro, situada debajo de la tolva; puede tener un sistema de refrigeración para mantener la temperatura lo suficientemente baja, para que las partículas del material no se adhieran a las paredes internas del extrusor.

Está conectada con la tolva a través de la boquilla de alimentación, la cual tiene regularmente una longitud de 1.5 veces el diámetro y una anchura de 0.7 veces del cilindro, como se muestra en la Figura 7, además de tener desplazado el eje del husillo para facilitar la caída del material de la tolva a la garganta de alimentación.

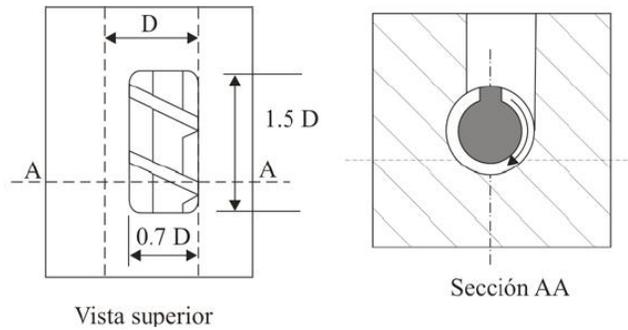


Figura 7. Vista superior y sección AA de la garganta de alimentación (Beltrán, 2012)

1.1.4 Tornillo / Husillo

El husillo consiste de un cilindro largo, rodeado por un filete helicoidal, como se ilustra en la Figura 8, donde los parámetros más importantes para su diseño son la longitud (L), el diámetro (D), el ángulo del filete (θ) y el ancho del canal (w). El husillo es una de las partes más importantes del extrusor, debido a que contribuye en el transporte, calentamiento, fundido y mezclado, además de que a partir de éste, se obtiene la estabilidad del proceso y la calidad del producto terminado.

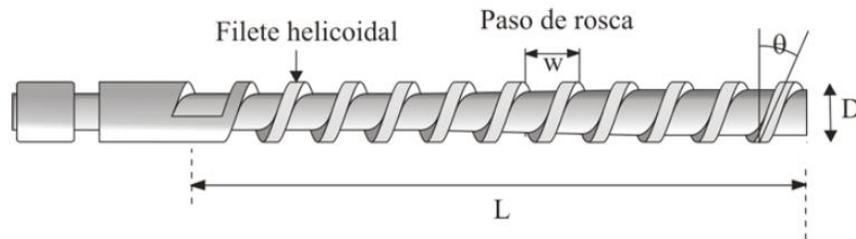


Figura 8. Husillo de extrusor monohusillo (Beltrán, 2012)

El material se va presurizando a medida que avanza por el husillo, comenzando con presión atmosférica en la tolva y aumentando hasta la salida de la boquilla. El husillo del extrusor se divide en 3 partes principales, tomadas en cuenta a partir de la evolución de la presión a lo largo del mismo, como se ilustra en la Figura 9. La zona de alimentación es la más cercana a la tolva, donde la profundidad del canal del husillo es máxima; esta zona tiene como objetivo compactar el material en forma sólida densa y transportarlo a la siguiente zona a una velocidad adecuada. En la zona de transición, la profundidad del canal disminuye gradualmente, conforme se compacta el material sólido, el aire del material sale por la zona de alimentación, y se funde. La zona de dosificado se sitúa en la parte más cercana a la boquilla y

tiene una profundidad de canal muy pequeña y constante; en esta zona el material fundido es homogeneizado y presurizado para forzarlo a atravesar la boquilla de conformado. Normalmente, el extrusor puede operar de 10-500 rpm y proporcionar caudales de hasta 2,000 kg/h, dependiendo el tamaño de la tolva; el extrusor Meelko opera a 500 rpm, con un caudal de 30-40 kg/h (Beltrán, 2012).

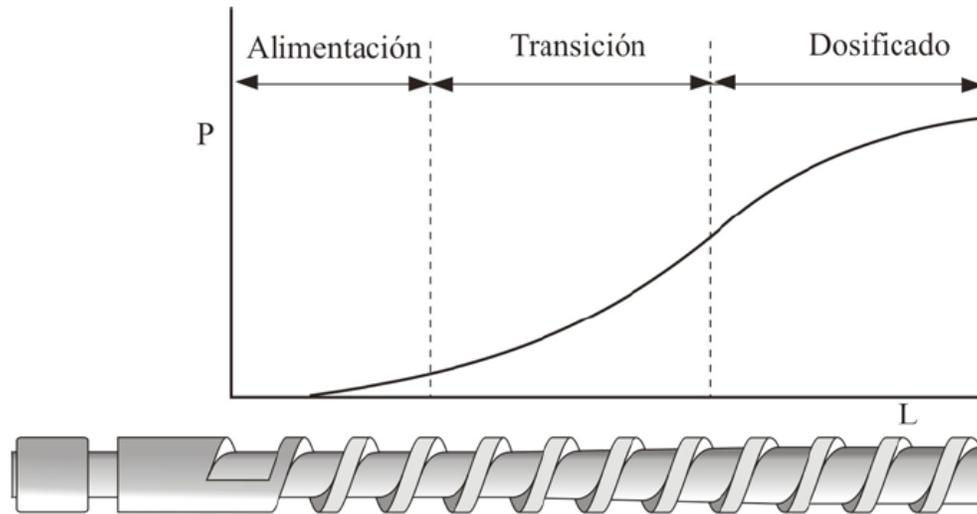


Figura 9. Zonas del husillo y evolución de la presión (Beltrán, 2012)

El cambio de la profundidad y el grado de inclinación del álave del husillo, permite conseguir alta compresión, alta temperatura y varios grados de inflado, debido a que el calor y la presión provocan que el material fluya durante el procesado, denominado extrusión termoplástica (Riaz, 2004).

1.1.5 Cabezal y boquilla/dado

El cabezal se encuentra unido a la sección de dosificado del cilindro, por medio de una brida, sujetando a la boquilla o dado, como se muestra en la Figura 4. El perfil interno del cabezal debe facilitar el flujo del material hacia la boquilla.

La función de la boquilla es de moldear el polímero fundido y en el diseño de la misma se debe tener en cuenta el material a utilizar, considerar radios amplios en las esquinas y evitar canales estrechos y profundos.

1.2 Funciones del extrusor monohusillo

Las funciones del extrusor monohusillo son: el transporte de sólidos, fusión, transporte del fundido y conformado.

1.2.1 Transporte de sólidos (zona de alimentación)

El material sólido que alimenta al extrusor se transporta en las regiones de la tolva de alimentación y en el cilindro.

Transporte de sólidos en la tolva de alimentación

El transporte de sólidos en la tolva es un flujo por gravedad hacia la parte inferior, donde influyen el diseño de la misma y las características del material.

En una tolva de sección circular, en condiciones normales, sucede un flujo en masa, como se ilustra en la Figura 10, donde no hay regiones estancadas debido a la compresión gradual del material, y en una tolva de sección rectangular ocurre un flujo de embudo, donde el material cercano a la pared se va quedando estancado, dando origen a la formación de un puente o arco.

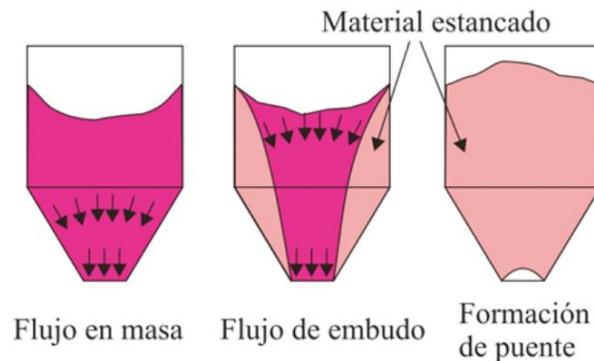


Figura 10. Flujo del material en la tolva de alimentación (Beltrán, 2012)

Para tener un flujo de tolva adecuado, se debe tomar en cuenta el coeficiente de fricción interno del material (fricción entre partículas) y el coeficiente de fricción externo (fricción entre el material y la superficie interna del cilindro), los cuales se esperan sean bajos en la extrusión.

Además de las dimensiones de la tolva, la densidad aparente del material afecta el flujo, siendo la densidad del material incluyendo el aire entre sus partículas; para la extrusión, los materiales más fáciles de manipular presentan una densidad aparente del 60 %. También la compresibilidad del material afecta el flujo de la tolva (aumento en la densidad aparente al presionarlo), buscándose materias primas con factores de compresibilidad bajos, para evitar un gran aumento en la densidad aparente con la presión generada en el extrusor.

Transporte de sólidos en el cilindro

Al caer el material en la garganta de alimentación, el mecanismo de transporte es inducido por arrastre, teniendo lugar en la zona de alimentación del husillo.

Existen dos fuerzas de fricción: una en la superficie del cilindro, que genera el movimiento de la masa sólida hacia la salida del extrusor, y otra en la superficie del husillo, siendo la fuerza retardante. Con una fuerza de fricción en la superficie del cilindro igual a cero y una fuerza de fricción en la superficie del husillo alta, la masa sólida rotaría con el husillo sin moverse hacia adelante.

Se puede mejorar el transporte de sólidos aumentando el coeficiente de fricción del material con el cilindro, al disminuir la temperatura del mismo o de la garganta de alimentación, así como el uso cilindros estriados.

1.2.2 Fusión (zona de transición)

En la zona de transición del cilindro, se forma una película fina de polímero fundido, hasta que el espesor se iguala con la holgura (δ), generando un gradiente de velocidad entre la capa sólida y la superficie del cilindro; esto se provoca principalmente por la disipación viscosa, favorecida al aumentar la velocidad del husillo, y en menor medida, por la conducción de calor en la superficie del cilindro.

Al aumentar la velocidad del husillo, el flujo de calor por disipación viscosa aumenta, disminuyendo el tiempo de residencia del material en el extrusor. Al aumentar la temperatura del cilindro, aumentará el flujo de calor por conducción y la velocidad de fusión, disminuyendo la viscosidad del material y aumentando la generación de calor por disipación viscosa.

Además de las condiciones de operación, la configuración del husillo afecta la velocidad y la longitud de la fusión, tal es el caso del ángulo del filete, ya que al aumentar el ángulo del filete, disminuye la longitud de fusión, presentando ángulos ideales de 20° a 30° (a 90° se da la eficiencia máxima, pero el material no avanzaría); también se ve afectado por el número de filetes en el husillo, ya que cuando el filete es múltiple, la capa del fundido es más delgada; por otra parte, la

holgura entre el filete del husillo y el canal debe ser lo menor posible para favorecer la fusión del material.

El polímero fundido comenzará a reunirse en un pozo, situado delante del filete que avanza en la parte posterior del canal, ilustrado en la Figura 11, y conforme se acumule polímero fundido en el pozo, irá disminuyendo el ancho de la capa sólida.

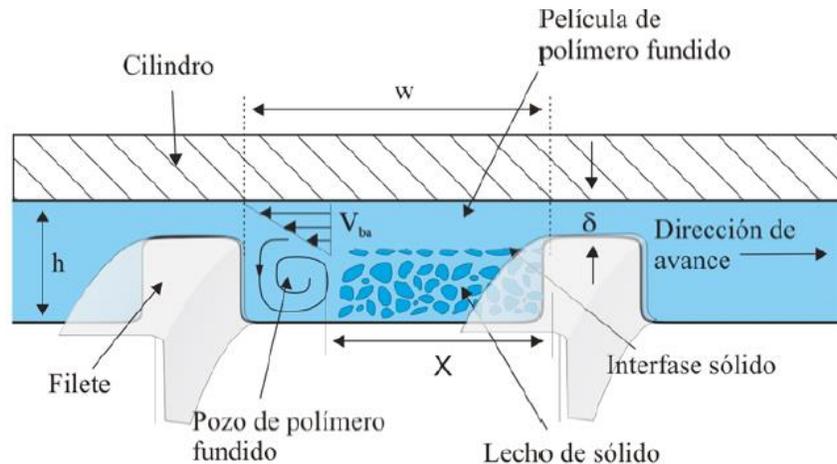


Figura 11. Pozo de polímero fundido en la zona de transición (Beltrán, 2012)

1.2.3 Transporte del fundido (zona de dosificado)

En esta zona, la profundidad del canal del husillo es uniforme, y el movimiento del fundido se produce por el giro del husillo y su configuración helicoidal.

El movimiento del material viscoso en el husillo, se resume en tres tipos de flujo:

Flujo de arrastre o fricción (Q_D)

El flujo es debido a la fricción del material con el husillo y con las paredes del cilindro, siendo el principal responsable del movimiento del material desde la tolva de alimentación hasta la boquilla, originando un flujo lineal, ilustrado en la Figura 12.

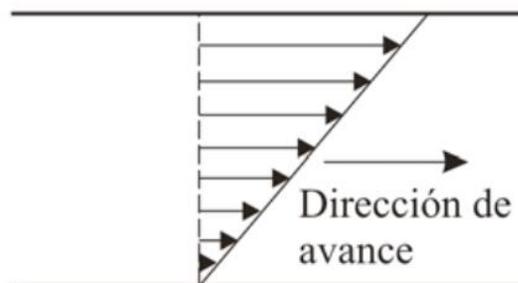


Figura 12. Perfil de velocidad originado por el flujo de arrastre (Beltrán, 2012)

Flujo de presión o retroceso (Q_P)

Es opuesto al flujo de arrastre y se produce debido a la diferencia de presión entre la tolva y el cabezal, producida por la restricción que impone la boquilla. La presión es mayor en el lado de la boquilla; este gradiente produce que el material fluya en retroceso, obteniendo un perfil de velocidad parabólico, ilustrado en la Figura 13.

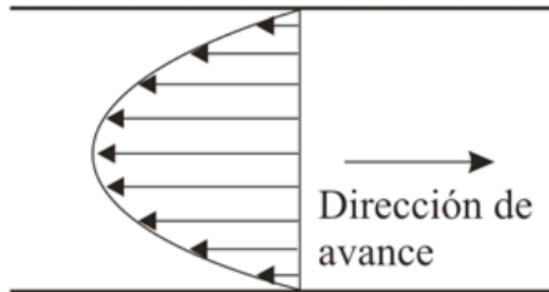


Figura 13. Perfil de velocidad originado por el flujo de presión (Beltrán, 2012)

Flujo de pérdida o de fugas

Tiene lugar entre el cilindro y el filete del husillo, es opuesto al flujo de arrastre y es originado por el gradiente de presión a lo largo del husillo.

El flujo total en el husillo, se representa como: $Q_{Total} = Q_D + Q_P + Q_{Pérdida}$, resultado del flujo de avance y del flujo de presión, debido a que el flujo de pérdida es despreciable; obteniendo el perfil de velocidad al sumarse, ilustrado en la Figura 14.

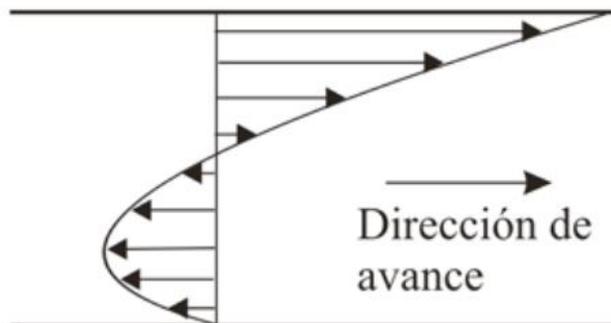


Figura 14. Perfil de velocidad del flujo total (Beltrán, 2012)

1.2.4 Conformado (cabezal)

El material toma el tamaño y la forma de la boquilla conforme sale por medio de ésta, importando que el flujo del material sea constante. El factor principal que provoca los cambios en el material es la relajación, ya que el material al haberse sometido a grandes deformaciones y tensiones dentro del extrusor, y tomando en

cuenta su naturaleza viscoelástica, al enfriarse rápidamente se relaja, lo que puede provocar hinchamiento del mismo.

1.3 Materias primas de la formulación de alimento para peces

A partir de la formulación de alimento para peces proporcionada por el proveedor Meelko, se tomaron en cuenta las materias primas a 1/25 de Ton para su adquisición, como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Formulación de alimento para peces

| Ingrediente | Masa por Ton (kg) | Masa por $\frac{1}{25}$ Ton (kg) * |
|---------------------|--------------------------|--|
| Harina de maíz | 270 | 10.8 |
| Harina de pescado | 160 | 6.4 |
| Harina de trigo | 110 | 4.4 |
| Harina de malta | 100 | 4.0 |
| Torta de soya | 100 | 4.0 |
| Salvado de trigo | 100 | 4.0 |
| Harina de cebada | 60 | 2.4 |
| Aceite de palma | 30 | 1.2 |
| Harina de alfalfa | 30 | 1.2 |
| Fosfato monocálcico | 20 | 0.8 |
| Vitaminas | 10 | 0.4 |
| Minerales | 10 | 0.4 |

1.3.1 Cereales

Las materias primas de la formulación de alimento para peces que pertenecen al grupo de los cereales son: la harina de maíz, la harina de trigo, la harina de malta, el salvado de trigo y la harina de cebada. Los cereales están compuestos de carbohidratos, proteínas, lípidos, vitaminas y sales minerales, son clasificados como alimentos amiláceos, conteniendo más de 60 % de almidón (Serna, 2013).

El almidón se compone de dos tipos de cadenas de glucosa, la amilosa (25 % aproximadamente), la cual es una cadena lineal de glucosa unidas mediante enlaces $\alpha(1 \rightarrow 4)$, y la amilopectina (75 % aproximadamente), siendo ésta una cadena ramificada de glucosa unidas mediante enlaces $\alpha(1 \rightarrow 4)$ y $\alpha(1 \rightarrow 6)$, como se muestra en la Figura 15.

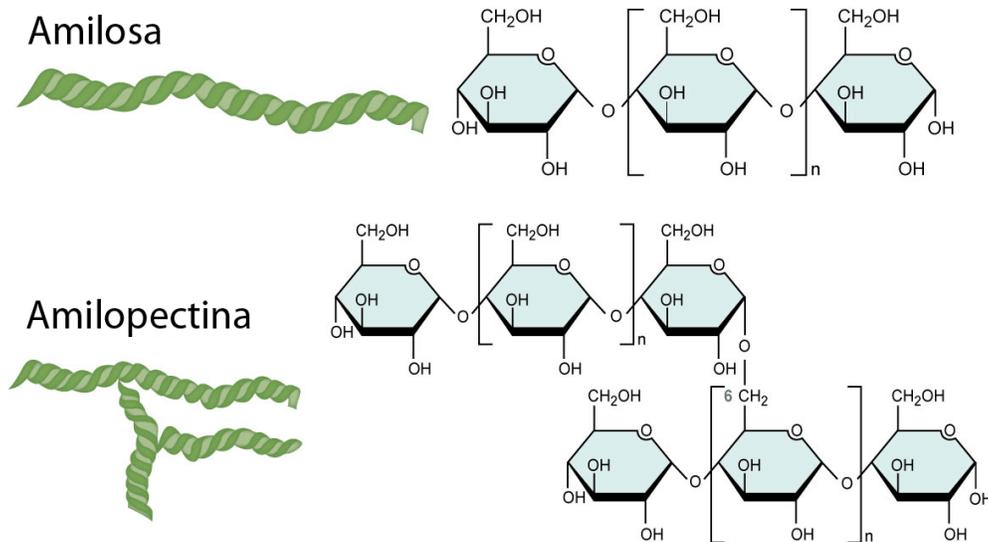


Figura 15. Estructura química del almidón (Birt, 2013)

Los cereales maduros contienen aproximadamente 2 % de monosacáridos, disacáridos y oligosacáridos; estos azúcares se encuentran en el germen principalmente, siendo los principales azúcares solubles la maltosa, glucosa, maltotriosa y dextrinas lineales y ramificadas (Plaza, 2013).

Los segundos componentes químicos de importancia en los cereales son las fracciones de proteína distribuidas en diferentes partes del grano; en el endospermo del trigo y cebada, se encuentra el gluten conformado por gliadina y glutenina, en el germen están las albúminas y globulinas. En otros granos, como el maíz, la mayor cantidad de proteína se encuentra en el germen (42.5 %) y la menor cantidad se encuentra en el pericarpio (3 %) (Gil, 2010).

Las proteínas se pueden clasificar con base en su solubilidad y funcionalidad, desarrollado por Osborne (1924), la cual consiste en una serie de extracciones consecutivas, clasificándose en (Wrigley, 2015):

- Albúminas: extraíbles en agua, son proteínas no del gluten (monoméricas) y su papel biológico es ser proteínas estructurales y metabólicas.
- Globulinas: extraíbles en solución de sal diluida, son proteínas no del gluten y su papel biológico es ser proteínas estructurales y metabólicas.

- Gliadinas: extraíbles en solución de alcohol, son proteínas del gluten y su papel biológico es ser proteínas de almacenamiento; aportan viscosidad y extensibilidad.
- Gluteninas: extraíbles en ácido acético diluido, son proteínas del gluten y su papel biológico es ser proteínas de almacenamiento; aportan elasticidad a la masa y tenacidad.

Las proteínas tienen alta tasa de digestibilidad, en los cereales se comprende del 99.7 %, específicamente para el trigo y el maíz del 95 %, sin embargo, en general, son deficientes del aminoácido limitante lisina, seguido de triptófano. Los cereales también son conocidos por ser ricos en ácido aspártico y ácido glutámico, así como por la presencia de asparagina, glutamina, prolina y leucina (Wrigley, 2015).

Los cereales contienen pequeñas cantidades de lípidos en el germen, se dividen en polares y no polares; los no polares son los triglicéridos y constituyen más del 95 % de la fracción lipídica, los polares son los fosfolípidos y glucolípidos. El contenido de lípidos en los cereales es importante para los procesos de alimentos, en la vida de anaquel y para mejorar las características sensoriales de los productos elaborados (Kaczmarek, 2015).

Los cereales contienen minerales en la estructura del pericarpio, germen, capa de aleurona y gluma, tales como: calcio (bajo contenido), fósforo (encontrado en todos los cereales, asociado con el ácido fítico, el cual se encuentra en la capa de aleurona), potasio, sodio, magnesio, hierro, cobalto, cobre, manganeso y zinc, los cuales pueden perderse en el proceso de molienda, principalmente del pericarpio; también contienen vitaminas en la capa de aleurona y germen, tales como: tiamina (B1), riboflavina (B2), niacina (B3, 80 % en trigo), piridoxina (B6), ácido pantoténico (B5), biotina (B7), tocoferoles, tocotrienoles, ácido fólico y ácido fítico (Ahmed, 2014, Martínez, 2002).

El contenido de la fibra cruda varía de acuerdo al tipo de cereal. Las glumas, el pericarpio y las paredes celulares son ricos en fibra, en la cebada varía de 5.3 a 5.9 % (Gil, 2010).

Como se indica en la Figura 16, los granos de cereales se subdividen en tres partes: pericarpio (7-10 %), endospermo (82-85 %) y germen (3-10 %), tomando en cuenta

que la proporción varía conforme al tipo de cereal. Algunos cereales, como la cebada, retienen glumas después de la cosecha, denominados granos cubiertos, el resto de los cereales pierden glumas (lema y palea) durante las operaciones de recolección y cosecha, denominados granos desnudos (Wrigley, 2015).

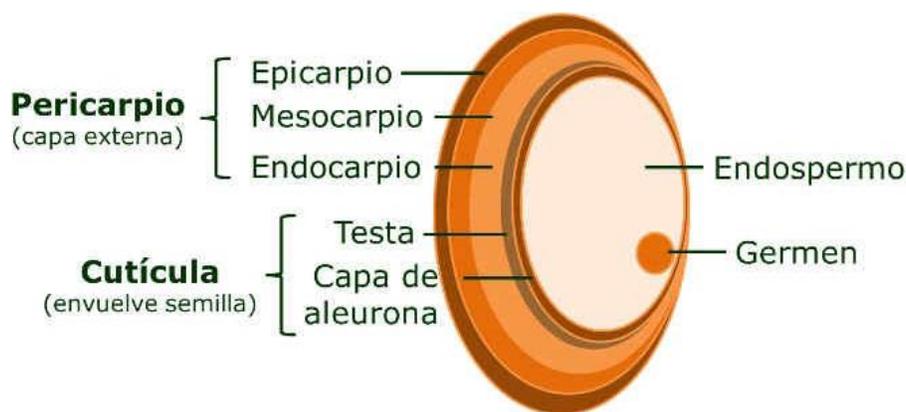


Figura 16. Morfología de los cereales (Wrigley, 2015)

Maíz (harina de maíz)

El maíz (*Zea mays L. ssp mays*) tiene 7000 años de antigüedad, evidencias encontradas en el Valle de Tehuacán, México, ha sido alimento, moneda y religión para el pueblo de México. *Zea mays*, significa “grano que proporciona la vida”, es la planta más domesticada y evolucionada del reino vegetal. El maíz, por su genética, compatibilidad sexual y entrecruzamiento, originó híbridos fértiles, los cuales tienen el más alto potencial para la producción de carbohidratos por unidad de superficie por día (León, 2007).

El fruto de la planta se denomina mazorca, llena de granos aplanados y grandes, colocados en ejes paralelos alrededor de su eje vertical, llamado olote. Los granos de maíz, como se muestra en la Figura 17, son cariósides desnudas, cuyas partes fundamentales son el pericarpio (5-6 %), el endospermo (80-82 %) y el germen (8-12 %), además de estar compuesto de 70-75 % de almidón, 8-10 % de proteína, 4-5 % de lípidos, 1-3 % de azúcar y 1-4 % de cenizas. Los componentes de la harina de maíz son: almidón (7.0 %), agua (11.0 %), proteína (8.0 %), grasa (1.6 %), fibra (4.6 %) y ceniza (0.7 %). La mayor cantidad de proteína se encuentra en el germen (42.5 %) y la menor cantidad se encuentra en el pericarpio (3 %) (Bonavia, 2013, Conca, 2019, FAOSTAT, 2010).

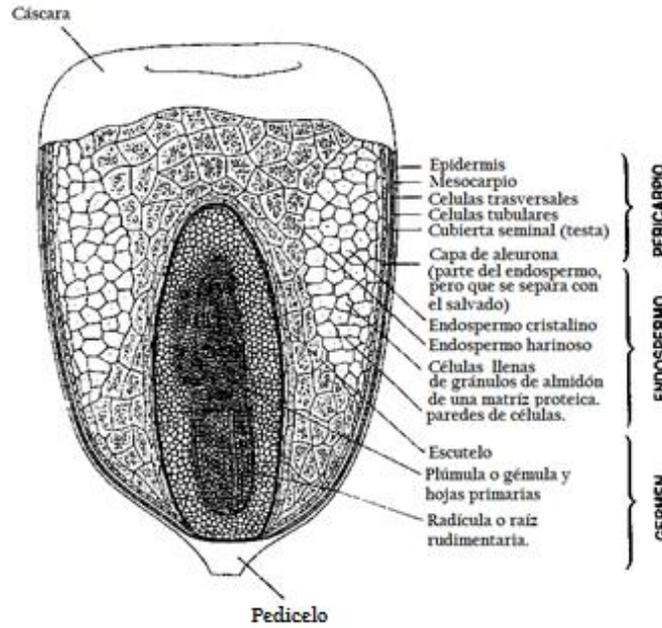


Figura 17. Grano de maíz (Bonavia, 2013)

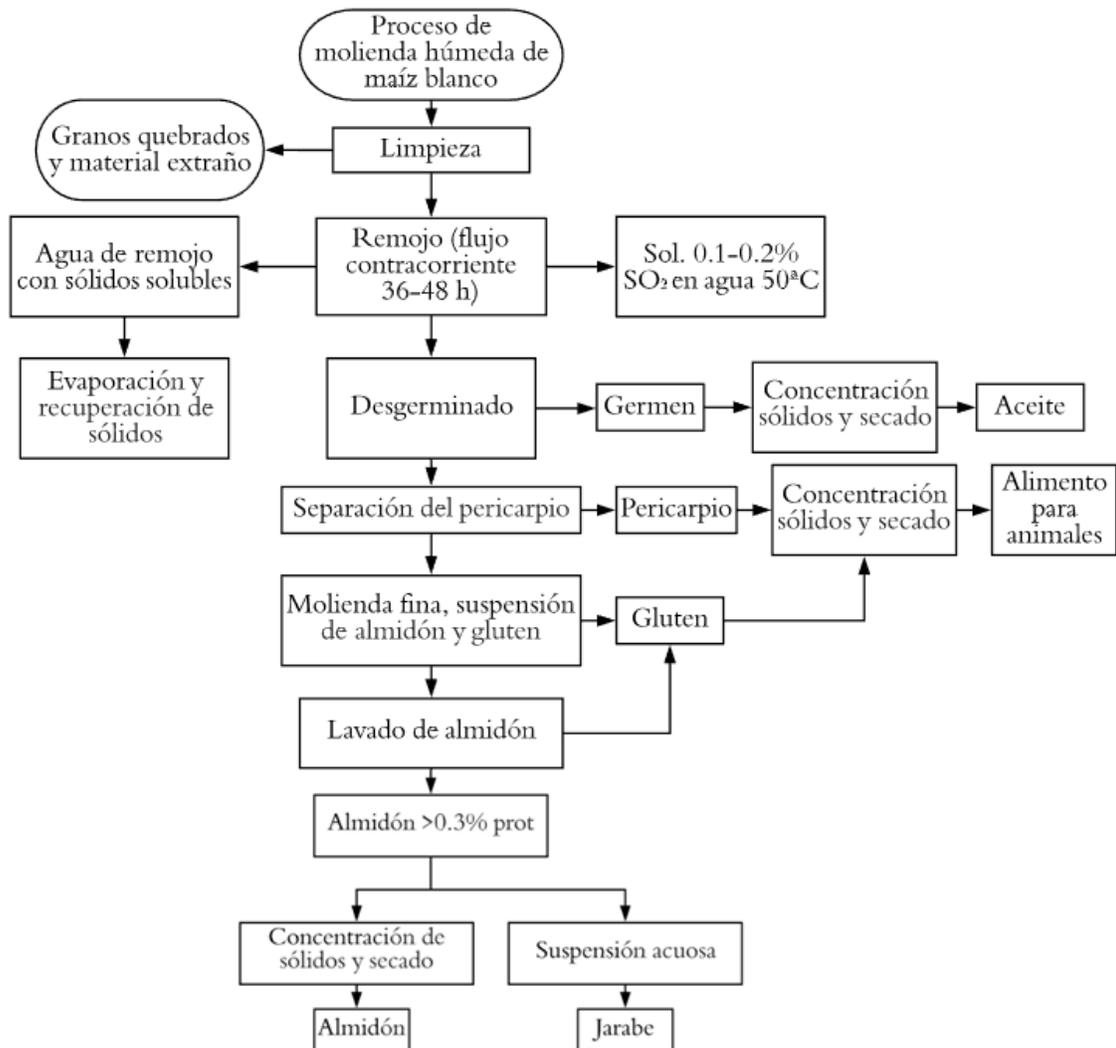
Existen diferentes tipos de maíz, los cuales se enuncian en la Tabla 2. El maíz empleado para la elaboración de la harina de maíz adquirida, es el maíz blanco (Ramos, 2013).

Tabla 2. Tipos de maíz

| Tipo | Características | Uso |
|---------------|--|--|
| Amarillo | Tipo de maíz más producido a nivel mundial | Alimentación animal |
| | Alto contenido de carotenoides en el endospermo | Industria refinadora de almidón |
| Blanco | Bajo contenido de carotenoides en el endospermo | Industria alimentaria productora de harinas, botanas y pan |
| Azul y morado | Endospermo blanco y suave, con alta pigmentación en la aleurona | Botanas y platillos típicos |
| Dentado | Hendidura en corona de la carióspside, endospermo amarillo y suave | Alimentación animal |

El proceso de elaboración de la harina de maíz blanco, empleada para la formulación, se realiza mediante molienda húmeda, como se muestra en el *Diagrama 1*, el objetivo es la separación de los componentes químicos del maíz: almidón, proteína, aceite y fibra (Conca, 2019).

Diagrama 1. Proceso de molienda húmeda de maíz blanco



Trigo (harina y salvado de trigo)

El trigo acontece de hace 6,700 años, en Jarmo, Irak. El trigo, *Triticum* spp., cuyo significado es quebrado, triturado o trillado, hace referencia al proceso que se sigue para separarlo de la cascarilla. Fue introducido a México por los españoles en 1520. Una ventaja de los trigos antiguos es que retienen su cascarilla, protegiendo al grano maduro del ataque de los insectos y se elimina antes del procesamiento del grano. En los granos actuales, esta cascarilla se trilla fácilmente durante la cosecha (Juárez, 2014, Serna, 2013).

Como se muestra en la Figura 18, un grano de trigo contiene 70 % de carbohidratos, 2 % de lípidos, 2 % de minerales, 10 % de humedad y 16 % de proteínas, el

pericarpio representa el 8 %, la aleurona el 7 % y el endospermo el 82.5 %. Los componentes de la harina de trigo son: almidón (70–75 %), agua (14 %) y proteínas (10-12 %), además de polisacáridos (2-3 %), particularmente arabinosilanos, y lípidos (2 %). Los componentes del salvado de trigo son: carbohidratos (64.5 %), agua (9.8 %), fibra (42.8%), proteínas (15.6 %) y lípidos (4.3 %).

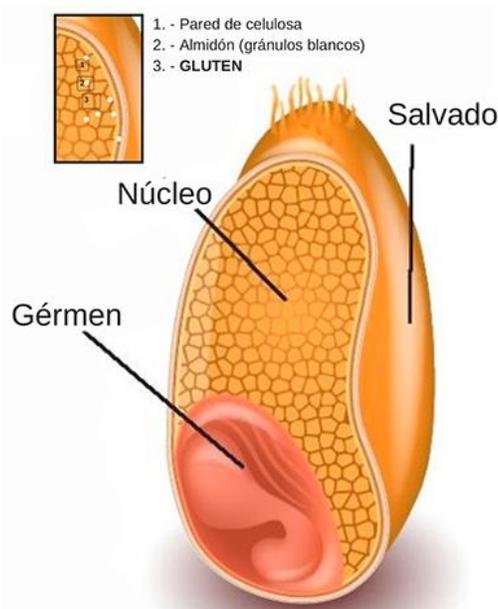


Figura 18. Estructura y composición del trigo (Parada, 2010)

Existen diferentes tipos de trigo, los cuales se enuncian en la Tabla 3. El trigo empleado para la elaboración de la harina y salvado de trigo adquiridos, es el trigo harinero (Hernández, 2011).

Tabla 3. Tipos de trigo

| Tipo | Características | Uso |
|--|---|--|
| Duro o cristalino (<i>Triticum durum</i> L.) | Tipo de grano muy duro, gluten fuerte y muy tenaz (no extensible) | Elaboración de pastas alimenticias |
| | Endospermo con alto contenido de carotenoides (pigmento amarillo) | |
| Harinero (<i>Triticum aestivum</i> L.) | Gluten fuerte, muy elástico y extensible | Elaboración de pan, tortillas, galletas y repostería |

Entre las diferentes clases de trigo, el contenido de proteína es variable de acuerdo con la clase (suave o duro), los trigos suaves contienen bajo contenido de proteína

(8.0 - 12.0 %), por el contrario, el trigo duro contiene más proteína (10.5 - 14 %). (Hettiarachchy, 2012).

Entre los cereales, solo la harina de trigo tiene la capacidad de formar una masa resistente, viscoelástica y cohesiva, capaz de retener gas y producir productos horneados ligeros y aireados, debido a las proteínas presentes; en el endospermo del trigo, el gluten está conformado por gliadina y glutenina, en el germen están las albúminas y globulinas.

El gluten del trigo, como se presenta en la Figura 19, es una proteína, cuyo uso se masificó debido a su capacidad de retener aire en la matriz proteica, facilitando la adherencia. Las proteínas pertenecientes al gluten (80-85 %) tienen un desempeño muy importante en la elaboración del pan. Las proteínas pertenecientes al gluten son: gliadinas (50%) (α -, β -, γ -, ω -), las cuales se dividen en glutamina y prolina; y las gluteninas (50%), las cuales se dividen en HMW (alto peso molecular) y LMW (bajo peso molecular) (Wrigley, 1996).

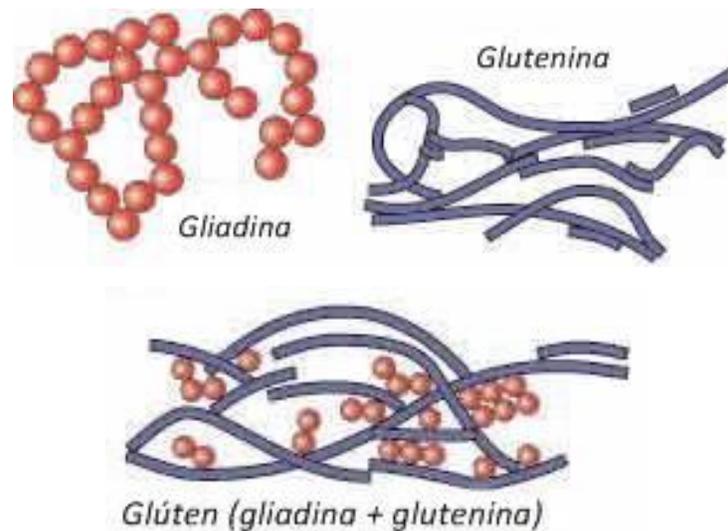
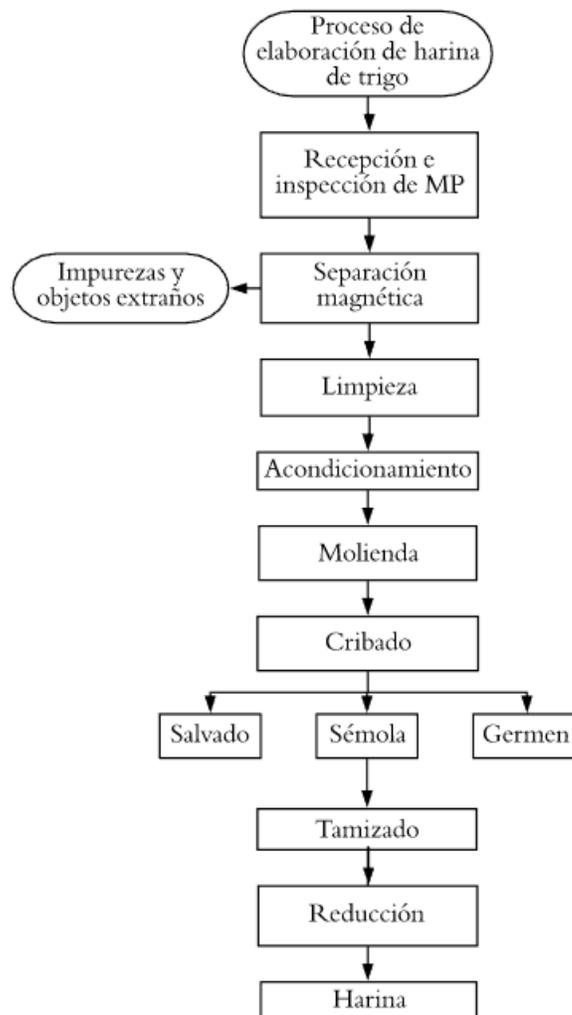


Figura 19. Gluten (Parada, 2010)

En el trigo, cuando la gliadina es hidratada y sometida a una acción mecánica, presenta propiedades de elasticidad y distensión, utilizadas para la elaboración de pan y galletas. Las gluteninas son las principales proteínas estructurales del endospermo, situadas en la matriz proteica y asociadas a las prolaminas (Quilca, 2018).

El proceso de elaboración de la harina y del salvado de trigo se realiza mediante la molienda y se ilustra en el *Diagrama 2*, consistiendo de dos etapas: ruptura y reducción. La molienda se realiza gradualmente, obteniéndose en cada etapa una parte de harina y otra de partículas de mayor tamaño y, entre fases de molienda, el producto molido es cribado y la harina es purificada (Carreira, 2019).

Diagrama 2. Proceso de elaboración de harina y salvado de trigo



Cebada (harina de cebada y harina de malta)

La cebada (*Hordeum vulgare* L.) fue una de las primeras especies en ser cultivadas por el ser humano en el inicio de la agricultura, se dio en dos centros de origen, situados en el sudeste de Asia y África septentrional. En excavaciones arqueológicas realizadas en el valle del Nilo, se descubrieron restos de cebada, en torno a los 15.000 años de antigüedad (Rimache, 2008).

La utilización de dietas a base de cebada con bajo contenido en fitatos, mejora la digestibilidad del fósforo (P) y, en consecuencia, la reducción de la excreción de este elemento, este tipo de cebada está orientada especialmente para el mercado de peces comerciales, como truchas (Htoo, 2007).

Como se muestra en la Figura 20, un grano de cebada contiene 14 % de cascarilla, 5.5 - 6.5 % de cubierta de semilla, 11 - 13 % de capas aleurónicas, 2.5 - 4.0 % de embrión y 65 - 68 % de endospermo amiláceo. Los componentes de la harina de cebada son: carbohidratos (74.5 %), agua (12 %), fibra (10.1 %) y proteínas (10.5 %).

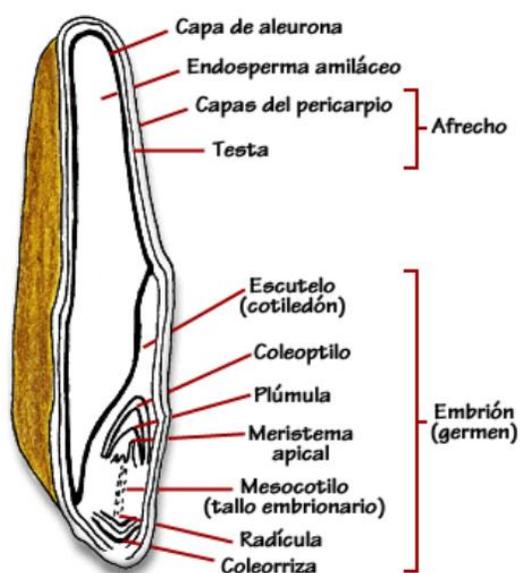


Figura 20. Estructura y composición de la cebada (Serna, 2013)

Un grano de cebada contiene de 12 - 13 % humedad, 65 - 72 % carbohidratos, 10 - 11 % proteínas, 1.5 - 2.5 % grasas, 2.5 - 4.5 % fibras y 2 - 3 % de cenizas, el contenido de proteínas se ilustra en la Tabla 4, de acuerdo a sus propiedades de solubilidad establecidas por Osborne (Callejo, 2002).

Tabla 4. Contenido de proteínas presentes en la cebada

| Proteína | Porcentaje % | Solubilidad |
|----------------------|--------------|---|
| Albúmina (Leucosina) | 3.0 - 4.0 | Agua |
| Globulina (Edestina) | 10.0 - 20.0 | Soluciones salinas diluidas |
| Prolamina (Hordeína) | 33.5 - 45.0 | Soluciones alcohólicas |
| Gluteninas | 35.0 - 45.0 | Soluciones diluidas de ácidos y álcalis |

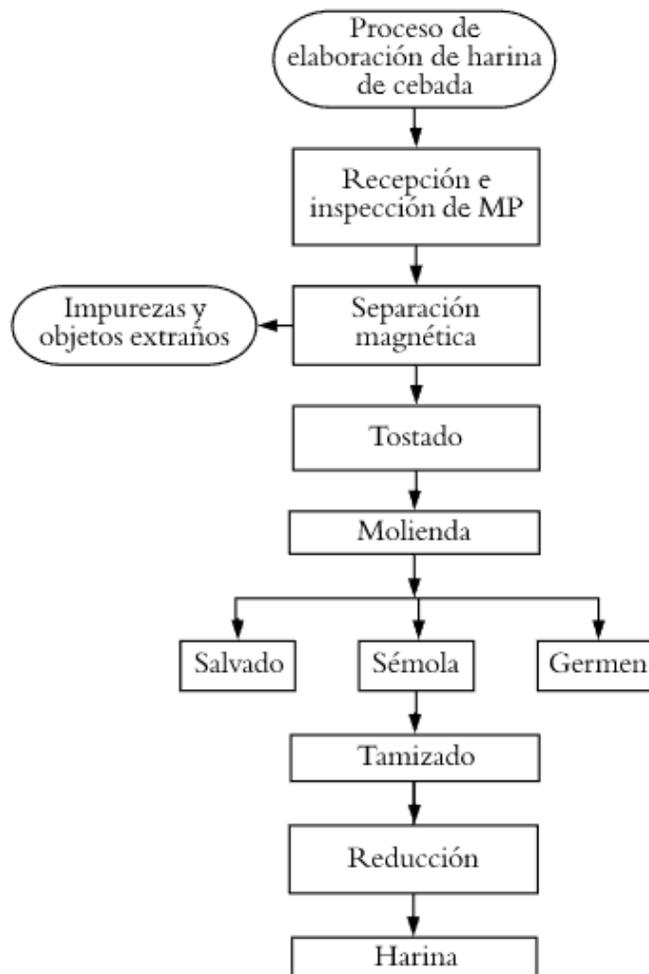
Existen diferentes tipos de cebada, los cuales se ilustran en la Tabla 5. La cebada empleada para la elaboración de la harina de cebada y harina de malta adquiridos, es la cebada de 6 carreras (*Hordeum hexastichum*) (Serna, 2013).

Tabla 5. Tipos de cebada (*Hordeum vulgare*)

| Tipo | Nombre científico | Uso |
|----------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Cebada de 2 carreras | <i>Hordeum distichum</i> | Cebada cervecera |
| Cebada de 6 carreras | <i>Hordeum hexastichum</i> | Forraje para alimentación animal |

El proceso de elaboración de la harina de cebada se realiza mediante molienda del grano de cebada, como se muestra en el *Diagrama 3*, la cual posee poca cantidad de gluten, usada para espesar salsas y en la elaboración de papillas para infantes, además de la elaboración de pan (NOM-247-SSA1-2008).

Diagrama 3. Proceso de elaboración de harina de cebada



El proceso de elaboración de la harina de malta se realiza mediante molienda, obteniendo salvado, germen y sémola, esta última al tamizarse produce harina de malta, como se muestra en el *Diagrama 4*.

Diagrama 4. Proceso de elaboración de harina de malta



1.3.2 Leguminosas

Las materias primas de la formulación de alimento para peces que pertenecen al grupo de las leguminosas son: la torta de soya y la harina de alfalfa. Las leguminosas se caracterizan por su fruto, donde se alojan las semillas, las cuales al secarse se denominan legumbres, principalmente de la subfamilia Papilionáceas. Algunas leguminosas se consumen en verde, como las leguminosas de verdeo, aprovechando el grano tierno (haba) y la vaina (frijoles). En África, Asia y América Latina, las semillas se dejan en la planta para que maduren por completo, para

después cosecharlas y secarlas; en Europa y América del Norte se recolectan más temprano y se consumen parcialmente verdes. Existen entre 16,000 y 19,000 especies de leguminosas, las cuales se dividen en 750 géneros (Latham, 2002, Olmedilla, 2010).

Las leguminosas son un cultivo importante para la agricultura, ya que tienen adaptación a suelos y climas poco favorables, además de que tienen la capacidad de establecer una simbiosis con diversas bacterias del género *Rhizobium*, las cuales son un grupo de bacterias Gram (-) del suelo, que se caracteriza por inducir el desarrollo de órganos fijadores de nitrógeno, llamados nódulos, en las raíces de las leguminosas, como se muestra en la Figura 21. Dicha asociación entre leguminosas y *Rhizobium*, aporta anualmente una cuarta parte del nitrógeno fijado en la biósfera. En las raíces de la planta, la bacteria induce la formación de un nódulo, dentro del cual ésta se establece y es capaz de convertir el N_2 atmosférico en amonio (NH_4^+), constituyendo la fuente de nitrógeno para el crecimiento de la planta (Guasch, 2011, Lara, 2015, SADER, 2016).



Figura 21. Planta de frijol en simbiosis fijadora de nitrógeno con Rhizobium (Lara, 2015)

- *Legumbres*

Las legumbres, semillas secas de las leguminosas, se utilizan para la alimentación animal y humana, son una fuente proteica y de fibra dietética y tienen bajo contenido lipídico. Las fracciones de proteínas más importantes, tomando en cuenta la clasificación de Osborne, son las albúminas, las cuales incluyen moléculas que

poseen propiedades funcionales y enzimas que metabolizan las sustancias almacenadas en la semilla, como las glicosidasas y las proteasas, que tienen el papel de la degradación proteínica durante la germinación; y las globulinas, las cuales participan en la protección de la planta, al igual que los inhibidores de tripsina y las lectinas (Gueguen, 1994).

Las legumbres tienen un contenido importante de almidones (35 - 45 % del peso seco) y fibra dietética (14 – 33 %); el contenido proteico es de 10 a 15%, cuyo aminoácido limitante es la metionina, realizando una complementación proteínica con los cereales, cuyo aminoácido limitante es la lisina. Las legumbres poseen bajo contenido lipídico, constituyendo un grupo heterogéneo, que incluyen ácidos grasos libres, diglicéridos, triglicéridos, fosfolípidos, esteroides, glucolípidos y lipoproteínas (Kan, 2017).

El almidón, la fibra y los oligosacáridos constituyen los componentes principales de carbohidratos presentes en las legumbres, siendo el almidón el polisacárido mayoritario, a excepción de la soya. El almidón está constituido por amilosa y amilopectina y, a diferencia de los cereales, las legumbres poseen predominio en la fracción de amilosa (30 – 40 %), responsable de su baja digestibilidad, debido a que tras la cocción actúa como almidón resistente.

Las legumbres se consideran una fuente de vitaminas hidrosolubles, además de constituir una fuente de minerales, particularmente zinc, hierro y calcio, pero se debe tomar en cuenta que son nutrientes de baja disponibilidad, debido a que se encuentran formando complejos con el ácido fítico, el cual es el principal inhibidor de la absorción de estos minerales, además del ácido tánico, compuesto fenólico que también posee capacidad quelante (Delgado, 2016).

Soya (torta de soya)

La soya es una legumbre de ciclo anual, de tallo erguido, que alcanza entre 0.5 y 1.5 m de altura. Su nombre científico es *Glycine max* y pertenece a la subfamilia de las Papilionáceas, dentro de la familia de las leguminosas, *Fabaceae*. La soya es originaria del norte y centro de China; hacia el año 3000 a.C., los chinos la consideraban una de las cinco semillas sagradas junto con el arroz, el trigo, la cebada y el mijo. En la India, se promovió su consumo a partir de 1735 y, en el

continente europeo, a partir de 1740, se plantaron las primeras semillas, provenientes de China, en la región de Francia (Ridner, 2006).

En la estructura del grano de soya, como se muestra en la Figura 22, el cotiledón representa el 90 % del peso de la semilla; presenta cuerpos proteicos, también conocidos como granos de aleurón, y cuerpos lipídicos o esferosomas, que constituyen cuerpos de almacenamiento de proteínas y aceite, respectivamente. La cáscara, que representa aproximadamente el 8% del peso de la semilla, mantiene unidos los dos cotiledones y proporciona una capa protectora eficaz (Zeki,1992).

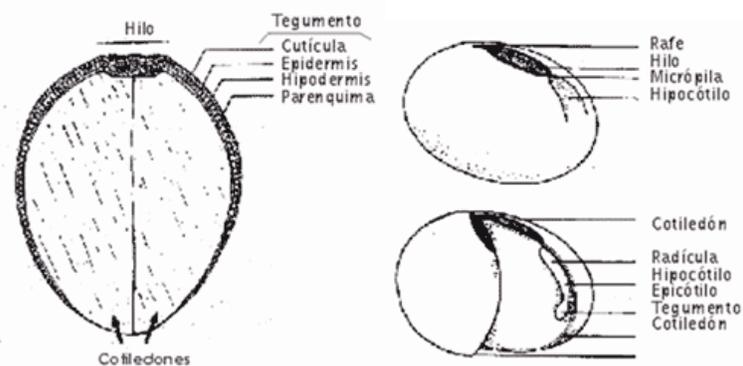


Figura 22. Morfología de un grano de soya (Campomanes, 2008)

Las semillas de soya contienen de 15 - 35 % de carbohidratos, 35 - 40 % de proteínas y de 2 - 3 % de lípidos; también contienen esteroides (estigmasterol y sitosterol), saponósidos, carotenoides, vitaminas (principalmente grupo B), enzimas, ácido fítico e isoflavonas (Rosas, 2006).

Un grano entero de soya contiene 40.0 % de proteínas, 21.0 % de lípidos, 34.0 % de carbohidratos y 5.0 % de minerales, la cubierta de la semilla contiene 9.0 % de proteína, 1.0 % de lípidos, 86.0 % de carbohidratos y 4.0 % de minerales y el cotiledón contiene 43.0 % de proteína, 23.0 % de lípidos, 29.0 % de carbohidratos y 5.0 % de minerales. La torta de soya contiene 12.0 % de humedad, 46.0 % de proteínas, 3.3 % de fibra, 1.6 % de lípidos y 6.0 % de minerales (AGROCOLANTA, 2021, Medic, 2014).

Esta planta herbácea posee vainas cortas, que contienen en su interior entre uno y cuatro granos oleaginosos, con distintas variaciones de color: amarillo (alto contenido proteico), negro (alto contenido de fibra), verde (alto contenido proteico)

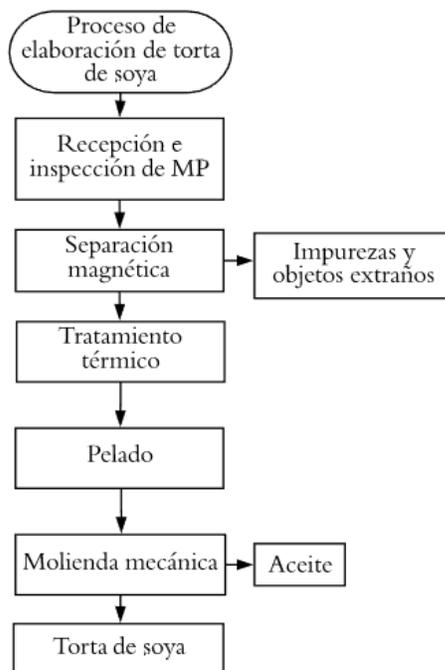
o rojo (alto contenido de carbohidratos de absorción lenta), como se muestra en la Figura 23 (Rosas, 2006).



Figura 23. Variaciones de color en la soya (Rosas, 2006)

El proceso de elaboración de la torta de soya se realiza mediante la molienda mecánica de la soya amarilla, como se muestra en el *Diagrama 5*, donde el objetivo principal es la extracción del aceite de soya y su subproducto es la torta de soya, lo que lo hace idóneo para la alimentación animal, debido a su alto contenido proteico (Achaya, 1997).

Diagrama 5. Proceso de elaboración de torta de soya



Alfalfa (harina de alfalfa)

La alfalfa, *Medicago sativa* L., Figura 24, es el recurso forrajero más utilizado en la alimentación del ganado en el mundo, debido a su facilidad de adaptación a diversos ambientes y a su calidad nutricional, especialmente por proteína y fibra digerible; tiene una gran producción de biomasa, que permite almacenar grandes cantidades

de forraje y tiene la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico simbióticamente, hasta 800 kg/ha/año (Flórez, 2015).



Figura 24. Morfología de *M. sativa* en floración (Fresquet, 2015)

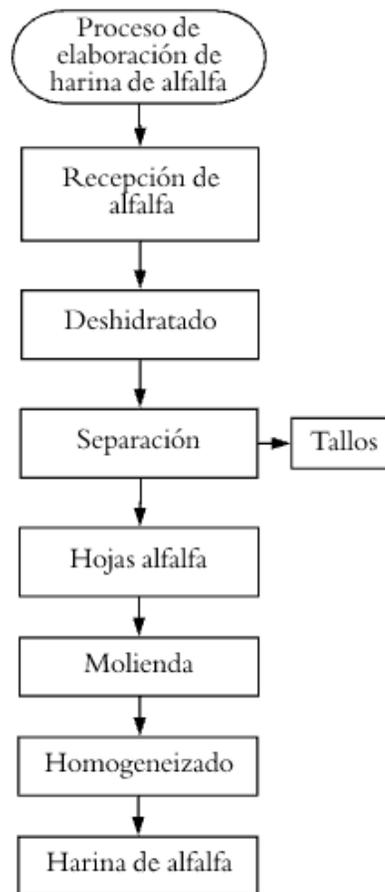
Una semilla de alfalfa contiene 36.0 % de proteínas, 4.7 % de carbohidratos, de los cuales 1.9 % pertenece a los azúcares, 14.0 % de grasas, de las cuales 1.9 % pertenece a las grasas saturadas y 35.0 % de fibra dietética. En contraste, la harina de alfalfa contiene 13.5 % mín. de proteínas, 10.5 % máx. de humedad, 26.0 % mín. de fibra cruda, 1.5 % máx. de lípidos y 26.0 % máx. de minerales (Agromat, 2014, EcoAndes, 2020).

La alfalfa se divide en tres grandes grupos:

- 1) Africana, la cual es poco tolerante al frío, es adecuada para zonas de inviernos suaves y presenta producción sostenida a lo largo del año.
- 2) Intermedia, adaptada a climas secos e inviernos más fríos, proveniente de ecotipos como Aragón, Tierra de Campos y Ampurdán.
- 3) Flamenca: muy tolerante al frío y con producción concentrada en primavera e inicio de verano (Córdova, 2015).

El proceso de elaboración de la harina de alfalfa, como se muestra en el *Diagrama 6*, se realiza mediante la molienda mecánica de las hojas de alfalfa deshidratadas, para la obtención de la harina de alfalfa (Grado A), adicionalmente, los tallos se pueden moler para obtener harina de tallos (Grado C), o harina integral (Grado B), mezclando harina de tallos y harina de alfalfa (Mansilla, 2014, NMX-Y-305-SCFI-1997).

Diagrama 6. Proceso de elaboración de la harina de alfalfa



1.3.3 Alimentos de la pesca

La materia prima de la formulación de alimento para peces que pertenece al grupo de los alimentos de la pesca es la harina de pescado.

El pescado, según el *Codex Alimentarius*, es cualquiera de los vertebrados e invertebrados acuáticos de sangre fría, llamados ectotérmicos; la pesca, según la FAO, es la obtención de especies acuáticas de peces, moluscos y crustáceos; y la acuicultura, según la FAO, es la cría de organismos acuáticos, comprendidos peces, moluscos, crustáceos y plantas; la intervención humana se realiza para incrementar la producción (FAO, 2003, FAO, 2012).

La mayor parte de la acuicultura se lleva a cabo en el mundo en desarrollo, para la producción de especies de peces de agua dulce de poco consumo en la cadena alimentaria, como la tilapia o la carpa. En México se cultivan 61 especies, de las cuales 40 son nativas y 21 de origen exótico (FAO, 2005).

Los peces son animales acuáticos que disponen de branquias, las cuales les permite utilizar el oxígeno disponible en el agua para su respiración, como se ilustra en la Figura 25.

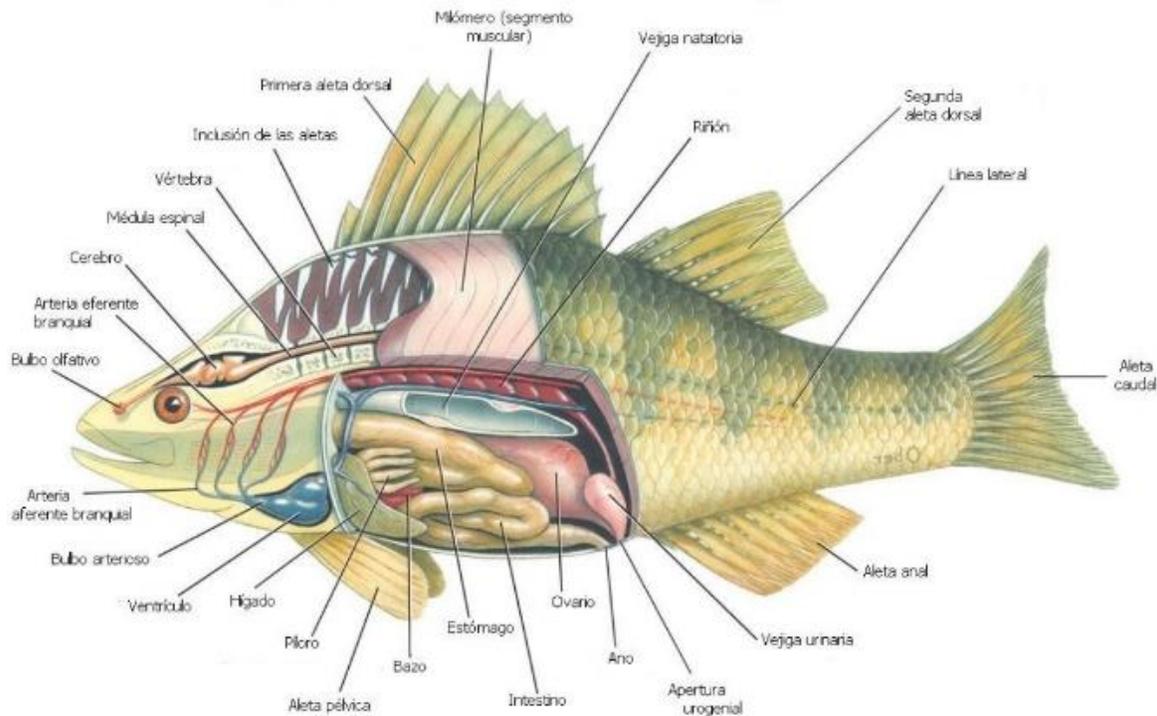


Figura 25. Anatomía de un pez (Gutiérrez, 2017)

A los segmentos de músculos situados entre dos tejidos conectivos se le denominan miotomata y son la parte funcional del músculo, además de estar compuestos por músculos estriados. Las células musculares constan del sarcoplasma, que contiene el núcleo, mitocondrias y las miofibrillas, unidades funcionales de los músculos, cada una envuelta por un tejido conectivo, llamado sarcolema. Las miofibrillas contienen proteínas contráctiles, denominadas actina y miosina (FAO, 2014).

Harina de pescado

La harina de pescado y el aceite de pescado son productos provenientes de la pesca pelágica, definiéndose como la pesca de especies pelágicas, como atún, dorado, tiburón, marlín, pez vela y pez espada, por medio de un palangre, como se ilustra en la Figura 26, el cual consiste en lanzar al mar una línea con cientos de anzuelos, para la captura de especies que son altamente migratorias (PNUD, 2021).

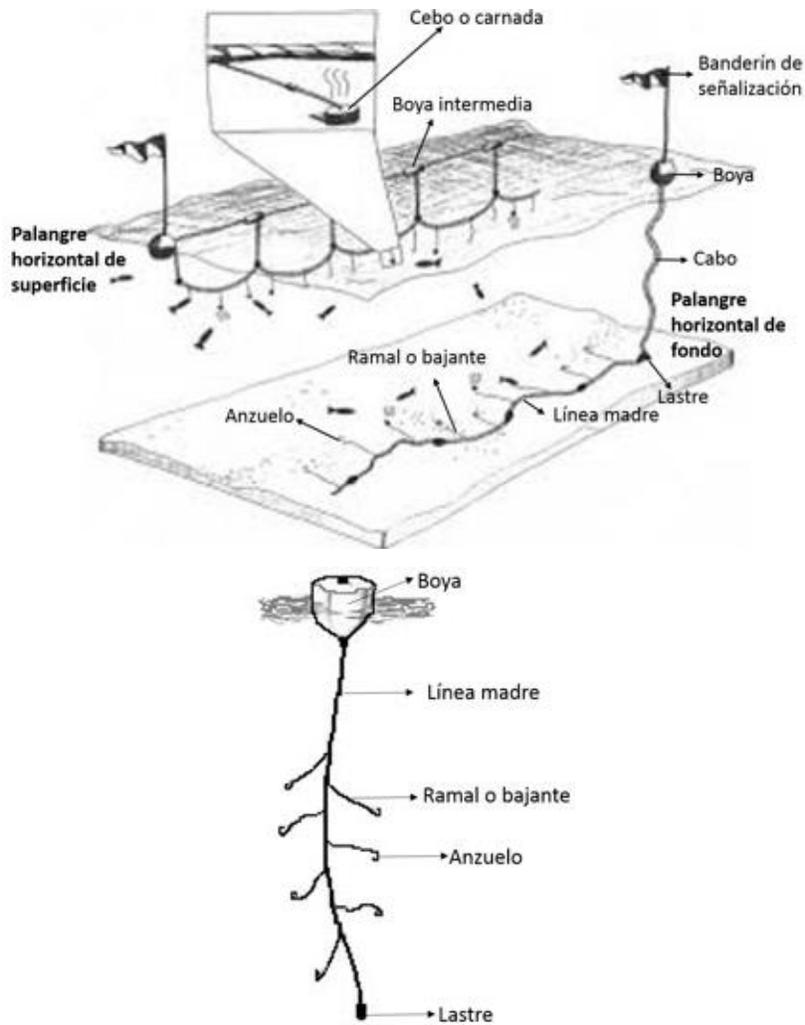
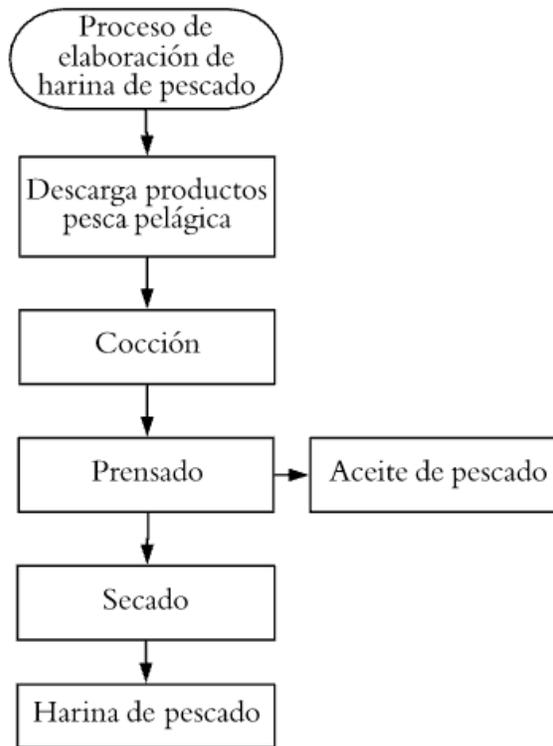


Figura 26. Partes del palangre horizontal y vertical (AUNAP, 2017)

Se emplean para la formulación de alimentos balanceados para la nutrición animal, tanto de productos acuícolas, aves, rumiantes, cerdos y animales domésticos; compitiendo con las harinas de productos proteicos vegetales (semillas oleaginosas, como soya, girasol y canola) y productos proteicos de origen animal (harina de carne y hueso, de sangre y de plumas). La composición nutricional y la calidad de la harina de pescado varía de acuerdo a la frescura y el tipo de materia prima que se emplea para su elaboración (Zaldívar, 2002).

El proceso de elaboración de la harina de pescado, como se muestra en el *Diagrama 7*, se realiza mediante la cocción de los productos obtenidos de la pesca pelágica, con el consecuente prensado para la separación del aceite de pescado y finalmente, secado para la obtención de la harina de pescado (Carvajal, 2019).

Diagrama 7. Proceso de elaboración de la harina de pescado



1.3.4 Aceites y grasas

La materia prima de la formulación de alimento para peces que pertenece al grupo de los aceites, es el aceite de palma. Los lípidos son macromoléculas que se caracterizan por ser insolubles en agua y solubles en solventes orgánicos, como benceno, cloroformo y hexano; se les considera grasa cuando está en estado sólido y aceite cuando se encuentra en estado líquido.

Existen diferentes tipos de ácidos grasos:

- Ácidos grasos saturados: Predominan en las grasas con esqueleto lineal y número par de carbonos. Los de bajo peso molecular (< 14 carbonos) están presentes en la leche de coco y palma, mientras que los de peso molecular mayor (14 a 18 carbonos) se encuentran en las leguminosas.
- Ácidos grasos insaturados: Los que predominan en los lípidos contienen de uno a tres grupos alilo ($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2-$), con el doble enlace aislado y con metilenos que normalmente tienen configuración cis, considerada biológicamente activa, a excepción de la carne y leche de rumiantes, como bovinos, que contienen bajas cantidades de ácidos grasos insaturados trans.

Estos ácidos grasos se pueden clasificar según el terminal metilo en tres familias: C18:1⁹ (ácido oleico o ácido-9-octadecenoico), C18:2^{9, 12} (ácido linoleico o ácido-9,12-octadecadienoico) y C18:3^{9, 12, 15} (ácido linolénico o ácido-9,12,15-octadecatrienoico), como se ilustran en la Figura 27.

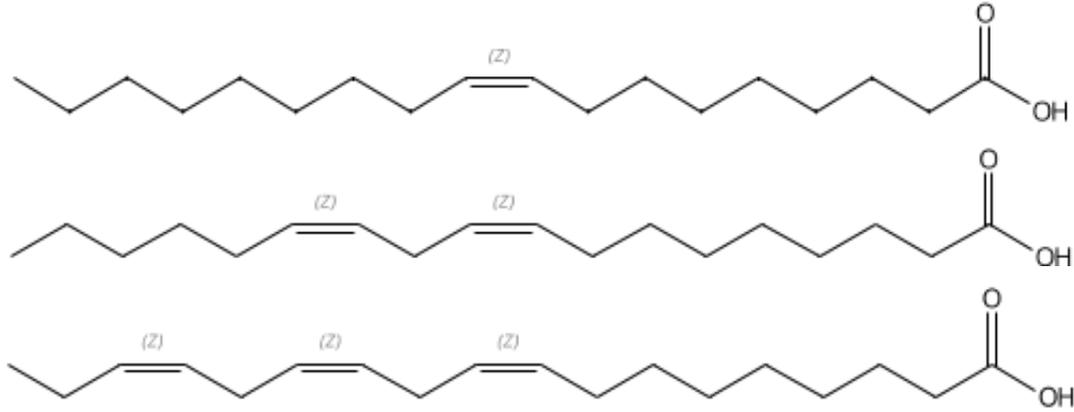


Figura 27. Estructura química ácido oleico, linoleico y linolénico (American Chemical Society, 2021)

- Ácidos grasos trans: existe un aporte importante de ácidos grasos trans en productos producidos a partir de la hidrogenación industrial de aceites vegetales insaturados.

Las grasas y aceites pueden servir como fuente de energía para la mayoría de las células del organismo, excepto las del sistema nervioso y los glóbulos rojos. Comúnmente se almacenan en el tejido adiposo en forma de triglicéridos (TAG), como fuente energética de reserva.

Se utilizan para mejorar el sabor, textura y apariencia, además de actuar como vehículo de elementos liposolubles en los productos alimenticios (Cabezas-Zábala, 2016).

Palma aceitera (aceite de palma)

La palma aceitera o africana, *Elaeis guineensis*, es originaria del Golfo de Guinea en África Occidental. En países como Malasia, Indonesia, Tailandia y Nigeria, se concentra el 81.7 % de la producción mundial y en tales países se encuentra alrededor del 80 % de la superficie mundial cultivada.

El aceite de palma crudo, de acuerdo con la NMX-F-019-SCFI-2012, es el producto semisólido de aspecto graso a temperatura ambiente, de color anaranjado-rojizo, obtenido a partir del mesocarpio de los frutos de la palmera *Elaeis guineensis*.

El fruto de la palma aceitera debe procesarse tan pronto es cosechado, con el fin de evitar el aumento en el contenido de ácidos grasos libres, que pueden afectar la calidad del aceite, por lo que se requiere que las plantas extractoras se ubiquen cerca de las plantaciones. Una vez cosechado, los tres productos de mayor interés comercial que se aíslan de la palma son el aceite de palma, extraído del mesocarpio del racimo de la palma, el aceite de palmiste y la torta de palmiste, extraídos de la almendra del racimo de la planta, como se ilustra en la Figura 28.

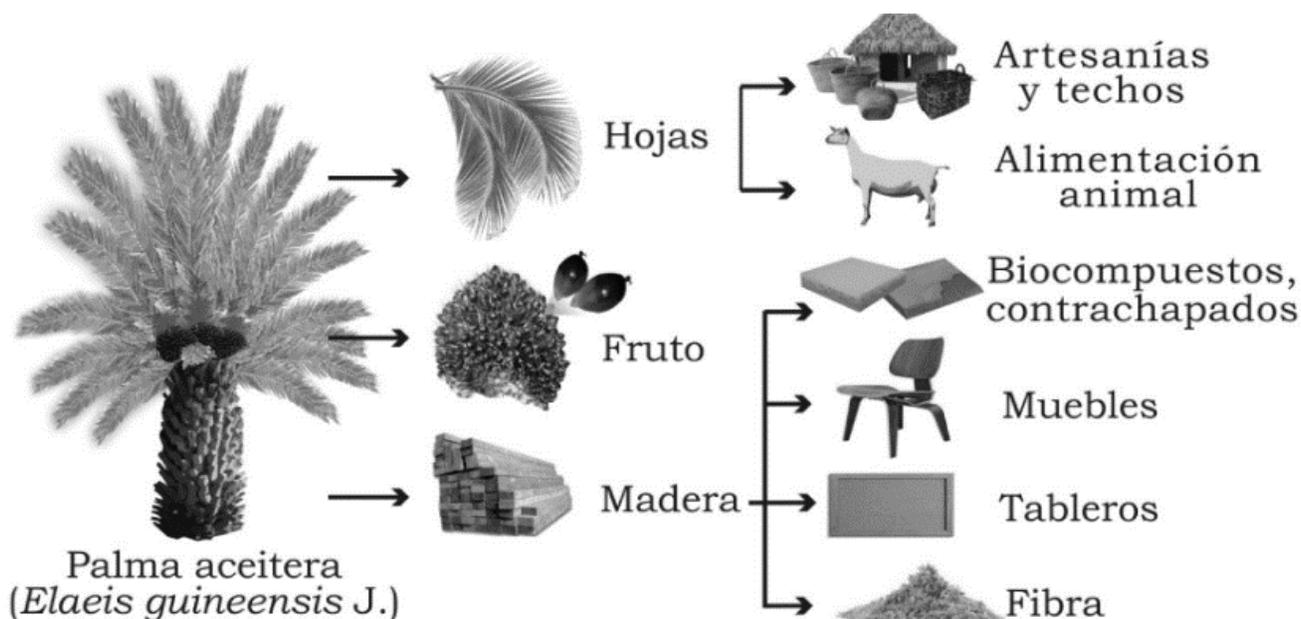


Figura 28. Productos de mayor interés comercial de la palma aceitera (Sierra-Márquez, 2017)

Cientos de frutos de palma aceitera se encuentran unidos a un racimo que pesa hasta 15 kg y, al exponerlo a una presión mecánica, se puede extraer de 18 - 26 % de aceite de palma, con un alto contenido de carotenos, tocoferoles, tocotrienoles, fitoesteroles y compuestos fenólicos. El aceite de palmiste se obtiene de la almendra, residuo del proceso de obtención del aceite de palma, de la cual se extrae aceite con alto contenido de ácido láurico, utilizado en la producción de margarinas, cosméticos, jabones, barnices, pinturas, resinas y detergentes. El residuo de la

extracción del aceite de palmiste se denomina torta de palmiste, la cual es granular, fina y sólida, y representa una valiosa opción para la industria de alimentación animal, al ser una fuente de fibra y proteína, principalmente para pollos de engorda, rumiantes, ovejas y cerdos; contiene 35.7 % de α -celulosa y 30.3 % de hemicelulosa, ilustradas en la Figura 29 (Van Dam, 2016).

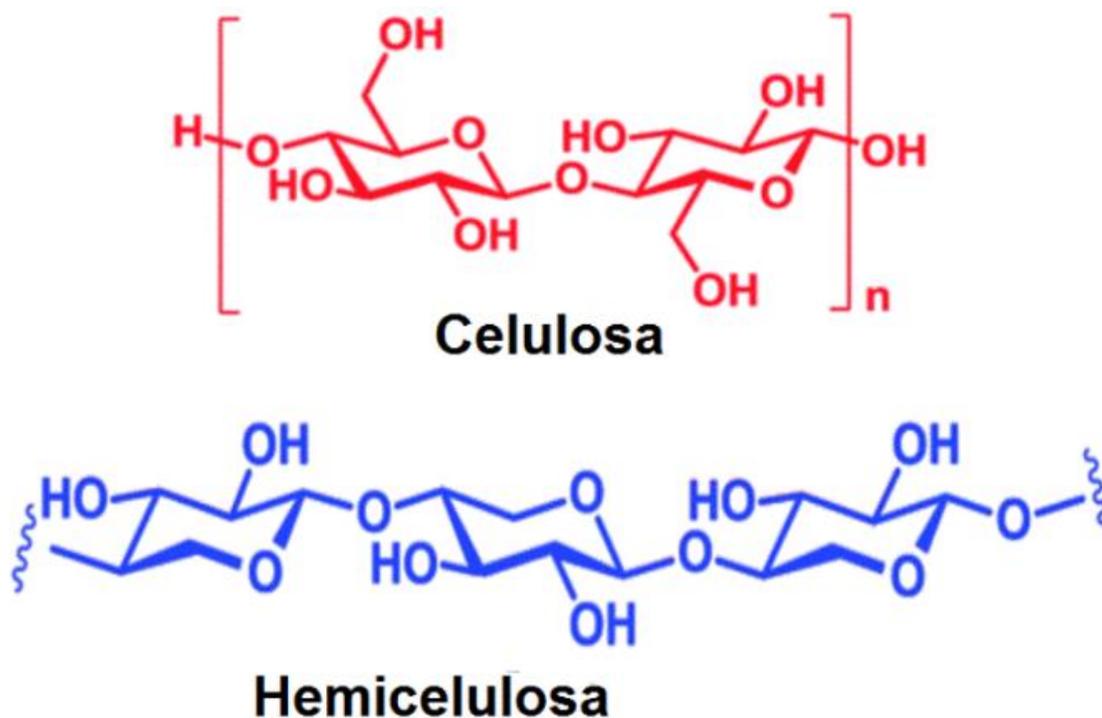
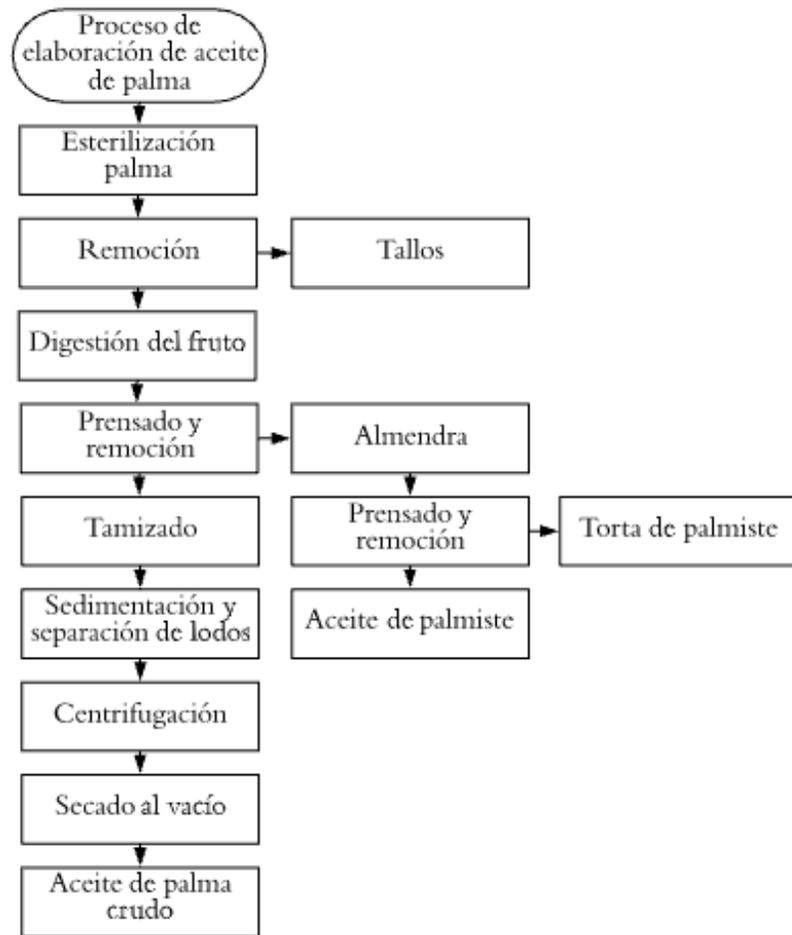


Figura 29. Estructura química celulosa y hemicelulosa (Lérida, 2018)

El aceite, tanto el obtenido del mesocarpio como de la almendra, se puede fraccionar en oleína y estearina. La oleína, al mezclarse con aceites de semillas oleaginosas, tiene la capacidad de resistir altas temperaturas por más tiempo que otros aceites, por lo que es utilizado ampliamente para freír alimentos y en la elaboración de productos de panadería, confitería y heladería, así como en la industria de los plastificantes, debido a que son insumos que confieren flexibilidad al producto final. La estearina, por su consistencia y alto grado de saturación, es empleada para producir margarinas y jabones (Sierra-Márquez, 2017).

El proceso de elaboración del aceite de palma, de acuerdo con la NMX-F-019-SCFI-2012, se ilustra en el *Diagrama 8*.

Diagrama 8. Proceso de elaboración de aceite de palma



1.3.5 Aditivos

Los aditivos alimentarios son sustancias que se añaden para mantener o mejorar la inocuidad, frescura, sabor, textura o aspecto de los alimentos. Las materias primas que pertenecen al grupo de los aditivos son: el fosfato monocálcico, vitaminas y minerales (FAO, 2018).

Fosfato monocálcico (E341i)

Es un acidulante natural y un regulador de acidez, obtenido por extracción de rocas minerales. Se utiliza como materia prima por el aporte de fósforo en la fabricación de piensos y correctores de nutrición animal, cubriendo así las necesidades de este mineral, mejorando los rendimientos de crecimiento, la fertilidad y en los índices de conversión. El fósforo es fundamental en la formación de ATP, la síntesis de ácidos nucleicos y la formación de huesos (Aditivos alimentarios, 2021, Global Feed Corporation, 2021).

Vitaminas

Las vitaminas son un grupo de compuestos orgánicos esenciales para el crecimiento y mantenimiento de la vida animal, requeridas en cantidades traza. Se clasifican en dos grandes grupos: las vitaminas hidrosolubles y liposolubles.

Las vitaminas liposolubles son absorbidas por el tracto gastrointestinal en la presencia de grasas, y pueden ser almacenadas en las reservas lipídicas corporales, siempre y cuando la ingesta en la dieta exceda las demandas metabólicas; la acumulación de vitaminas liposolubles en el cuerpo aumenta directamente proporcional a la ingesta en la dieta, hasta un punto en que puede presentarse una condición de toxicidad, llamada hipervitaminosis.

Por el contrario, las vitaminas hidrosolubles no son almacenadas en cantidades significativas en el tejido del pez; así, en ausencia de un suministro regular de vitaminas hidrosolubles, las reservas corporales son rápidamente agotadas.

Las vitaminas hidrosolubles y liposolubles requeridas por los organismos de los peces, se ilustran en la Tabla 6 (Tacon, 1988).

Tabla 6. Vitaminas hidrosolubles y liposolubles requeridas por los peces

| Vitaminas hidrosolubles | Vitaminas liposolubles |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Tiamina (Vit. B1) | Retinol (Vit. A) |
| Riboflavina (Vit. B2) | Colecalciferol (Vit. D3) |
| Piridoxina (Vit. B6) | Tocoferol (Vit. E) |
| Ácido pantoténico | Filoquinona (Vit. K) |
| Ácido nicotínico (Niacina) | |
| Biotina | |
| Ácido fólico | |
| Cianocobalamina (Vit. B12) | |
| Inositol | |
| Colina | |
| Ácido ascórbico (Vit. C) | |

Minerales

Las funciones generales de los minerales en los peces son:

- Constituyente esencial de las estructuras esqueléticas (huesos y dientes).
- Mantienen la presión osmótica y regulan el intercambio de agua y solutos dentro del cuerpo animal.
- Constituyentes estructurales de tejidos blandos.
- Esenciales para la transmisión de los impulsos nerviosos y contracciones musculares.
- Mantiene el equilibrio ácido-base corporal y regula el pH de la sangre y otros fluidos corporales.
- Constituyentes esenciales de muchas enzimas, vitaminas, hormonas y pigmentos respiratorios, o como cofactores en el metabolismo, catálisis y como activadores enzimáticos.

Los elementos minerales esenciales para peces, se clasifican en dos grupos principales, de acuerdo a su concentración en el cuerpo animal: macroelementos y microelementos, como se ilustra en la Tabla 7 (Tacon, 1988).

Tabla 7. Macroelementos y microelementos minerales esenciales para peces

| Macroelementos | | Traza o microelementos | | |
|----------------------|---------------------|------------------------|-------------|----------------|
| Cationes principales | Aniones principales | Cobalto (Co) | Hierro (Fe) | Manganeso (Mn) |
| Calcio (Ca) | Fósforo (P) | Níquel (Ni) | Vanadio (V) | Molibdeno (Mo) |
| Magnesio (Mg) | Cloro (Cl) | Estaño (Sn) | Cobre (Cu) | Silicio (Si) |
| Sodio (Na) | Azufre (S) | Selenio (Se) | Flúor (F) | Zinc (Zn) |
| Potasio (K) | | Cromo (Cr) | Yodo (I) | |

1.4 Cambios producidos en los principales macronutrientes de la formulación durante el proceso de extrusión

1.4.1 Carbohidratos

El almidón es la mayor reserva de energía en semillas, raíces y tubérculos. Además de su aporte nutricional, el almidón provee de propiedades funcionales para el procesamiento de los cereales dirigido hacia la gelatinización del almidón, produciendo

masas viscosas, geles o suspensiones útiles en el proceso de extrusión (Serna, 2013).

Se denomina gelatinización, al proceso donde el almidón se calienta con una cantidad suficiente de agua, experimentando una transición irreversible orden-desorden. Los gránulos de almidón presentan una estructura semicristalina, exhibiendo birrefringencia al observarse al microscopio con los lentes cruzados; estos absorben agua, se gelatinizan, pierden cristalinidad y liberan amilosa, rompiendo la estructura del gránulo y perdiendo birrefringencia, como se ilustra en la Figura 30. La mayoría de los gránulos de almidón pierden birrefringencia cuando se aplican temperaturas de 68- 78°C (Cabezas, 2016).

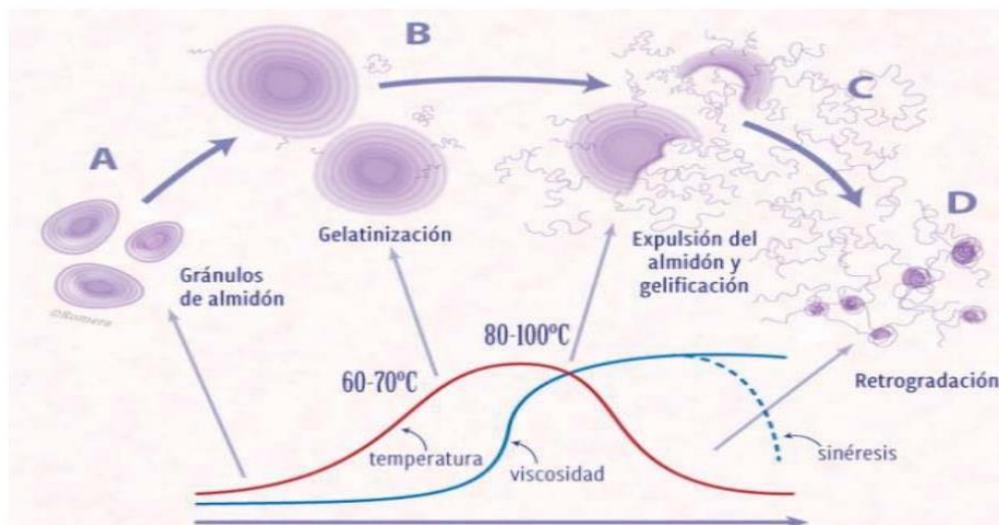


Figura 30. Proceso de gelatinización en almidón (Wilhelm, 2016)

1.4.2 Proteínas

Las proteínas son cadenas de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos; otorgan textura y sabor a los alimentos, además de tener propiedades funcionales, como ser emulsificantes, espumantes y gelificantes.

Un tratamiento mecánico provoca en las proteínas la ruptura y formación de puentes disulfuro, aumentando la extensibilidad en la dirección del estiramiento y cuando se aplican fuerzas de cizallamiento, se modifica la estructura cuaternaria de la proteína. El aumento de presión provoca la formación de puentes de hidrógeno, la ruptura de interacciones hidrofóbicas y la ruptura de puentes salinos, provocando la

desnaturalización de proteínas, la disociación de subunidades de estructuras poliméricas y la gelificación de proteínas (Lupano, 2013).

1.5 Alimentación para peces

Los peces deben alimentarse de materia orgánica, como plantas, otros animales o alimentos preparados que contengan materia animal y vegetal. Su alimentación dependerá del tipo de pez, sus hábitos alimenticios y el objetivo del cuidado, si serán para la acuicultura, como se ilustra en la Figura 31, o serán peces de ornato.

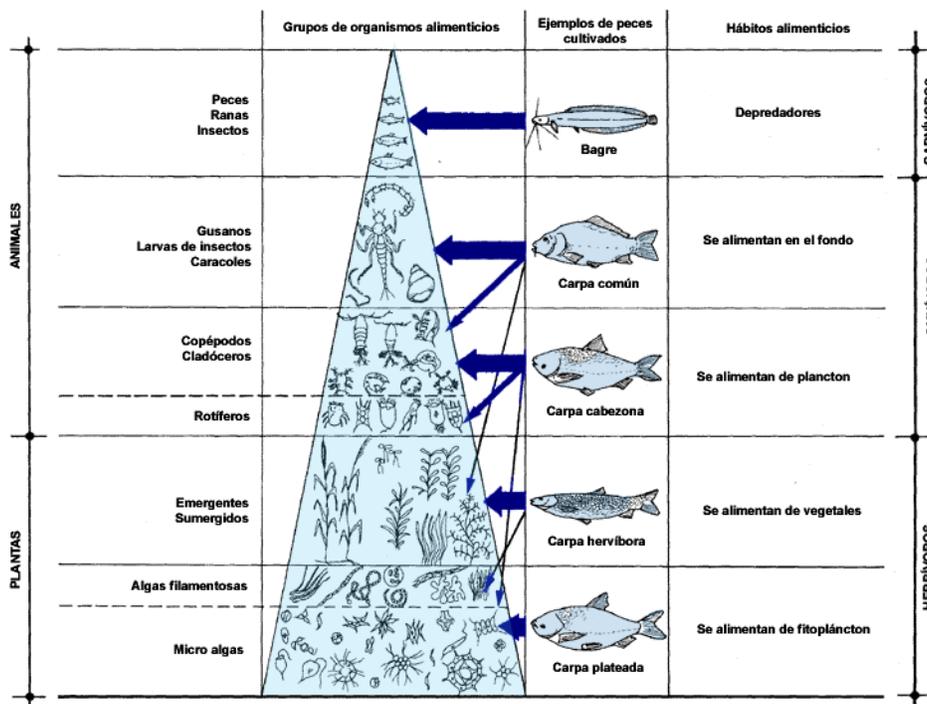


Figura 31. Hábitos alimenticios de diferentes especies de peces importantes para la acuicultura (FAO, 2003)

Existen tres tipos de alimentos utilizados en estanques para peces:

1.5.1 Alimentos naturales

Son aquellos naturalmente presentes en los estanques, tal es el caso de plancton, detrito, bacterias, gusanos, insectos, caracoles y plantas acuáticas; su abundancia dependerá de la calidad del agua, tomando en cuenta la aplicación de cal y la fertilización orgánica para la proliferación de este alimento natural.

1.5.2 Alimentos completos

Se suministran regularmente en los estanques y consisten en una mezcla de ingredientes seleccionados para proporcionar todos los elementos nutritivos

necesarios para su crecimiento. Este tipo de alimento se recomienda para la acuicultura, debido a su alta eficiencia en el crecimiento de los peces.

1.5.3 *Alimentos complementarios*

Son aquellos que se suministran regularmente en los estanques y se recomiendan para los peces de ornato. Se encuentran en dos presentaciones: alimento seco, el cual presenta una humedad del 10 %, siendo fáciles de almacenar, y alimento húmedo, el cual presenta una humedad de entre 30 y 50 %, pero deben almacenarse en refrigeración y su fecha de caducidad se verá reducida, comparándolo con el alimento seco.

Un elemento importante a tomar en cuenta en la fabricación de alimento seco es el grado de finura del mismo, ya que las partículas de alimento no deben ser más finas de lo que resulte necesario, ya que, con las partículas finas, los nutrientes se disuelven más fácilmente en el agua y los peces tienen mayores dificultades para alimentarse correctamente (FAO, 2003).

La calidad del alimento seco dependerá del contenido nutricional formulado, la calidad de los ingredientes y la tecnología del proceso empleado en la fabricación, este último determina las características físicas del producto, como forma, tamaño y estabilidad en el agua, así como características químicas del producto, como palatabilidad y disponibilidad de los nutrientes (Moncada, 1996).

Existen diferentes tipos de alimento seco, dependiendo de la necesidad del pez de ornato:

- Los peces con espalda recta, boca orientada hacia arriba y aleta dorsal desplazada hacia atrás se mueven por la superficie del agua, como los peces hacha, Figura 32, prefieren las escamas flotantes, las cuales se realizan por horneado.



Figura 32. *Pez hacha* (Portillo, 2017)

- Los peces de fondo se reconocen por la línea ventral recta y la boca orientada hacia abajo, como los botia, Figura 33, comen pastillas alimenticias que se hunden, las cuales se realizan mediante prensado.



Figura 33. *Botia kubotai* (Kottelat, 2004)

- Los peces con línea dorsal y ventral curvada y boca terminal se mueven principalmente por capas medias del agua, como los cíclidos, Figura 34, comen preferentemente alimento granulado flotante, el cual se realiza mediante extrusión (SERA, 2021).



Figura 34. *Cíclido Haplochromis moorii* (Nochebuena, 2020)

Para realizar un alimento granulado flotante por medio de la técnica de extrusión, se debe tomar en cuenta la especie a quien se le dará el alimento, para determinar el diámetro interno de la boquilla circular sencilla del dado; el diámetro interno de la boquilla Meelko es de 0.5 cm. La formulación proporcionada por Meelko es una formulación general para peces, la cual, de igual manera, se puede adecuar a las necesidades nutricionales del pez a alimentar. Se consideró alimento para peces goldfish, los cuales comen en la capa media del acuario y, en la Tabla 8, se procedió a comparar los ingredientes de alimento para goldfish marca Tetra y el alimento base Meelko, debido a que este alimento tiene un diámetro de 0.5 cm (Tetra, 2018).

Tabla 8. Comparación de formulaciones de alimento para peces

| Formulación base Meelko | Formulación goldfish marca Tetra |
|--------------------------------|---|
| Harina de maíz | Harina de malta |
| Harina de pescado | Harina de maíz |
| Harina de trigo | Avena |
| Harina de malta | Harina de soya |
| Torta de soya | Harina de trigo |
| Salvado de trigo | Harina de pescado |
| Harina de cebada | Papa |
| Aceite de palma | Levadura |
| Harina de alfalfa | Espirulina |
| Fosfato monocálcico | Harina de alfalfa |
| Vitaminas | Fosfato monocálcico |
| Minerales | Harina de camarón |
| | Aceite de soya |
| | Harina de alga |
| | Colorantes |
| | Vitaminas |
| | Minerales |
| | Estabilizantes |
| | Conservadores |

La formulación base Meelko, para poder ser un alimento adecuado para peces goldfish, debe considerarse la adición de avena, papa, levadura, espirulina, harina de camarón y harina de alga, para cubrir las necesidades nutricionales de estos peces y asegurar su óptimo crecimiento. Este ejercicio se puede realizar con alimentos para diferentes especies y poder tener un punto de partida para la reformulación del producto.

2. Justificación.

La extrusión de alimentos es un proceso cada vez más importante y ampliamente aplicado en la industria y, al mismo tiempo, un tema de investigación científica y de ingeniería industrial. Las materias primas y el agua son premezcladas y alimentadas en la tolva del extrusor (Roos, 2016).

La extrusión presenta grandes ventajas comparadas con los métodos tradicionales de horneado de alimentos y piensos, destacando: su adaptabilidad, eficiencia energética, menor costo de producción, alta productividad, control automatizado, alta calidad del producto terminado, posibilidad de cambio de escala de planta piloto a escala industrial y la utilización como un reactor continuo (Riaz, 2004).

La seguridad y estabilidad de los alimentos extruidos depende del proceso térmico HT/ST. El perfil de tiempo-temperatura de la extrusión es suficiente para la inactivación de la mayoría de enzimas, microorganismos y sus esporas (Emin, 2016).

Las variables de proceso de extrusión y la combinación de mecanismos, como la transferencia de calor, cizallamiento, mezclado, compresión, reacciones químicas, texturización, expansión y formación en toda la operación, se han considerado para la innovación en los equipos de extrusión (Roos, 2017).

El almidón es el polisacárido más importante sometido a proceso de extrusión, no sólo en forma de harina, sino también como granos enteros de cereales. La cocción por extrusión también se ha utilizado para la texturización de materiales proteínicos de origen vegetal, para producir estructuras similares a la carne. Recientemente, la extrusión se ha aplicado al desarrollo de películas biodegradables y nanocompuestos con características de barrera (Yanniotis, 2013).

2.1 Producción de cereales

La producción mundial de cereales en 2019 ascendió a 2,719 millones de toneladas, como se muestra en la

Figura 35. La estimación sobre la producción de trigo en 2019 se mantuvo en 763 millones de toneladas. México es el principal productor de trigo de América Central, en 2018 la producción se ubicó en 2,943 millones de toneladas, siendo el Estado de

Sonora con mayor superficie sembrada, de 157,630 ha (CONAPESCA, 2018, FAOSTAT, 2008).



Figura 35. Producción, utilización y existencias de cereales (FAO, 2020)

El maíz es uno de los cereales de mayor tamaño y que más se produce en el mundo, en 2009 México sumó una producción anual de cereales de 19 millones de toneladas. México es el segundo productor de maíz en América Latina y tiene la necesidad de importar principalmente de Brasil. Los países con mayor producción son: China, la Unión Europea y Brasil; y el Estado de Sinaloa es el Estado con mayor cantidad de superficie sembrada, de 310,807 ha (FAO, 2020, SIAP, 2019).

México es el 28° productor mundial de cebada, con una producción de 1 millón de toneladas anuales. En México se han importado 71,000 toneladas de cebada en los últimos años; el 82 % del grano se destina a la agroindustria para la producción de malta y, posteriormente, en la elaboración de cerveza, seguido del uso pecuario y como semilla de siembra. El 80 % de la producción de cebada en México se concentró en el Estado de Guanajuato, con 367,000 toneladas anuales, en el Estado de Hidalgo, con 249,000 toneladas anuales, en el Estado de Tlaxcala, con 87,000 toneladas anuales, en el Estado de Puebla, con 83,000 toneladas anuales y en el Estado de México, con 65,000 toneladas anuales. (SIAP, 2018)

2.2 Producción acuícola

La producción acuícola en México generó un total de 404 mil toneladas de pescados y mariscos cultivados en zonas marítimas ribereñas, aguas interiores y estanques en el territorio nacional durante el año 2017. La harina de pescado es producto del procesamiento de pescado, obteniendo además aceite de pescado en el proceso, con alto valor comercial (CONAPESCA, 2018).

2.3 Producción de leguminosas

La producción de alfalfa en 2018 ascendió a 33.6 millones de toneladas en México, el Estado de Chihuahua es el líder productor nacional del forraje, en 2017 destinó 86,140 ha para este cultivo. Japón, China y Corea del Sur son las naciones con las mayores compras del forraje de otros países, la venta mexicana del forraje tiene posibilidad en pellets y harina (SIAP, 2018).

En cuanto a las importaciones de soya en México, provinieron de Estados Unidos (90.28 %) y Paraguay (6.70 %). México es el tercer importador a nivel mundial del 2.88 % del total de soya que se comercializa a nivel mundial. En la actualidad, se satisface el 60.60 % de los requerimientos nacionales, con una producción interna para alimentos balanceados de consumo pecuario (SADER, 2017).

3. Hipótesis.

Es posible implementar métodos de caracterización alternativos para alimentos diversos e implementar un modelo matemático para predecir el comportamiento operativo de un extrusor monohusillo, aplicado al desarrollo de alimentos.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

- Determinación de los perfiles teóricos de presión y velocidad para harina de trigo y de maíz, en un extrusor monohusillo Meelko, adquirido en la Facultad de Química; a partir de un modelo matemático, tomando en cuenta las bases termofísicas de las harinas y la geometría del husillo del extrusor, además de la caracterización proximal de una formulación de alimento para peces.

4.2 Objetivos particulares

- Realizar una investigación de las materias primas de la formulación de alimento para peces, tomando en cuenta su origen, porcentajes de macronutrientes, diagramas de flujo de su obtención y sus respectivas normas mexicanas aplicables.
- Describir las partes y funciones de un extrusor monohusillo, así como las modificaciones que se producen en los principales macronutrientes en la extrusión.
- Realizar la caracterización proximal de las materias primas: humedad, contenido de celulosa y lignina (ADF), contenido de fibra insoluble (NDF) y contenido de proteína (Bradford).
- Determinar los perfiles de flujo (caudal de alimentación = f (presión)) y de velocidad (profundidades del canal = f (velocidad)), para harina de trigo y de maíz, tomando en cuenta un modelo matemático, con base en los parámetros geométricos del husillo del extrusor monohusillo Meelko modelo MKED040C y viscosidad de las harinas de trigo y de maíz.
- Realizar variaciones en la geometría del husillo al doble y a la mitad en el perfil de flujo (caudal de alimentación = f (presión)), para observar su comportamiento.
- Realizar el perfil de velocidad (profundidades del canal = f (velocidad)) con un ángulo del filete del husillo con la vertical a 90° .
- Determinar los perfiles del esfuerzo de cizalla = f (velocidad de cizalla) y caudal de alimentación = f (presión) en la boquilla del extrusor.

5. Metodología experimental.

5.1 Análisis de materias primas

Para el análisis de materias primas, se realizaron las siguientes pruebas, como se indica en el *Diagrama 9*, empleando los reactivos mostrados en la Tabla 9:

Diagrama 9. Estrategia experimental de análisis de las materias primas



Tabla 9. Reactivos empleados en el procedimiento experimental

| Reactivo | Marca | Pureza (%) |
|--|------------------|------------|
| Bromuro de hexadeciltrimetilamonio (BCTA) | Sigma-Aldrich | ≥96.0 |
| Ácido sulfúrico | MEYER | 95.0-98.0 |
| Dodecilsulfato de sodio | Sigma-Aldrich | ≥98.5 |
| Ácido etilendiaminotetraacético disódico dihidratado | Sigma-Aldrich | ≥99.0 |
| Fosfato de sodio dibásico | Sigma-Aldrich | ≥99.0 |
| Borato de sodio decahidratado | J. T. Baker | ≥99.9 |
| 2-etoxietanol (Cellosolve) | Sigma-Aldrich | ≥99.0 |
| Albúmina de suero bovino | Sigma-Aldrich | ≥98.0 |
| Reactivo de Bradford | Sigma-Aldrich | - |
| Hidróxido de sodio | Farmacia "París" | ≥98.0 |

5.1.1 *Contenido de humedad por termobalanza (Unidades: % Humedad)*

Fundamento: La muestra se extiende en el analizador de humedad A&D MF-50, basado en el principio de análisis termogravimétrico, se seca una muestra durante aproximadamente 3 min a 110°C, utilizando una lámpara halógena y se obtiene el contenido de humedad en porcentaje, resultando de la diferencia entre el peso húmedo y el peso seco, con una precisión de ± 0.05 %.

Materiales: 1 g de muestra, 1 analizador de humedad A&D MF-50 (0.05 % / máx. 51 g) y 1 espátula.

Método: Se realizó una determinación de humedad a las materias primas tal y como fueron recibidas, para ello se utilizó el analizador de humedad A&D, se pesó 1 g de muestra y el equipo se detiene automáticamente cuando ya no hay variaciones en peso, es decir, cuando el material está seco (A&D Company, 2004).

5.1.2 *Contenido de celulosa y lignina por ADF (Unidades: % Celulosa y lignina)*

Fundamento: Se utilizó una modificación del método de Van Soest-Wine, el cual se basa en un procedimiento de análisis con detergente ácido (ADF), permitiendo obtener un estimado del contenido de celulosa y lignina, las cuales, se determinan gravimétricamente considerando la pérdida de peso, además de que no requiere de equipos especializados para llevar a cabo la disolución y filtración.

Materiales: 0.5 g de muestra, 50 mL de solución detergente ADF (solución acuosa con 2 % (m/v) de bromuro de hexadeciltrimetilamonio (BCTA) y 3 % (v/v) de ácido sulfúrico con aforo de agua destilada), 2 matraces bola de fondo plano de 125 mL, 7 crisoles de filtración, 1 horno a 100°C, 1 desecador y 1 balanza analítica Adventurer Pro OHAUS (AV264C, LD=0.0001 g, máximo 260 g).

Método: Se realizó una determinación de celulosa y lignina a las materias primas por el método de Detergente Ácido (ADF). Se colocó un reflujo con 0.5 g de muestra y 50 mL de solución detergente ADF, a 100°C por 1 h, se filtró en un crisol a peso constante con un matraz Kitasato, realizando lavados con agua destilada, hasta eliminar la presencia de espuma, se secó en horno a 100°C por 1 h, se colocó en un desecador por 12 h y se calculó la pérdida de peso; realizando las determinaciones por duplicado (Van Soest, 1963).

5.1.3 Contenido de fibra insoluble por NDF (Unidades: % fibra insoluble)

Fundamento: Se utilizó una modificación del método de Van Soest-Wine, el cual se basa en un procedimiento de análisis con detergente neutro (NDF), permitiendo obtener un estimado de la proporción principal de cada componente en las fibras vegetales: celulosa, hemicelulosa y lignina, las cuales, se determinan gravimétricamente considerando la pérdida de peso, y tomando en cuenta el resultado obtenido por ADF, se puede calcular el contenido de hemicelulosa.

Materiales: 0.5 g de muestra, 50 mL de solución detergente NDF (solución acuosa con 3 % (m/v) de dodecilsulfato de sodio, 2 % (m/v) de ácido etilendiaminotetraacético disódico dihidratado, 0.5 % (m/v) de fosfato de sodio dibásico, 0.7 % (m/v) de borato de sodio decahidratado y 1 % (v/v) de 2-etoxietanol, con aforo de agua destilada), 2 matraces bola de fondo plano de 125 mL, 7 crisoles de filtración, 1 horno a 100°C, 1 desecador y 1 balanza analítica Adventurer Pro OHAUS (AV264C, LD=0.0001 g, máximo 260 g).

Método: Se realizó una determinación de celulosa y lignina a las materias primas por el método de Detergente Neutro (NDF). Se colocó un reflujo con 0.5 g de muestra y 50 mL de solución detergente NDF a 100°C por 1 h, se filtró en un crisol a peso constante con un matraz Kitasato, realizando lavados con agua destilada, hasta eliminar la presencia de espuma, se secó en horno a 100°C por 1 h, se colocó en un desecador por 12 h y se calculó la pérdida de peso; las determinaciones se realizaron por duplicado (Van Soest, 1967).

5.1.4 Contenido de proteína por Bio-Rad Protein Assay (Unidades: % Proteína)

Fundamento: La determinación de proteína se realizó con el método *Bio-Rad Protein Assay*, basado en el método de Bradford, con un patrón de albúmina de suero bovina. Para la extracción de la proteína, se hidroliza con hidróxido de sodio, se neutraliza con ácido sulfúrico y se centrifuga. Después, se añade colorante diluido de reactivo de Bradford, el cual forma un complejo azul entre Cu^{2+} y grupos amida desprotonados de los aminoácidos: alanina, fenilalanina y triptófano, que contribuyen a la absorbancia total de 595 nm, medida con un espectrofotómetro Único de UV-Visible.

Materiales: 1 g de muestra, 10 mg de albúmina de suero bovina, 5 tubos Eppendorf, 1 matraz aforado de 10 mL, 5 celdas para espectrofotómetro de plástico (1 cm), 1 frasco de reactivo de Bradford, 140 mL de hidróxido de sodio 0.2 M, 8 tubos para centrifugadora, 1 centrífuga Armglobe (CENTRIFICIENTPRO, rango de velocidad 1000-4000 rpm, potencia 80 W), 1 balanza analítica Adventurer Pro OHAUS (AV264C, LD=0.0001 g, máximo 260 g) y 1 espectrofotómetro único de UV-Visible (2150, rango 325-1000 nm y ancho de banda 4 nm).

Método: Se realizó una determinación de concentración de proteína en las materias primas con el método Bio-Rad Protein Assay, con un patrón de albúmina de suero bovina de 0.2 mg/mL a 1.0 mg/mL. Para la extracción de la proteína en las materias primas, se hidrolizó 1 g de materia prima con 20 mL de hidróxido de sodio 0.2 M por 10 min a 100°C, se neutralizó con ácido sulfúrico 0.2 M y se centrifugó a 4000 rpm por 15 min. Después, se tomaron 50 µL de muestra, se añadieron 2.5 mL de colorante diluido de reactivo de Bradford (1:4 con agua destilada) y se dejó reposar 10 min. Finalmente, se midió la absorbancia a 595 nm con un espectrofotómetro Único de UV-Visible, los análisis se realizaron por duplicado (Bradford, 1976, Hernández, 2008).

Normas aplicables a las materias primas

- Harina de maíz

De acuerdo con la NMX-F-046-S-1980, las especificaciones físicas y químicas de la harina de maíz se ilustran en la Tabla 10.

Tabla 10. Especificaciones físicas y químicas de la harina de maíz

| Especificaciones | Mínimas (%) | Máximas (%) |
|-------------------------|--------------------|--------------------|
| Humedad | - | 11.0 |
| Proteína (N x 6.25) | 8.0 | - |
| Cenizas | - | 1.5 |
| Extracto etéreo | 4.0 | - |
| Fibra cruda | - | 2.0 |

- Harina de trigo

De acuerdo con la NMX-F-007-1982, las especificaciones físicas y químicas de la harina de trigo se ilustran en la Tabla 11.

Tabla 11. Especificaciones físicas y químicas de la harina de trigo

| Especificaciones | Grado I (Panificación) | Grado II (Galletas) | Grado III (Pastas) |
|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Humedad máx (%) | 14.0 | 14.0 | 14.0 |
| Proteína (N x 5.7) (%) | 9.5 | 9.0 | 9.0 |
| Cenizas (%) | 0.55 máx | 0.4 – 1.0 | 0.6 máx |
| Fibra cruda (%) | 0.2 – 0.4 | 0.2 – 0.6 | 0.3 máx |
| Gluten húmedo mín (%) | 31.3 | 29.7 | 29.7 |

Nota: Las especificaciones correspondientes se refieren sobre 14 % de base húmeda expuesto al gluten.

- Salvado de trigo

De acuerdo con la NMX-Y-010-1966, las especificaciones físicas y químicas del salvado de trigo destinado a alimentación animal se ilustran en la Tabla 12.

Tabla 12. Especificaciones físicas y químicas del salvado de trigo

| Especificaciones | Mínimas (%) | Máximas (%) |
|-------------------------|--------------------|--------------------|
| Humedad | - | 11.0 |
| Proteína cruda | 14.0 | - |
| Grasa cruda | 3.0 | - |
| Cenizas | - | 6.0 |
| Fibra cruda | - | 11.0 |

- Harina de cebada

De acuerdo con la NOM-247-SSA1-2008, las especificaciones de la harina de cebada se ilustran en la Tabla 13.

Tabla 13. Especificaciones físicas y químicas de la harina de cebada

| Especificaciones | Mínimas (%) | Máximas (%) |
|-------------------------|--|--------------------|
| Humedad | - | 15 |
| Materia extraña | No más de 50 fragmentos de insectos, no más de un pelo de roedor y estar exentos de excretas, en 50 g de producto. | |

- Torta de soya

De acuerdo con la NMX-F-800-SCFI-2017, las especificaciones fisicoquímicas de la soya texturizada a partir de harina desgrasada, se ilustran en la Tabla 14.

Tabla 14. Especificaciones fisicoquímicas de la torta de soya

| Especificaciones | Límite mínimo | Límite máximo |
|------------------------------|----------------------|----------------------|
| Humedad (%) | - | 10.0 |
| Proteína (N x 6.25) B.S. (%) | 48.0 | - |
| E. Etéreo B. S. (%) | - | 5.0 |
| Cenizas B. S. (%) | - | 8.0 |
| Fibra cruda B. S. (%) | - | 6.0 |

- Harina de alfalfa

De acuerdo con la NMX-Y-305-SCFI-1997, las propiedades químicas de la harina de alfalfa se ilustran en la Tabla 15.

Tabla 15. Propiedades químicas de la harina de alfalfa

| Indicadores | Grado A | | Grado B | | Grado C | |
|--------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|----------------|-------------|
| | Mín. | Máx. | Mín. | Máx. | Mín. | Máx. |
| Proteína (%) | 24 | - | 18 | - | 15 | - |
| Humedad harina (%) | - | 11 | - | - | - | 11 |
| Fibra cruda (%) | - | 16 | - | - | - | 16 |
| Cenizas (%) | - | 10 | - | - | - | 10 |

- Harina de pescado

De acuerdo con la NMX-Y-015-SCFI-2006, las especificaciones que debe cumplir la harina de pescado, se ilustran en la Tabla 16.

Tabla 16. Especificaciones de la harina de pescado con solubles

| Especificaciones | Mínimo (%) | Máximo (%) |
|-------------------------|-------------------|-------------------|
| Proteína cruda | 60.00 | - |
| Grasa cruda | 6.00 | - |
| Fibra cruda | - | 1.00 |
| Humedad | - | 10.00 |
| Cenizas | - | 19.00 |
| Calcio | - | 5.50 |
| Fósforo | - | 2.50 |
| Cloruro de sodio | - | 2.00 |

5.2 Determinación de perfiles de velocidad y flujo en la zona de compresión del husillo

Para la determinación de los perfiles de flujo y velocidad en la zona de compresión del husillo, se debe calcular el flujo másico y volumétrico de la tolva de alimentación, investigar la viscosidad máxima de las harinas principales (harina de maíz y harina de trigo) y realizar las mediciones de la geometría del husillo:

5.2.1 Calibrado de la tolva (Unidades: kg/h y m³/s)

Fundamento: El objetivo del calibrado es conocer las velocidades de alimentación de la tolva, a partir de 4 marcas realizadas en el extrusor monohusillo Meelko.

Materiales: 10 kg de harina trigo, 1 charola de plástico, 1 extrusor monohusillo Meelko (MKED040C, procesa hasta 40 kg/h, con una potencia de 6kW y un husillo de 40 mm de diámetro) y 1 balanza analítica Adventurer Pro OHAUS (AV264C, LD=0.0001 g, máximo 260 g)

Método: Se colocó la harina de trigo en la tolva del extrusor monohusillo, se realizaron 4 marcas de velocidad de alimentación en el tablero, se colocó la charola previamente pesada en la salida de la alimentación de la tolva, se accionó 1 min y se pesó el contenido de harina recolectado, como se muestra en la Figura 36, para el cálculo del caudal de alimentación.



Figura 36. Calibrado de la tolva del extrusor monohusillo Meelko (MKED040C)

5.2.2 Medición del husillo en la zona de compresión (Unidades: m y °)

Fundamento: La notación y el sistema de coordenadas considerado para las mediciones del husillo, se ilustran en la Figura 37.

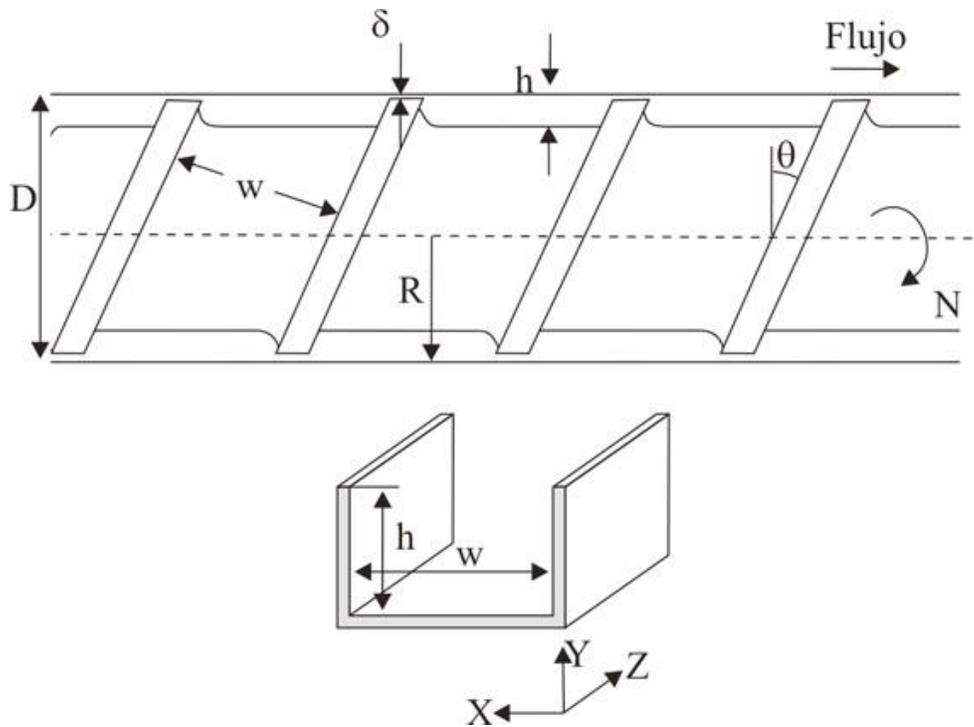


Figura 37. Sistema de coordenadas y nomenclatura (Beltrán, 2012)

donde:

R = radio del husillo

D = diámetro del husillo

θ = ángulo del filete del husillo con la vertical

w = ancho del canal

h = profundidad del canal

δ = holgura entre el cilindro y el filete del husillo

N = número de revoluciones a las que gira el husillo

Existen dos tipos de flujo a lo largo del eje Z : el movimiento del material es debido en parte al flujo de fricción, provocado por el movimiento de la superficie del cilindro (hacia la boquilla). Si hay un impedimento al flujo, se crea un gradiente de presión en dirección Z , provocando un flujo de retroceso.

Materiales: 1 husillo de extrusor monohusillo Meelko (MKED040C), 1 calibrador digital Steren (HER-411, resolución 0.1 mm, rango 0-153 mm) y 1 transportador YARK (resolución 1°, rango 0-180°).

Método: Se realizaron mediciones del husillo, fijando un punto en la zona de compresión.

5.2.3 *Modelo matemático en la zona de compresión, tomado del capítulo 5 del libro de Tecnología de Polímeros (Beltrán, 2012).*

El material en la zona de dosificación se encuentra en estado fundido y se considera homogéneo. Para hacer el estudio del movimiento del material en el canal del husillo, se toman en cuenta las siguientes suposiciones:

- El canal del husillo se considera de sección rectangular.
- El canal del husillo se encuentra “desenrollado” y se escoge el sistema de coordenadas, ilustrado en la Figura 37.
- El cilindro es una superficie plana que se mueve sobre el canal del husillo, arrastrando al material.
- Se considera que el material fundido tiene un comportamiento Newtoniano.
- Se considera que el material fundido se comporta como un fluido incompresible.
- Se supone que el proceso es continuo y que se ha alcanzado régimen estacionario.

Ecuaciones para perfil de velocidad en la zona de compresión

El análisis del caudal en la zona de dosificación se basa en considerar el flujo newtoniano e isoterma de un fluido incompresible en un canal rectangular de ancho w y altura h . Se desprecia la holgura δ porque $\delta \ll h$ y se supone que el flujo es uniforme. Realizando un balance de cantidad de movimiento sobre un sistema de este tipo se obtiene la siguiente expresión, denominada ecuación de Navier-Stokes.

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) \quad (1)$$

donde:

$\frac{dP}{dZ}$ = gradiente de presión a lo largo del canal

v = velocidad del fluido en el canal

η = viscosidad del fluido

La ecuación anterior se puede simplificar si se considera que $w \gg h$, de modo que $\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$, lo que supone despreciar el efecto que puedan tener las paredes del canal en el flujo. Con esto, la ecuación del flujo se simplifica a:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) \quad (2)$$

Usando esta última ecuación, se obtienen resultados que discrepan menos del 10% de los obtenidos con la ecuación completa, si la relación del ancho del canal (w) a la profundidad del mismo (h) es mayor a 10.

La integración de la ecuación (2) proporciona:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{y}{\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) + C_1$$

Integrando nuevamente:

$$v = \frac{y^2}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) + C_1 y + C_2 \quad (3)$$

Teniendo en cuenta las condiciones límite: cuando $y=0$, es decir, junto al husillo, el $v=0$. Sustituyendo esta condición en la ecuación (3), se obtiene $C_2=0$. Por otro lado, junto a la pared del cilindro donde $y=h$, la velocidad será $v=V$, velocidad lineal periférica del cilindro (V), con lo que resulta:

$$V = \frac{h^2}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) + C_1 h$$

$$C_1 = \frac{V}{h} - \frac{h}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right)$$

Y sustituyendo el valor de C_1 y C_2 en la expresión (3):

$$v = \frac{V \cdot y}{h} - \frac{h \cdot y}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) + \frac{y^2}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right)$$

$$\boxed{v = \frac{V \cdot y}{h} + \frac{y(y-h)}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right)}$$
(4)

Tenemos dos términos, el primero varía linealmente con y , y depende de la velocidad del husillo, representando el flujo de arrastre o fricción; y el segundo será negativo o cero, varía entre 0 y h , oponiéndose al movimiento del material hacia la boquilla, lo cual da un perfil de velocidades parabólico, que depende de la caída de presión a lo largo del husillo; por lo tanto, representa el flujo de retroceso o presión. La suma de estos dos términos representa la velocidad resultante en cualquier punto del canal.

Flujo de arrastre: $Q_D = \frac{V \cdot y}{h}$

Flujo de presión: $Q_P = \frac{y(y-h)}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right)$

Para la elaboración del gráfico de velocidad de rotación del husillo – altura del vuelo, se toman en cuenta alturas de vuelo desde $y=0$ hasta $y=h$, h siendo la profundidad del canal.

Es importante tomar en cuenta que la ecuación para el cálculo de la velocidad lineal periférica del cilindro es la siguiente:

$$V = (\pi \cdot D \cdot N) \cos\theta \quad (5)$$

Ecuaciones para perfil de flujo en la zona de compresión

El caudal de material extruido se calcula como el producto de la velocidad del material por la sección del husillo. Se puede partir de la ecuación (4), integrando el producto de la velocidad por el ancho del canal entre los límites $y=0$ e $y=h$.

$$Q = \int_0^h w \cdot v \cdot dy = \int_0^h \frac{wVy}{h} dy + \int_0^h \frac{wy(y-h)}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) dy \quad (6)$$

De donde se obtiene:

$$Q = \frac{wVh}{2} - \frac{wh^3}{12\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) \quad (7)$$

Igual que en el caso de la velocidad, el caudal también presenta dos términos:

$$\text{Flujo de arrastre: } Q_D = \frac{wVh}{2}$$

$$\text{Flujo de presión: } Q_P = - \frac{wh^3}{12\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right)$$

Interesa ahora escribir la ecuación (7), que da el flujo de material a través del husillo, en función de las dimensiones del husillo, empleando la notación de la Figura 37.

Si imaginamos el husillo cortado a lo largo de una generatriz y desenrollado, despreciando el ancho del filete, tal como se representa en la Figura 38, podemos escribir la siguiente ecuación:

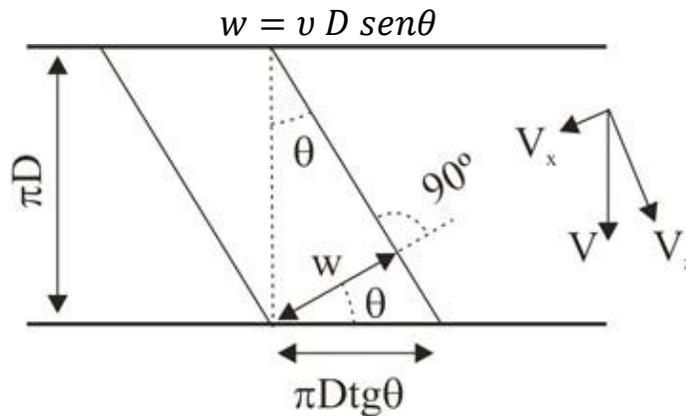


Figura 38. Husillo cortado a lo largo de su eje y desenrollado (Beltrán, 2012)

Si V es la velocidad con que se mueve el cilindro sobre el husillo, en términos de velocidad angular, y está dirigida formando un ángulo θ con el filete del husillo y tiene dos componentes v_z y v_x paralelas al eje Z y al eje X , respectivamente:

$$v_z = V \cos \theta = \pi D N \cos \theta$$

$$v_x = V \text{ sen} \theta = \pi D N \text{ sen} \theta$$

Una partícula de fluido describe un movimiento muy complejo dentro del canal, pero sólo la componente v_z es responsable del avance del fluido a lo largo del canal. La componente X actúa en un plano normal al eje Z y causa un movimiento circulatorio importante para mejorar el mezclado y la transmisión de calor, pero no para la capacidad de transporte del husillo. Por tanto, para calcular el caudal de material basta con considerar v_z .

Sustituyendo los valores así hallados de w y V en el primer término de la ecuación (7) tenemos:

$$\frac{whV}{2} = \frac{\pi \cdot D \cdot \text{sen } \theta \cdot h \cdot \pi \cdot D \cdot N \cdot \cos \theta}{2} = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot (\text{sen } \theta \cos \theta) \cdot h \cdot N}{2}$$

El segundo término de la ecuación (7) puede expresarse en función de las dimensiones del husillo, teniendo en cuenta que si se desenrolla completamente el tonillo se puede escribir:

$$\frac{L}{Z} = \text{sen } \theta \rightarrow dZ = \frac{dL}{\text{sen } \theta}$$

Donde L es la longitud del cilindro y Z la longitud total del canal del husillo una vez

desenrollado, a lo largo del cual existe un gradiente de presión $\left(\frac{dP}{dZ}\right)$. De este modo, se puede escribir el segundo término de la ecuación (7) como:

$$\frac{w \cdot h^3}{12\eta} \left(\frac{dP}{dZ}\right) = \frac{\pi \cdot D \cdot \text{sen } \theta \cdot h^3}{12\eta} \frac{dP}{dL} \text{sen } \theta = \frac{\pi \cdot D \cdot \text{sen}^2 \theta \cdot h^3}{12\eta} \frac{dP}{dL}$$

Si se considera que la caída de presión a lo largo del husillo es constante y tomando incrementos $\frac{dP}{dL} = \text{cte} = \frac{\Delta P}{L}$, la ecuación (6) puede escribirse:

$$Q = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot (\text{sen } \theta \cdot \cos \theta) \cdot h \cdot N}{2} - \frac{h^3 \cdot \pi \cdot D \cdot \text{sen}^2 \theta \cdot \Delta P}{12 \cdot \eta \cdot L} \quad (8)$$

La ecuación general de la recta, tomando en cuenta a Q en el eje de las ordenadas y a ΔP en el eje de las abscisas, es la siguiente:

$$y = -\frac{h^3 \cdot \pi \cdot D \cdot \text{sen}^2 \theta}{12 \cdot \eta \cdot L} x + \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot (\text{sen} \theta \cdot \text{cos} \theta) \cdot h \cdot N}{2} \quad (9)$$

La ecuación (8) es una recta en una representación de Q frente a ΔP y es conocida como ecuación característica del husillo o recta operativa, Figura 39, y tiene gran utilidad en la predicción del caudal de salida de un extrusor.

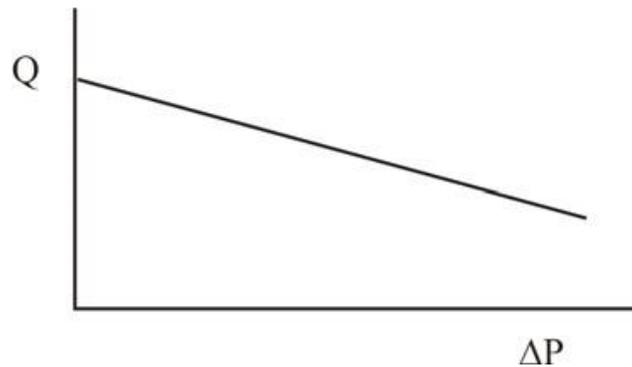


Figura 39 Recta operativa de un husillo

Cuando se trabaja en un proceso de extrusión, interesa que el caudal del material extruido sea lo mayor posible, pero que la pendiente de la recta operativa sea lo menor posible, de modo que pequeñas fluctuaciones en la presión impuesta por la boquilla no afecten demasiado al caudal de material extruido.

De la ecuación (8) se despeja el ΔP , dado que se realizaron medidas experimentales del flujo másico de alimentación, con ajuste de la densidad de las harinas, para la obtención del flujo volumétrico de alimentación, para la obtención del gráfico de la recta operativa del husillo.

$$\Delta P = \frac{\left(\frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot (\text{sen} \theta \cdot \text{cos} \theta) \cdot h \cdot N}{2} - Q \right) (12 \cdot \eta \cdot L)}{h^3 \cdot \pi \cdot D \cdot \text{sen}^2 \theta} \quad (10)$$

Finalmente, se realizaron variaciones al doble y a la mitad de la geometría del husillo para denotar de qué manera afecta en el trazo de la recta operativa y una variación en el ángulo del filete del husillo con la vertical a 90° en el perfil de velocidad (velocidad = f (profundidades del canal), para observar el comportamiento del material dentro del cilindro.

5.3 Determinación de recta de esfuerzo de cizalla y recta característica para una boquilla circular sencilla

5.3.1 Esfuerzo de cizalla frente a velocidad de cizalla en la boquilla

El material fundido presenta diferentes valores de velocidad de cizalla en la boquilla respecto a diferentes valores de esfuerzos de cizalla. El esfuerzo de cizalla (τ) para un material sometido a una determinada velocidad de cizalla (σ), a una temperatura y presión determinada, tomando en cuenta la viscosidad aparente de la harina ($\eta_{aparente}$), se determina con las siguientes ecuaciones (Anguita, 1977):

$$\tau = \eta_{aparente} \cdot \sigma \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{1.27 Q}{R^3} \text{ para boquilla circular sencilla}^* \quad (12)$$

*La boquilla circular sencilla considerada para el cálculo se ilustra en la Figura 40.



Figura 40. Dado de extrusor monohusillo Meelko con boquilla circular sencilla

5.3.2 Recta característica de la boquilla circular sencilla

Para definir un diseño apropiado para el paso del material fundido a través del cuerpo de la boquilla, se debe trazar la recta característica de la boquilla, en este caso es una circular sencilla, con un diámetro interno de 0.5 cm. El diferencial de presión (ΔP) se calcula a partir de las siguientes ecuaciones (Anguita, 1977):

$$\Delta P = \frac{Q \cdot \eta}{\kappa} \quad (13)$$

$$\kappa = \frac{0.26 \cdot R^4}{L} \quad (14)$$

6. Resultados experimentales y análisis de resultados.

6.1 Resultados del análisis de materias primas

Se tomó en cuenta la formulación de alimento para peces del proveedor Meelko, a 1/25 Ton de formulación, como se muestra en la Tabla 1.

Como se indica en la Tabla 17, se muestran los precios y lugar de procedencia de las materias primas obtenidas en el laboratorio, así como la imagen de las mismas, ilustrada en la Tabla 18.

Tabla 17. Precio y lugar de procedencia de las materias primas

| Ingrediente | Precio / kg (\$) | Lugar de procedencia |
|---------------------|------------------|---------------------------------|
| Harina de maíz | 11.33 | Minsa (Grupo Zorro) |
| Harina de pescado | 25.00 | Central de abastos (PA Loc. 27) |
| Harina de trigo | 12.04 | Selecta (Grupo Zorro) |
| Harina de malta | 35.00 | Central de abastos (P2 Loc. 99) |
| Torta de soya | 35.00 | Central de abastos (P2 Loc. 99) |
| Salvado de trigo | 5.00 | Central de abastos (PA) |
| Harina de cebada | 35.00 | Central de abastos (P2 Loc. 99) |
| Aceite de palma | 50.00 | Acramar |
| Harina de alfalfa | 150.00 | Exhal |
| Fosfato monocálcico | 100.00 | Beckarem |
| Vitaminas | 1150.00 | Vitater (Lab. Maver) |

Tabla 18. Materias primas, ordenadas de mayor a menor proporción

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
|  |  |  |  |  |  |
| Harina de maíz | Harina de pescado | Harina de trigo | Harina de malta | Torta de soya | Salvado de trigo |
|  |  |  |  |  | |
| Harina de cebada | Aceite de palma | Harina de alfalfa | Fosfato monocálcico | Vitaminas | |

6.1.1 Resultados análisis de humedad

La primera determinación de las materias primas que se realizó fue la de humedad, como se indica en la Tabla 19. Los análisis se realizaron una sola vez, debido a la sensibilidad del método, y después se calculó el porcentaje de humedad absoluta y el a_w . La actividad de agua (a_w) es una medida del estado de energía del agua en un sistema y fue desarrollada para cuantificar la intensidad con la que el agua se asocia con diversos sólidos o constituyentes no acuosos. Los resultados obtenidos en este análisis son adecuados para la tecnología de extrusión, debido a que se requiere alrededor del 8 % de humedad para que el extrusor sea manejado de manera óptima.

Tabla 19. % HR, % HA y a_w de los ingredientes para alimento para peces

| Ingrediente | Humedad relativa (%) | Humedad absoluta (%) | a_w |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Harina de maíz | 10.30 | 11.48 | 0.103 |
| Harina de pescado | 6.90 | 7.41 | 0.069 |
| Harina de trigo | 13.30 | 15.34 | 0.133 |
| Harina de malta | 10.15 | 11.30 | 0.102 |
| Torta de soya | 6.60 | 7.07 | 0.066 |
| Salvado de trigo | 8.70 | 9.53 | 0.087 |
| Harina de cebada | 6.95 | 7.47 | 0.070 |
| Harina de alfalfa | 3.80 | 3.95 | 0.038 |
| Fosfato monocálcico | 0.15 | 0.15 | 0.015 |
| Vitaminas | 6.30 | 6.72 | 0.063 |

De acuerdo con la Tabla 10 y la Tabla 19, la harina de maíz cumple con la especificación de la NMX-F-046-S-1980, debido a que el límite máximo permitido de humedad es de 11.00 % y el producto contiene 10.30 %.

De acuerdo con la Tabla 16 y la Tabla 19, la harina de pescado cumple con la especificación de la NMX-Y-015-SCFI-2006, debido a que el límite máximo permitido de humedad es de 10.00 % y el producto contiene 6.90 %.

De acuerdo con la Tabla 11 y la Tabla 19, la harina de trigo cumple con la especificación de la NMX-F-007-1982, debido a que el límite máximo permitido de

humedad en harina de trigo grado III (pastas) es de 14.00 % y el producto contiene 13.30 %.

De acuerdo con la Tabla 14 y la Tabla 19, la torta de soya cumple con la especificación de la NMX-F-800-SCFI-2017, debido a que el límite máximo permitido de humedad en soya texturizada a partir de harina desgrasada es de 10.00 % y el producto contiene 6.60 %.

De acuerdo con la Tabla 12 y la Tabla 19, el salvado de trigo cumple con la especificación de la NMX-Y-010-1966, debido a que el límite máximo permitido de humedad es de 11.00 % y el producto contiene 8.70 %.

De acuerdo con la Tabla 13 y la Tabla 19, la harina de cebada cumple con la especificación de la NOM-247-SSA1-2008, debido a que el límite máximo permitido de humedad es de 15.00 % y el producto contiene 6.95 %.

De acuerdo con la Tabla 15 y la Tabla 19, la harina de alfalfa cumple con la especificación de la NMX-Y-305-SCFI-1997, debido a que el límite máximo permitido de humedad (Grado A) es de 11.00 % y el producto contiene 3.80 %.

6.1.2 Resultados análisis de celulosa y lignina

La determinación de celulosa y lignina a las materias primas por el método de Detergente Ácido (ADF) se realizaron por duplicado y se muestran en la Tabla 20 (Van Soest, 1963).

Tabla 20. Porcentaje en base seca de celulosa y lignina en las materias primas

| Ingrediente | Concentración (%) |
|--------------------|--------------------------|
| Harina de alfalfa | 40.12 ± 0.07 |
| Salvado de trigo | 16.47 ± 0.12 |
| Harina de cebada | 11.33 ± 0.10 |
| Harina de maíz | 10.82 ± 0.03 |
| Torta de soya | 6.31 ± 0.09 |
| Harina de trigo | 1.15 ± 0.05 |
| Harina de pescado | 0.87 ± 0.07 |

Se encontró que la materia prima con mayor contenido de celulosa y lignina es la harina de alfalfa (40.12 %) y la que contiene menor contenido es la harina de pescado (0.87 %); los resultados en la harina de malta se omitieron, debido a que

los filtros de los crisoles se saturaban al realizar la prueba, lo cual impedía la reproducibilidad del método.

6.1.3 Resultados análisis de fibra insoluble

Después, se realizó una determinación de fibra insoluble (celulosa, hemicelulosa y lignina) por el método de Detergente Neutro (NDF) y las determinaciones se realizaron por duplicado. En la Tabla 21, se muestran las concentraciones de fibra insoluble de la harina de trigo, la harina de maíz, el salvado de trigo y la harina de alfalfa. En esta, se aprecia que la muestra con concentración mayor de fibra insoluble es la harina de alfalfa (46.66 %) y la materia prima con menor concentración de fibra insoluble es la harina de trigo (1.25 %); se omitieron los resultados obtenidos en la torta de soya, la harina de pescado y la harina de cebada, debido a la saturación de los crisoles, lo cual impedía la reproducibilidad del método (Van Soest, 1967).

Tabla 21. Porcentaje en base seca de fibra en las materias primas para el alimento expandido para peces

| Ingrediente | Concentración calculada (%) | Concentración literatura (%) |
|--------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Harina de maíz | 12.22 ± 0.36 | 7.00 (Etiqueta Minsa) |
| Harina de trigo | 1.25 ± 0.44 | 4.00 (Etiqueta Selecta) |
| Salvado de trigo | 12.86 ± 0.31 | 15.00 (Mullin, W. J., 1992) |
| Harina de alfalfa | 46.66 ± 0.49 | 22.22 (Etiqueta Alfalfa Grass) |
| Harina de pescado | N / D | 1.20 (Windsor, M. L., 2001) |
| Harina de cebada | N / D | 17.00 (Kent, N. L., 1983) |
| Torta de soya | N / D | 14.20 (Abreu, M., et. al., 1991) |

Con respecto a la harina de maíz, la cantidad obtenida (12.22 %) es mayor que la reportada en la etiqueta (7.00 %), por el contrario, en la harina de trigo se obtuvo 1.25 % comparado con el 4.00 % reportado en la etiqueta. De igual manera, en la harina de alfalfa, el valor obtenido es del doble que el reportado (46.66 % obtenido comparado con el 22.22 % reportado en la etiqueta). Esto puede atribuirse a las diferencias entre la muestra y la materia prima reportada por otros autores, además de la sobreestimación por residuos de detergente NDF.

La ventaja en la determinación de fibra insoluble por detergente neutro es que permite la determinación con un método simple y rápido. La gran desventaja es que la fibra soluble se pierde o se subestima en algunos alimentos por la disolución de complejos proteína-fibra. Para mejorar esta determinación, se puede agregar una α -amilasa que digiera a los carbohidratos y obtener un método más reproducible (FAO, 1997).

La diferencia entre el método de detergente neutro y ácido resulta en hemicelulosa, presentado en la Tabla 22. La materia prima con mayor concentración de hemicelulosa es la harina de alfalfa (6.54 %) y la que presenta menor concentración es el salvado de trigo (0.00 %); respecto a este último, se obtuvo una concentración mayor en el detergente ácido que en el detergente neutro, por lo que se estima que la concentración de hemicelulosa es 0.00 %. No se calculó el contenido de hemicelulosa en harina de pescado, harina de cebada, harina de malta y torta de soya, debido al problema relacionado con los filtros.

Tabla 22. Concentración de hemicelulosa, obtenida por la resta de los detergentes neutro y ácido

| Ingrediente | Concentración hemicelulosa (%) |
|--------------------|---------------------------------------|
| Harina de maíz | 1.40 |
| Harina de trigo | 0.10 |
| Salvado de trigo | 0.00 |
| Harina de alfalfa | 6.54 |

6.1.4 *Resultados análisis de proteína*

Finalmente, se realizó una determinación de concentración de proteína en las materias primas, con el método Bio-Rad Protein Assay, basado en el método de Bradford, con un patrón de albúmina de suero bovino. Para esta determinación se utilizaron las aguas madre obtenidas de la hidrólisis ácida para la determinación de celulosa y lignina. Se observó que la metodología empleada sólo era contundente en los resultados de harina de trigo y de maíz, por lo que se realizó extrayendo la proteína hidrolizando con hidróxido de sodio; los análisis se realizaron por duplicado (Bradford, 1976, Hernández, 2008).

Como se indica en la Tabla 23, se obtuvo una mayor concentración de proteína en la torta de soya (67.81 %) y en la que se obtuvo menor concentración fue la harina de cebada (2.72 %). Respecto a lo obtenido en la harina de pescado no era lo esperado respecto a lo reportado (21.31 % frente a 75.90 % reportado), el mismo caso es el de la harina de cebada (2.72 % frente a 12.48 % reportado) y el de la torta de soya (67.81 % frente a 48.30 % reportado). Considerando lo reportado en la literatura internacional, es posible tener variaciones en la reproducibilidad de los resultados, debido al método empleado para la determinación de proteína, además del origen diferente de las materias primas reportadas por los autores, tal es el caso de la harina de pescado (FAO, 1993, Hernández, 2008).

Tabla 23. Concentración obtenida y concentración en la literatura de proteína en las materias primas

| Ingrediente | Concentración obtenida (%) | Concentración literatura (%) |
|--------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Harina de maíz | 10.68 ± 0.12 | 8.00 (Etiqueta Minsa) |
| Harina de trigo | 6.08 ± 0.09 | 10.00 (Etiqueta Selecta) |
| Salvado de trigo | 20.19 ± 0.14 | 17.00 (Mullin, W. J., 1992) |
| Harina de alfalfa | 19.61 ± 0.16 | 27.00 (Etiqueta Alfalfa Grass) |
| Harina de pescado | 21.31 ± 0.07 | 75.90 (Windsor, M. L., 2001) |
| Harina de cebada | 2.72 ± 0.13 | 12.48 (Kent, N. L., 1983) |
| Torta de soya | 67.81 ± 0.26 | 48.30 (Abreu, M., 1991) |

De acuerdo con la Tabla 10 y la Tabla 23, la harina de maíz cumple con la especificación de la NMX-F-046-S-1980, debido a que el límite mínimo permitido de proteína (N x 6.25) es de 8.00 % y la concentración obtenida es de 10.68 %.

De acuerdo con la Tabla 16 y la Tabla 23, la harina de pescado no cumple con la especificación de la NMX-Y-015-SCFI-2006, debido a que el límite mínimo permitido de proteína cruda es de 60.00 % y la concentración obtenida es de 21.31 %; esta variación debida a las materias primas empleadas para su elaboración.

De acuerdo con la Tabla 11 y la Tabla 23, la harina de trigo no cumple con la especificación de la NMX-F-007-1982, debido a que el límite mínimo permitido de proteína (N x 5.7) en harina de trigo grado III (pastas) es de 9.00 % y la concentración obtenida es de 6.08 %.

De acuerdo con la Tabla 14 y la Tabla 23, la torta de soya cumple con la especificación de la NMX-F-800-SCFI-2017, debido a que el límite mínimo permitido de proteína (N x 6.25) en soya texturizada a partir de harina desgrasada es de 48.00 % y la concentración obtenida es de 67.81 %.

De acuerdo con la Tabla 12 y la Tabla 23, el salvado de trigo cumple con la especificación de la NMX-Y-010-1966, debido a que el límite mínimo permitido de proteína cruda es de 14.00 % y la concentración obtenida es de 20.19 %.

De acuerdo con la Tabla 15 y la Tabla 23, la harina de alfalfa no cumple con la especificación de la NMX-Y-305-SCFI-1997, debido a que el límite mínimo permitido de proteína es de 24.00 % y la concentración obtenida es de 19.61 %.

6.2 Resultados perfiles de flujo y velocidad en la zona de compresión del husillo

6.2.1 Resultados del calibrado de la tolva

Se procedió a realizar el calibrado de la tolva con el extrusor monohusillo Meelko MKED040C. Inicialmente se marcaron niveles de velocidad de alimentación, midiendo el flujo másico respecto a la velocidad de alimentación y el análisis se realizó por triplicado. Como se muestra en la Tabla 24, se realizaron cuatro marcas en la perilla de velocidad de la tolva y se pesó el contenido de harina que expulsa tras 1 min de funcionamiento.

Tabla 24. Flujo másico de la tolva del extrusor monohusillo

| Marca | Flujo másico (Q) (kg/h) | Coefficiente de variación (%) |
|-------|-------------------------|-------------------------------|
| 1 | 23.37 ± 1.09 | 4.66 |
| 2 | 38.12 ± 2.54 | 6.66 |
| 3 | 63.30 ± 0.63 | 0.99 |
| 4 | 116.36 ± 4.64 | 3.99 |

La velocidad mínima fue de 23. 37 ± 1.09 kg/h y la velocidad máxima fue de 116. 36 ± 4.64 kg/h. Las variaciones en el flujo másico se deben a los movimientos con los cuales se acciona la perilla, por lo que se sugiere se realicen firmes y sin pausas.

Después, se realizó el cambio de flujo másico a flujo volumétrico, como se indica en la Tabla 25, realizado con la densidad de la harina de maíz (0.51 g/mL) y harina de trigo (0.50 g/mL) (Manobanda, 2017, Sánchez, 2001).

Tabla 25. Flujo volumétrico de la tolva del extrusor monohusillo

| Marca | Flujo volumétrico (Q) (m ³ /s) | | Flujo volumétrico (Q) (m ³ /h) | |
|-------|---|--------------------------|---|--------------------------|
| | Harina de trigo | Harina de maíz | Harina de trigo | Harina de maíz |
| 1 | 1.2983× 10 ⁻⁵ | 1.2729× 10 ⁻⁵ | 4.6740× 10 ⁻² | 4.5824× 10 ⁻² |
| 2 | 2.1178× 10 ⁻⁵ | 2.0763× 10 ⁻⁵ | 7.6240× 10 ⁻² | 7.4745× 10 ⁻² |
| 3 | 3.5167× 10 ⁻⁵ | 3.4477× 10 ⁻⁵ | 1.2660× 10 ⁻¹ | 1.2412× 10 ⁻¹ |
| 4 | 6.4644× 10 ⁻⁵ | 6.3377× 10 ⁻⁵ | 2.3272× 10 ⁻¹ | 2.2816× 10 ⁻¹ |

6.2.2 Resultados de las mediciones del husillo en la zona de compresión

Las medidas del husillo se tomaron de una sección de la zona de compresión, mismas que se ilustran en la Tabla 26.

Tabla 26. Mediciones del husillo en la zona de compresión

| Medición | Abreviatura | Resultado |
|---|-------------|-----------|
| Radio del husillo | R | 0.0200 m |
| Diámetro del husillo | D | 0.0400 m |
| Ángulo del filete del husillo con la vertical | θ | 14° |
| Ancho del canal | w | 0.0125 m |
| Profundidad del canal | h | 0.0058 m |
| Holgura entre el cilindro y el filete del husillo | δ | 0.0003 m |
| Longitud del cilindro | L | 0.1650 m |

6.2.3 Resultados de la recta operativa del husillo (perfil de flujo), tomando como base la harina de maíz y harina de trigo

Después del cálculo de los flujos volumétricos de la tolva ($Q=[\frac{m^3}{s}]$), se procedió al cálculo del diferencial de presiones con la ecuación (10) del modelo, ilustrados en la Tabla 27 y Tabla 28, con el fin de trazar la recta operativa (ecuación (8)) de la harina de maíz y harina de trigo, correspondientes a la Figura 41 y a la Figura 42.

El número de revoluciones a las que gira el husillo considerado es de 8.333 rev/s. El valor de viscosidad para harina de maíz considerado es de 2.584 kg/m·s, a 92°C, obtenido a partir de un reómetro *Anton Paar Physica* modelo MCR1-101 y el valor de viscosidad para harina de trigo considerado es de 0.825 kg/m·s, a 74.85°C, obtenido a partir de un viscoamilograma *Rapid Visco Analyser (RVA)* (Contreras-Jiménez, 2014, Montoya, 2012).

Tabla 27. Resultados del ΔP y Q para harina de maíz

| ΔP (Pa ó $\frac{kg}{m \cdot s^2}$) | Q ($\frac{m^3}{s}$) |
|---|-------------------------|
| 2.7401×10^5 | 1.2729×10^{-5} |
| 2.4537×10^5 | 2.0763×10^{-5} |
| 1.9647×10^5 | 3.4477×10^{-5} |
| 9.3429×10^4 | 6.3377×10^{-5} |

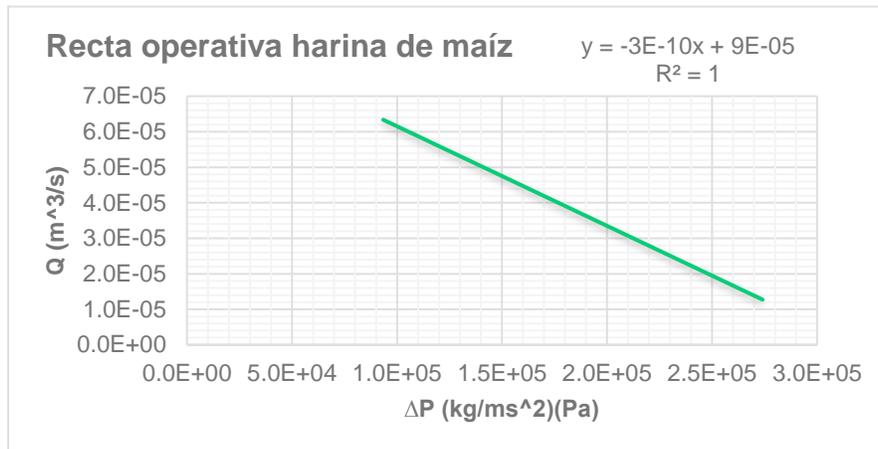


Figura 41. Recta operativa harina de maíz

Tabla 28. Resultados del ΔP y Q para harina de trigo

| ΔP (Pa ó $\frac{kg}{m \cdot s^2}$) | Q ($\frac{m^3}{s}$) |
|---|-------------------------|
| 8.7195×10^4 | 1.2983×10^{-5} |
| 7.7867×10^4 | 2.1178×10^{-5} |
| 6.1942×10^4 | 3.5167×10^{-5} |
| 2.8486×10^4 | 6.4644×10^{-5} |

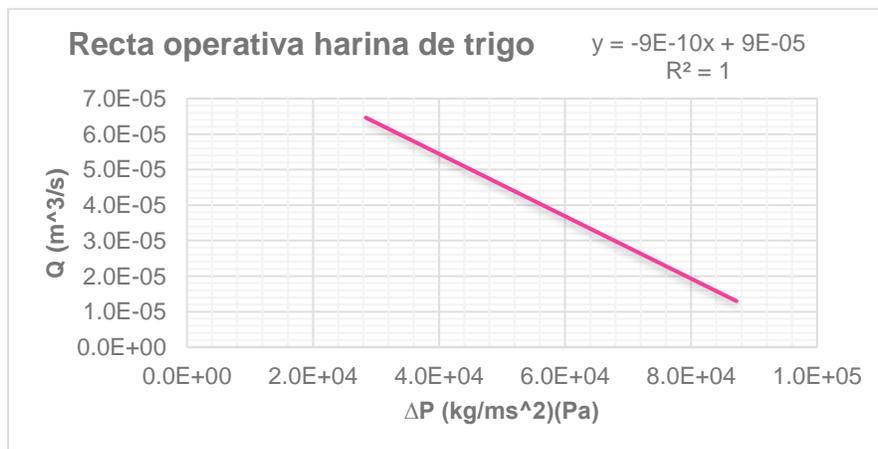


Figura 42. Recta operativa para harina de trigo

Las rectas operativas de harina de maíz y harina de trigo presentan una recta con pendiente negativa. Conforme se va disminuyendo el flujo de material en el extrusor, aumenta el diferencial de presión dentro del equipo; tomando en cuenta estos flujos de alimentación, habrá pequeñas fluctuaciones en la presión, que no afectarán significativamente el caudal de alimentación.

6.2.4 Resultados de las modificaciones en los parámetros de la geometría del husillo en la recta operativa

Primero, se realizaron modificaciones en el parámetro del diámetro del husillo (D), como se ilustra en la Tabla 29, para identificar de qué manera afecta el parámetro en la recta operativa. Las rectas operativas modificadas se encuentran en el Anexo 1, de la Figura 53 a la Figura 56.

Tabla 29. Modificaciones diámetro del husillo al doble y a la mitad

| Harina | Diámetro del husillo (D) | | |
|--------|--|--|--|
| | D=0.02 m | D=0.04 m (real) | D=0.08 m |
| Maíz | $y = -1 \times 10^{-10}x + 2 \times 10^{-5}$ | $y = -3 \times 10^{-10}x + 9 \times 10^{-5}$ | $y = -6 \times 10^{-10}x + 4 \times 10^{-4}$ |
| Trigo | $y = -4 \times 10^{-10}x + 2 \times 10^{-5}$ | $y = -9 \times 10^{-10}x + 9 \times 10^{-5}$ | $y = -2 \times 10^{-9}x + 4 \times 10^{-4}$ |

De acuerdo a los resultados obtenidos y tomando en cuenta la ecuación de la recta de la ecuación (9), la ordenada al origen es potencialmente proporcional al incremento del diámetro del husillo, recorriendo la gráfica hacia arriba, y el valor absoluto de la pendiente, además de que varía de acuerdo a la viscosidad de la harina, es directamente proporcional al incremento del diámetro, inclinando hacia la derecha la pendiente de la recta.

Después, se realizaron modificaciones en el parámetro de la profundidad del canal (h), como se ilustra en la Tabla 30, para identificar de qué manera afecta el parámetro en la recta operativa. Las rectas operativas modificadas se encuentran en el Anexo 1, de la Figura 57 a la Figura 60.

Tabla 30. Modificaciones profundidad del canal al doble y a la mitad

| Harina | Profundidad del canal (h) | | |
|--------|--|--|---|
| | h=0.0029 m | h=0.0058 m (real) | h=0.0116 m |
| Maíz | $y = -4 \times 10^{-11}x + 4 \times 10^{-5}$ | $y = -3 \times 10^{-10}x + 9 \times 10^{-5}$ | $y = -2 \times 10^{-9}x + 2 \times 10^{-4}$ |
| Trigo | $y = -1 \times 10^{-10}x + 4 \times 10^{-5}$ | $y = -9 \times 10^{-10}x + 9 \times 10^{-5}$ | $y = -7 \times 10^{-9}x + 2 \times 10^{-4}$ |

De acuerdo a los resultados obtenidos y tomando en cuenta la ecuación de la recta de la ecuación (9), la ordenada al origen es directamente proporcional al incremento de la profundidad del canal, recorriendo la gráfica hacia arriba, y el valor absoluto de la pendiente, además de que varía de acuerdo a la viscosidad de la harina, es potencialmente proporcional al incremento en la profundidad del canal, inclinando hacia la derecha la gráfica.

Además, se realizaron modificaciones en el parámetro del número de revoluciones a las que gira el husillo (N), como se ilustra en la Tabla 31, para identificar de qué manera afecta el parámetro en la recta operativa. Las rectas operativas modificadas se encuentran en el Anexo 1, de la Figura 61 a la Figura 64.

Tabla 31. Modificaciones número de revoluciones a las que gira el husillo al doble y a la mitad

| Harina | Número de revoluciones a las que gira el husillo (N) | | |
|--------|--|--|--|
| | N=4.1667 rev/s | N=8.3333 rev/s (real) | N=16.6667 rev/s |
| Maíz | $y = -3 \times 10^{-10}x + 4 \times 10^{-5}$ | $y = -3 \times 10^{-10}x + 9 \times 10^{-5}$ | $y = -3 \times 10^{-10}x + 2 \times 10^{-4}$ |
| Trigo | $y = -9 \times 10^{-10}x + 4 \times 10^{-5}$ | $y = -9 \times 10^{-10}x + 9 \times 10^{-5}$ | $y = -9 \times 10^{-10}x + 2 \times 10^{-4}$ |

De acuerdo a los resultados obtenidos y tomando en cuenta la ecuación de la recta de la ecuación (9), la ordenada al origen es directamente proporcional al incremento de la profundidad del canal, recorriendo la gráfica hacia arriba, y el valor de la pendiente no se ve modificada con el incremento de número de revoluciones a las que gira el husillo, debido a que no depende de este término.

Por consiguiente, se realizaron modificaciones en el parámetro de la longitud del cilindro en la zona de compresión (L), como se ilustra en la Tabla 32, para identificar de qué manera afecta el parámetro en la recta operativa. Las rectas operativas modificadas se encuentran en el Anexo 1, de la Figura 65 a la Figura 68.

Tabla 32. Modificaciones longitud del cilindro al doble y a la mitad

| Harina | Longitud del cilindro en la zona de compresión (L) | | |
|--------|--|--|--|
| | L=0.0825 m | L=0.1650 m (real) | L=0.3300 m |
| Maíz | $y = -6 \times 10^{-10}x + 9 \times 10^{-5}$ | $y = -3 \times 10^{-10}x + 9 \times 10^{-5}$ | $y = -1 \times 10^{-10}x + 9 \times 10^{-5}$ |
| Trigo | $y = -2 \times 10^{-9}x + 9 \times 10^{-5}$ | $y = -9 \times 10^{-10}x + 9 \times 10^{-5}$ | $y = -4 \times 10^{-10}x + 9 \times 10^{-5}$ |

De acuerdo a los resultados obtenidos y tomando en cuenta la ecuación de la recta de la ecuación (9), la ordenada al origen no se ve modificada con el incremento de la longitud del cilindro en la zona de compresión, debido a que no depende de este término, y el valor absoluto de la pendiente, además de que varía de acuerdo a la viscosidad de la harina, es inversamente proporcional al incremento en la longitud del cilindro en la zona de compresión, inclinando la pendiente hacia la izquierda.

Finalmente, se realizaron modificaciones en el parámetro del ángulo del filete del husillo con la vertical (θ), como se ilustra en la Tabla 33, para identificar de qué manera afecta el parámetro en la recta operativa. Las rectas operativas modificadas se encuentran en el Anexo 1, de la Figura 69 a la Figura 72.

Tabla 33. Modificaciones ángulo al doble y a la mitad

| Harina | Ángulo del filete del husillo con la vertical(θ) | | |
|--------|---|--|---|
| | $\theta=7^\circ$ | $\theta=14^\circ$ (real) | $\theta=28^\circ$ |
| Maíz | $y = -7 \times 10^{-11}x + 5 \times 10^{-5}$ | $y = -3 \times 10^{-10}x + 9 \times 10^{-5}$ | $y = -1 \times 10^{-9}x + 2 \times 10^{-4}$ |
| Trigo | $y = -2 \times 10^{-10}x + 5 \times 10^{-5}$ | $y = -9 \times 10^{-10}x + 9 \times 10^{-5}$ | $y = -3 \times 10^{-9}x + 2 \times 10^{-4}$ |

De acuerdo a los resultados obtenidos y tomando en cuenta la ecuación de la recta de la ecuación (9), la ordenada al origen no se ve modificada con el incremento del ángulo del filete del husillo con la vertical, y el valor absoluto de la pendiente, además de que varía de acuerdo a la viscosidad de la harina, es directamente proporcional al incremento del ángulo del filete del husillo con la vertical, inclinando la pendiente hacia la izquierda.

6.2.5 Resultados del perfil de velocidad del husillo, tomando como base la harina de maíz y la harina de trigo.

De acuerdo a los ΔP calculados para la recta operativa, se toma el valor de la presión en la Marca 1, correspondiente a 8.7195×10^4 Pa para harina de trigo y de 2.7401×10^4 Pa para harina de maíz. Esto para tomarlo en consideración con la ecuación (4) del modelo matemático, además de la ecuación (5) para el cálculo de la velocidad lineal periférica del cilindro. Los resultados obtenidos se obtienen tomando en cuenta profundidades del canal desde que $y=0$ hasta $y=h$.

El número de revoluciones a las que gira el husillo considerado es de 8.333 rev/s. El valor de viscosidad para harina de maíz considerado es de 2.584 kg/m·s, a 92°C,

obtenido a partir de un reómetro *Anton Paar Physica* modelo MCR1-101 y el valor de viscosidad para harina de trigo considerado es de 0.825 kg/m·s, a 74.85°C, obtenido a partir de un viscoamilograma *Rapid Visco Analyser (RVA)* (Contreras-Jiménez, 2014, Montoya, 2012).

A continuación, se ilustran los resultados de la velocidad para harina de maíz en la Tabla 34 y Figura 43.

Tabla 34. Resultados velocidades de rotación del husillo para harina de maíz

| Velocidad (m/s) | Profundidad del canal (m) | Velocidad (m/s) | Profundidad del canal (m) |
|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|
| 0.0000 | 0.0000 | 0.2556 | 0.0030 |
| 0.0007 | 0.0004 | 0.3334 | 0.0034 |
| 0.0116 | 0.0008 | 0.4215 | 0.0038 |
| 0.0209 | 0.0010 | 0.4694 | 0.0040 |
| 0.0473 | 0.0014 | 0.5729 | 0.0042 |
| 0.0840 | 0.0018 | 0.6867 | 0.0048 |
| 0.1062 | 0.0020 | 0.7474 | 0.0050 |
| 0.1582 | 0.0024 | 0.8766 | 0.0054 |
| 0.2206 | 0.0028 | 1.0161 | 0.0058 |

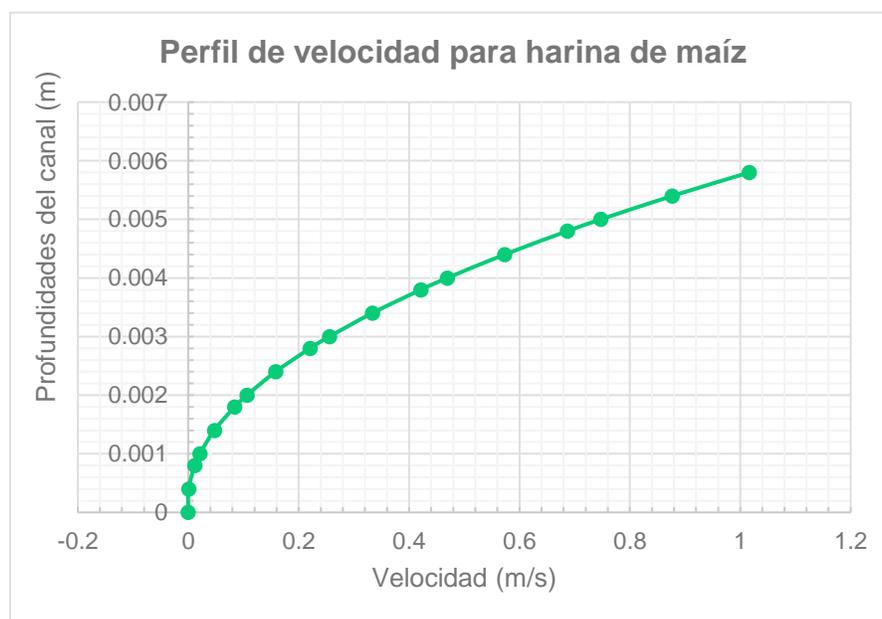


Figura 43. Perfil de velocidad del husillo para harina de maíz

La harina de maíz presenta solamente velocidad de arrastre, lo que produciría una buena extrusión con un flujo de alimentación correspondiente a $1.2729 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, además de que no hay restricción impuesta por la boquilla.

Por consiguiente, se ilustran los resultados de la velocidad para harina de trigo en la Tabla 35 y Figura 44.

Tabla 35. Resultados velocidades de rotación del husillo para harina de trigo

| Velocidad (m/s) | Profundidad del canal (m) | Velocidad (m/s) | Profundidad del canal (m) |
|-----------------|---------------------------|-----------------|---------------------------|
| 0.0000 | 0.0000 | -2.1647 | 0.0030 |
| -0.6217 | 0.0004 | -2.0178 | 0.0034 |
| -1.1410 | 0.0008 | -1.7684 | 0.0038 |
| -1.3621 | 0.0010 | -1.6052 | 0.0040 |
| -1.7276 | 0.0014 | -1.2021 | 0.0042 |
| -1.9906 | 0.0018 | -0.6964 | 0.0048 |
| -2.0837 | 0.0020 | -0.4052 | 0.0050 |
| -2.1930 | 0.0024 | 0.2542 | 0.0054 |
| -2.1998 | 0.0028 | 1.0161 | 0.0058 |

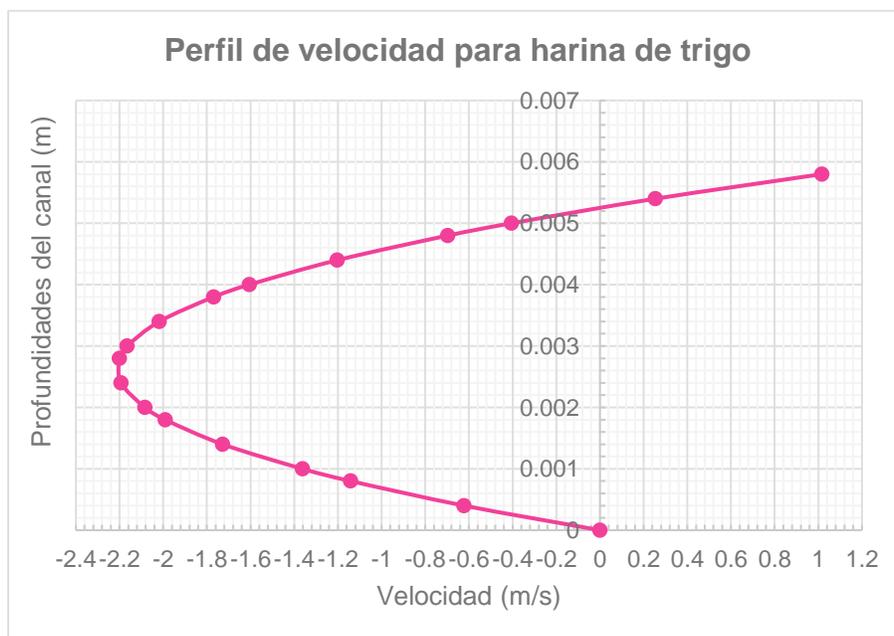


Figura 44. Perfil de velocidad del husillo para harina de trigo

La harina de trigo presenta alta velocidad de retroceso en el husillo, generada por la diferencia de presión producida en la boquilla, originando estancamiento en la zona de compresión con un caudal de alimentación de la Marca 1, por lo que se requiere aumentar el caudal, como se indica en la Figura 45.

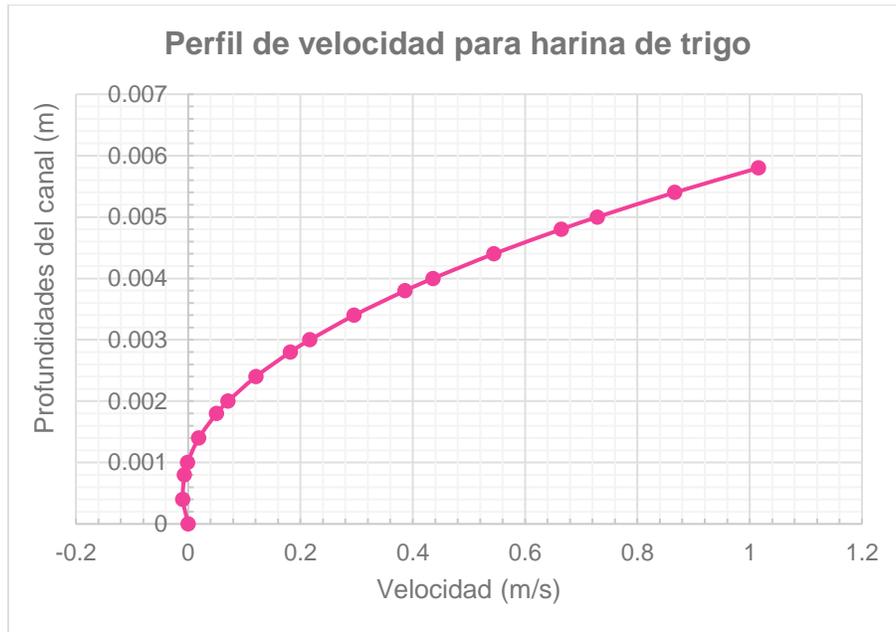


Figura 45. Perfil de velocidad ideal del husillo para harina de trigo

El perfil de velocidad ideal del husillo para harina de trigo es con un flujo de $8.0796 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$, correspondiente a una presión de $1 \times 10^4 \frac{kg}{m \cdot s^2}$.

6.2.6 Resultados de la modificación del ángulo del filete para el perfil de velocidad

Respecto al apartado 1.2.2, se menciona que con un ángulo del filete del husillo con la vertical a 90° , se da la eficiencia máxima, pero el material no avanzaría, por lo que se procedió a realizar las gráficas para harina de maíz y de trigo, referidas en la Figura 46 y Figura 47 (Beltrán, 2012).

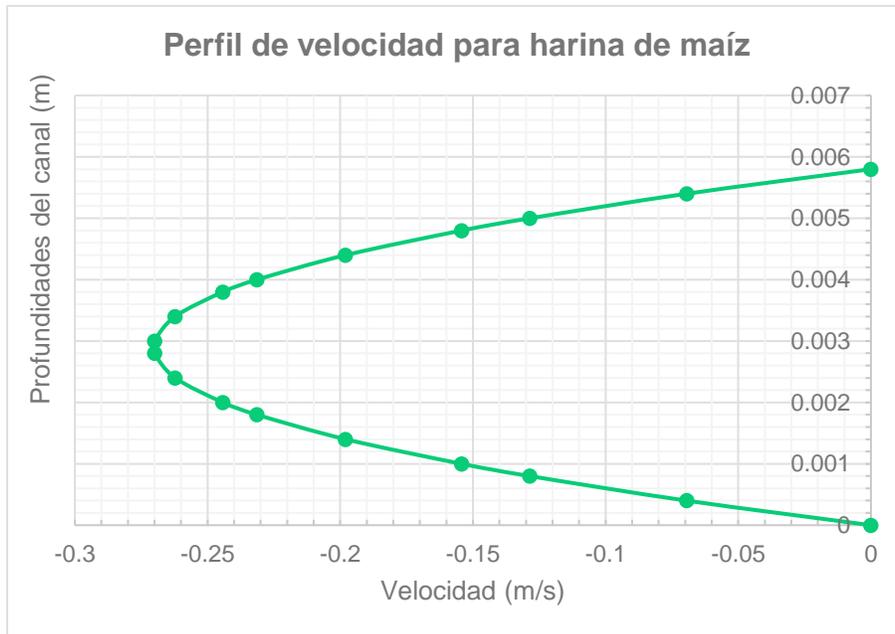


Figura 46. Perfil de velocidad del husillo para harina de maíz con $\theta=90^\circ$

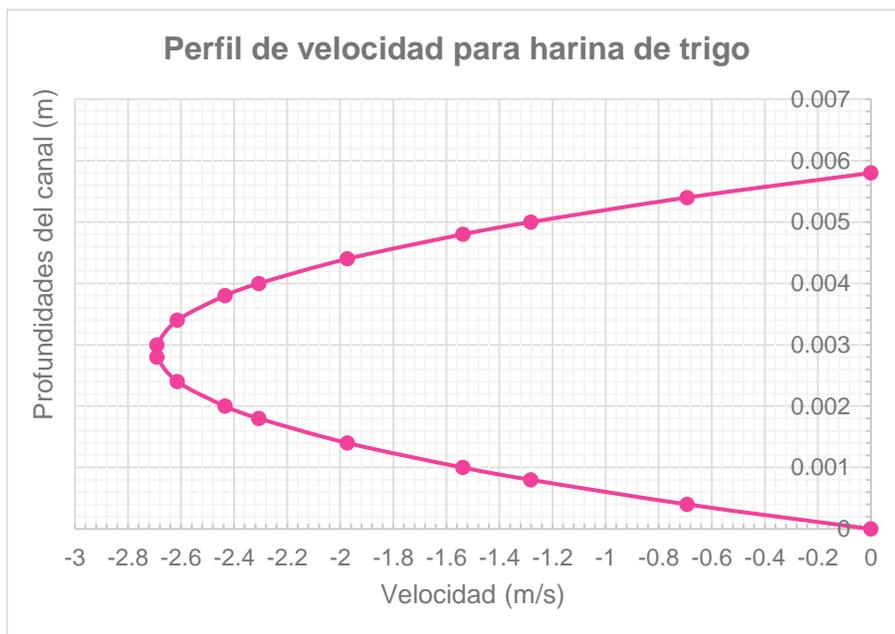


Figura 47. Perfil de velocidad del husillo para harina de trigo con $\theta=90^\circ$

Las gráficas para harina de maíz y para harina de trigo muestran un aumento significativo en la velocidad de retroceso, lo que provocaría que el material no fluyera a través del canal, provocando su retención en el extrusor.

6.3 Resultados de la determinación de la recta de esfuerzo de cizalla y recta característica para una boquilla circular sencilla

6.3.1 Resultados de la recta de esfuerzo de cizalla, tomando en cuenta harina de trigo y harina de maíz

Para el cálculo del esfuerzo de cizalla (τ) frente a la velocidad de cizalla (σ), ecuaciones (11) y (12), se tomaron en cuenta los flujos obtenidos de las rectas operativas para harina de maíz y harina de trigo. El valor considerado del diámetro interno de la boquilla circular sencilla es de 0.5 cm. El valor de viscosidad para harina de maíz considerado es de 2.584 kg/m·s, a 92°C, obtenido a partir de un reómetro *Anton Paar Physica* modelo MCR1-101, y el valor de viscosidad para harina de trigo considerado es de 0.825 kg/m·s, a 74.85°C, obtenido a partir de un viscoamilograma *Rapid Visco Analyser (RVA)* (Contreras-Jiménez, 2014, Montoya, 2012). Los resultados para harina de maíz se ilustran en la Tabla 36 y Figura 48 y los resultados para harina de trigo se ilustran en la Tabla 37 y Figura 49.

Tabla 36. Resultados σ y τ para harina de maíz

| Velocidad de cizalla (σ) (1/s) | Esfuerzo de cizalla (τ) (Pa kg/m s ²) |
|---|--|
| 1034.5969 | 2673.3983 |
| 1687.5760 | 4360.6964 |
| 2802.2987 | 7241.1398 |
| 5151.2744 | 13310.8930 |

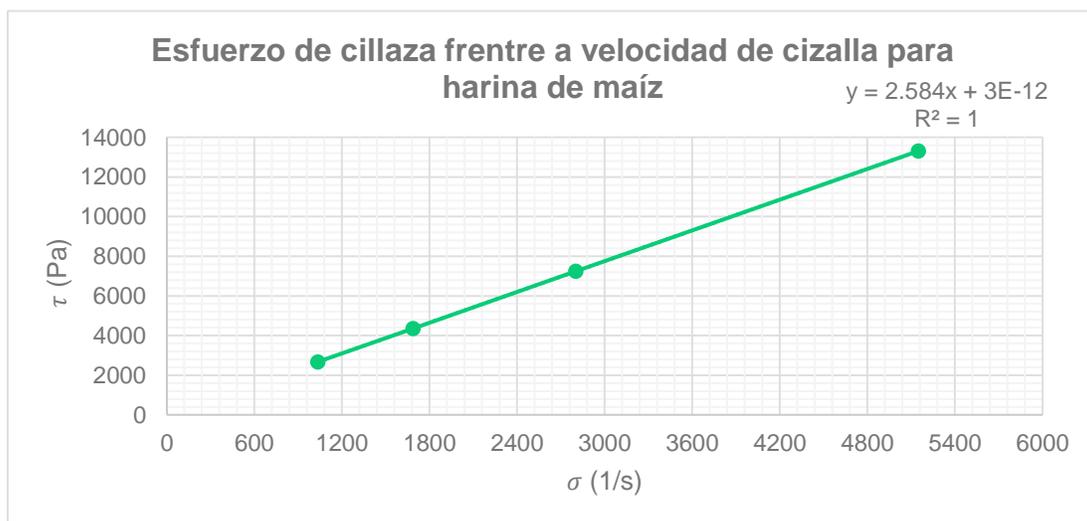


Figura 48. Esfuerzo de cizalla frente a velocidad de cizalla para harina de maíz

Tabla 37. Resultados σ y τ para harina de trigo

| Velocidad de cizalla (σ) (1/s) | Esfuerzo de cizalla (τ) (Pa kg/m s ²) |
|---|--|
| 1055.2853 | 870.6104 |
| 1721.3298 | 1420.0971 |
| 2858.3467 | 2358.1360 |
| 5254.3004 | 4334.7979 |

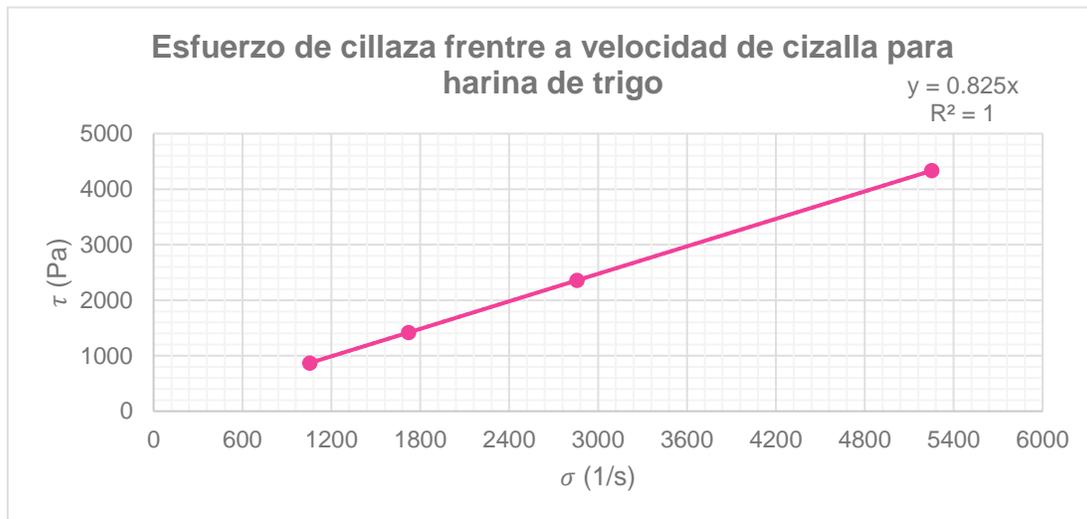


Figura 49. Esfuerzo de cizalla frente a velocidad de cizalla para harina de trigo

Si aumenta el esfuerzo de cizalla, aumenta la velocidad de cizalla, por lo que aumenta la temperatura del material y, a consecuencia, disminuye la viscosidad. Estas gráficas ejemplifican el esfuerzo al que está sometida la boquilla, esto con el objetivo de tomarlo en cuenta para el diseño de la misma.

6.3.2 Resultados de la recta característica de la boquilla circular sencilla, tomando como base harina de maíz y harina de trigo

Para el cálculo de la recta característica de la boquilla circular sencilla, ecuaciones (13) y (14), se tomaron en cuenta los flujos obtenidos de las rectas operativas para harina de maíz y harina de trigo. El valor considerado del diámetro interno de la boquilla circular sencilla es de 0.5 cm. El valor de viscosidad para harina de maíz considerado es de 2.584 kg/m·s, a 92°C, obtenido a partir de un reómetro *Anton Paar Physica* modelo MCR1-101, y el valor de viscosidad para harina de trigo considerado es de 0.825 kg/m·s, a 74.85°C, obtenido a partir de un viscoamilograma

Rapid Visco Analyser (RVA) (Contreras-Jiménez, 2014, Montoya, 2012). Los resultados para harina de maíz se ilustran en la Tabla 38 y Figura 50 y los resultados para harina de trigo se ilustran en la Tabla 39 y Figura 51.

Tabla 38. Resultados ΔP y Q para harina de maíz

| ΔP (Pa ó $\frac{kg}{m \cdot s^2}$) | Q ($\frac{m^3}{s}$) |
|---|-------------------------|
| 323.8520 | 1.2729×10^{-5} |
| 528.2491 | 2.0763×10^{-5} |
| 877.1823 | 3.4477×10^{-5} |
| 1612.4643 | 6.3377×10^{-5} |

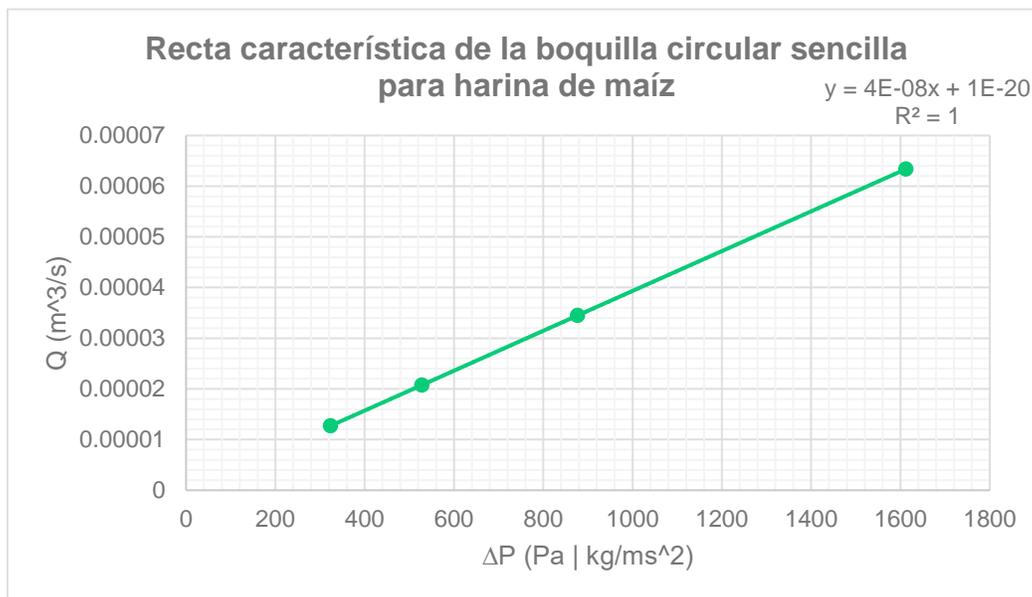


Figura 50. Recta característica de la boquilla circular sencilla para harina de maíz

Tabla 39. Resultados ΔP y Q para harina de trigo

| ΔP (Pa ó $\frac{kg}{m \cdot s^2}$) | Q ($\frac{m^3}{s}$) |
|---|-------------------------|
| 105.4646 | 1.2983×10^{-5} |
| 172.0287 | 2.1178×10^{-5} |
| 285.6615 | 3.5167×10^{-5} |
| 525.1118 | 6.4644×10^{-5} |

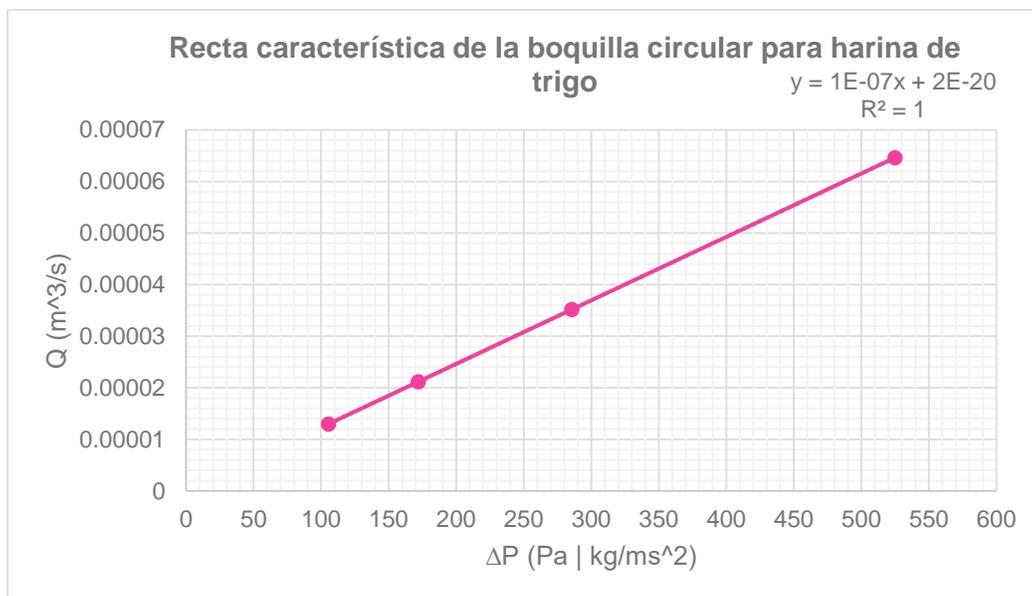


Figura 51. Recta característica de la boquilla circular sencilla para harina de trigo

Para este análisis, se deben comparar las diferenciales de presión obtenidas en la recta operativa con las obtenidas en la recta característica de la boquilla circular sencilla, ilustradas en la Tabla 40.

Tabla 40. Valores de ΔP obtenidos en recta operativa y recta característica de la boquilla circular sencilla

| Marca | Valores ΔP harina de maíz | | Valores ΔP harina de trigo | |
|-------|-----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| | Recta operativa (Pa) | Recta boquilla circular sencilla (Pa) | Recta operativa (Pa) | Recta boquilla circular sencilla (Pa) |
| 1 | 2.7401×10^5 | 323.8520 | 8.7195×10^4 | 105.4646 |
| 2 | 2.4537×10^5 | 528.2491 | 7.7867×10^4 | 172.0287 |
| 3 | 1.9647×10^5 | 877.1823 | 6.1942×10^4 | 285.6615 |
| 4 | 9.3429×10^4 | 1612.4643 | 2.8486×10^4 | 525.1118 |

Los diferenciales de presión de la recta operativa en la zona de dosificación, son mucho mayores que los diferenciales de presión de la recta característica de la boquilla circular sencilla, por lo que el flujo de salida del material será constante, denotado por la caída de presión, para así llegar a las cuchillas del extrusor, siendo cortados a una velocidad programable, indicado en la Figura 52.

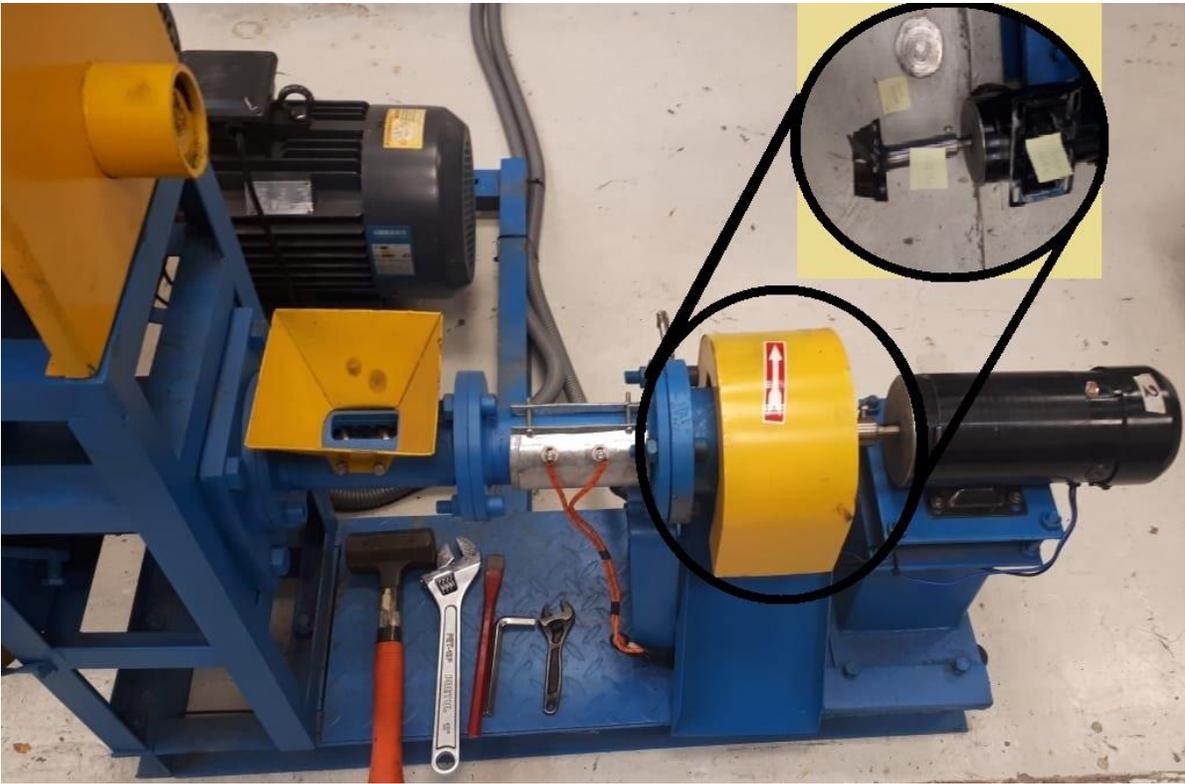


Figura 52. Localización de la cuchilla del extrusor monohusillo Meelko

7. Conclusiones.

- Respecto al análisis de materias primas, todas las harinas cumplen con las especificaciones de las normas mexicanas aplicables, exceptuando a la harina de pescado, que no cumple con la especificación de proteína mínima de 60 % de la NMX-Y-015-SCFI-2006, la harina de trigo, que no cumple con la especificación de proteína para trigo grado III de mínimo 9 % de la NMX-F-007-1982, ni la harina de alfalfa, que no cumple con la especificación mínima de proteína de 24 % de la NMX-Y-305-SCFI-1997.
- El husillo es un elemento importante en el proceso de extrusión, debido a que contribuye en el transporte, calentamiento, fundición y mezclado, proporcionando estabilidad en el proceso y una buena calidad en el producto, razón por la cual se toma en cuenta la geometría del mismo para los gráficos de velocidad y flujo.
- El extrusor, con un ángulo del filete del husillo con la vertical a 90° , se obtiene la eficiencia máxima, pero el material no fluye por el canal, provocado por el gran aumento de la velocidad de retroceso.
- En el proceso de extrusión, el almidón presente en las materias primas se gelatiniza, produciendo masas viscosas, y las proteínas presentes forman puentes disulfuro, se modifica la estructura cuaternaria de la proteína, se rompen las interacciones hidrofóbicas y se provoca la formación de puentes de hidrógeno, provocando la desnaturalización y gelificación.
- En la recta operativa, es deseable que el flujo (Q) sea lo mayor posible y la pendiente de la recta lo menor posible, para evitar que las fluctuaciones en la presión afecten el caudal de alimentación.
- Respecto a las modificaciones en la geometría del husillo, se concluye que el incremento del diámetro del husillo (D) es potencialmente proporcional a la ordenada al origen y es directamente proporcional al valor absoluto de la pendiente de la recta operativa; el incremento en la profundidad del canal (h) es directamente proporcional a la ordenada al origen y es potencialmente proporcional al valor absoluto de la pendiente de la recta operativa; el incremento del número de revoluciones a las que gira el husillo es

directamente proporcional a la ordenada al origen de la recta operativa; el incremento en la longitud del cilindro en la zona de compresión es inversamente proporcional al valor absoluto de la pendiente de la recta operativa; y el incremento en el ángulo del filete es directamente proporcional al valor absoluto de la pendiente de la recta operativa.

- Respecto al perfil de velocidad, la harina de maíz, con un flujo de alimentación correspondiente a $1.2729 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, presenta únicamente velocidad de arrastre, provocando excelente fluidez del material por el extrusor; la harina de trigo, con un flujo de alimentación correspondiente a $8.0796 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$, presenta baja velocidad de retroceso, produciendo buena fluidez del material a través del canal.
- Respecto a la recta de esfuerzo de cizalla con velocidad de cizalla, se concluye que el aumento del esfuerzo de cizalla es directamente proporcional a la velocidad de cizalla y a la temperatura del material e inversamente proporcional a la viscosidad del material. Los esfuerzos a los que está sometida la boquilla, se toman en consideración para el diseño de la misma.
- Respecto a la recta característica de la boquilla circular sencilla, se concluye que la presión en la zona de dosificación es mucho mayor que la presión en la zona de la boquilla, por lo que la disminución de la diferencial de la presión se debe al flujo del material por la salida del dado, adecuado para la obtención de un producto extruido.

8. Referencias.

- Abreu, M., et. al., 1991. Calidad proteica de spaghetti suplementados con torta de soya y soya integral extruida. *Revista Cubana Alimentaria y de Nutrición*, 5 (1), 35.
- Achaya, K., Hamed, M., Andah, A., Beare, J., Bieber, M., et. al., 1997. Elaboración y refinado de aceites comestibles. **En:** Achaya, K., Hamed, M., Andah, A., Beare, J., Bieber, M., et. al., 1997. *Grasas y aceites en la nutrición humana*. Roma: Estudio FAO Alimentación y Nutrición 57, Cap. 5.
- Aditivos alimentarios, 2021. *E341i-Fosfato monocálcico*. [Listado oficial de aditivos alimentarios] (Actualizado a 2021). Disponible en: <https://www.aditivos-alimentarios.com/2016/01/E341i.html> [13/05/2021].
- AGROCOLANTA, 2021. *Portafolio de productos: Materias primas – Torta de soya*. [Proveedor] (Actualizado a 2021). Disponible en: <https://www.agrocolanta.com/productos/materias-primas/torta-de-soya/> [06/01/2021].
- Agromat, 2014. *Alfalfa Harina*. [Proveedor] (Actualizado al 2014). Disponible en: <https://www.agromat.com.co/productos-de-origen-vegetal/harina-de-alfalfa/#:~:text=La%20harina%20de%20alfalfa%20requiere,la%20inclusi%C3%B3n%20en%20alimentos%20balanceados>. [11/01/2021].
- Ahmed, K., Shoaib, M., Akhtar, M., Iqbal, Z., 2014. Chemical Analysis of different cereals to access Nutritional Components Vital for Human Health. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*. 6,61-67.
- American Chemical Society, 2021. *Substance Detail: Oleic acid, Linoleic acid and Linolenic acid*. [Base de datos]. Disponible en: <https://scifinder-n.cas.org/searchDetail/substance/60d6268e9ab7ea1bd7fce037/substanceDetails> [25/06/2021].
- Anguita, R., 1977. *Extrusión de plásticos. Teoría y equipos. Parte 1*. Madrid: H. Blume.
- AUNAP, 2017. *Guía de seguimiento, control y vigilancia. Actividad pesquera marina en Colombia* [Gobierno de Colombia]. Disponible en:

<https://www.guiarecursospesqueros.org/lineas-caladas-palangres-calados/>
[12/06/2021].

- A&D Company, 2004. *Moisture Analyser. Instruction Manual MF-50* [Proveedor]. Disponible en: <http://www.and-store.com/assets/includes/pdf.asp?uploadid=1740&filename=Instruction%20Manual> [18/02/2020].
- Beltrán, M. y Marcilla, A. 2012. *Extrusión. Tecnología de polímeros: Procesado y propiedades*. Alicante: Publicaciones Universidad de Alicante, capítulo 4.
- Beltrán, M. y Marcilla, A. 2012. *Modelado de la zona de dosificación. Tecnología de polímeros: Procesado y propiedades*. Alicante: Publicaciones Universidad de Alicante, capítulo 5.
- Birt, D., et al., 2013. Resistant Starch: Promise for Improving Human Health. *Advances in Nutrition*,4, 587-601.
- Bonavia, D., 2013. *Maize. Origin, Domestication, and its role in the development of culture*. New York: Cambridge University Press.
- Bradford, 1976. *Bio-Rad Protein Assay*. [Proveedor]. Disponible en: <http://www.bio-rad.com/webroot/web/pdf/lsr/literature/LIT33.pdf> [01/03/2020].
- Bradford M.M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding, *Anal Biochem*, 72, 248–254.
- Cabezas, C., Hernández, B., Vargas, M., 2016. Azúcares adicionados a los alimentos: efectos en la salud y regulación mundial. *Revista Facultad de Medicina*.64 (2), 319-329.
- Cabezas-Zábala, C., Hernández, B. y Vargas, M., 2016. Aceites y grasas: efectos en la salud y regulación mundial. *Revista Facultad de Medicina*. 64 (4), 761-768.
- Callejo, 2002. *Industrias de Cereales y Derivados*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

- Campomanes, D., 2008. *Calidad en Soja*. [Artículos técnicos] (Actualizado al 22/02/2008). Disponible en:
<https://www.engormix.com/agricultura/articulos/calidad-en-soja-t27465.htm>
[12/12/2020].
- Carreira, I., 2019. *Todo lo que debes saber sobre harinas* [Sociedad Cooperativa Simbiosis]. Disponible en:
<https://www.cooperativasimbiosis.com/harinas/> [02/09/2020].
- Carvajal, G., 2019. *Informe técnico sobre la harina de pescado y adulteraciones*. [Universidad Latinoamericana]. Disponible en:
http://aprendeonline.udea.edu.co/lms/moodle/pluginfile.php/44609/mod_resource/content/0/INFORME_TECNICO SOBRE LA HARINA DE PESCA DO Y ADULTERACIONES.pdf [12/06/2021].
- Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA), 2018. *Produce acuacultura mexicana más de 400 mil toneladas de pescados y mariscos* [Gobierno de México] (Actualizado al 27/08/2018). Disponible en:
<https://www.gob.mx/conapesca/prensa/produce-acuacultura-mexicana-mas-de-400-mil-toneladas-de-pescados-y-mariscos-172466#:~:text=Actualmente%2C%20las%20principales%20especies%20de,%2C%20Sinaloa%2C%20Jalisco%20y%20Veracruz> [12/10/2020].
- Conca, A., 2019. *Maíz*. Clase de Tecnología de Cereales Semestre 2019-1.
- Contreras-Jiménez, B., Morales-Sánchez, E., Reyes-Vega, M. y Gaytán, M., 2014. Propiedades funcionales de harinas de maíz nixtamalizado obtenidas por extrusión a baja temperatura. *CyTA - Journal of Food*, 12 (3), 263-270.
- Córdova, E. y Torres, J., 2015. *Evaluación de dos variedades de alfalfa (Medicago sativa L.) a través de distancias de siembra y fertilizantes*. [Tesis] (Actualizado al 2015). Disponible en:
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/3718/1/T-UCSG-PRE-TEC-AGRO-56.pdf> [12/06/2021].
- Delgado, C., Olías, R., Jiménez, J. y Clemente, A., 2016. Aspectos de las legumbres nutricionales y beneficiosos para la salud humana. *ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura*, 192(779), a313.

- EcoAndes, 2020. *Ficha técnica semillas de alfalfa*. [Proveedor] (Actualizado al 31/05/2020). Disponible en: <https://productosecoandes.com/wp-content/uploads/2020/06/ALFALFA-SEMILLAS-FT-EA.pdf> [31/03/2021].
- Emin, M., Teumer, T., Schmitt, W., Radle, M., Schuchmann, H., 2016. Measurement of the true melt temperature in a twin-screw extrusion processing of starch-based matrices via infrared sensor. *Journal of food engineering*, 170, 119-124.
- Engormix, 2017. *Extrusor autógeno sin calentamiento o enfriamiento*. [Proveedor]. (Actualizado al 28/04/2017). Disponible en: <https://www.engormix.com/balanceados/articulos/los-efectos-extrusion-%20ingredientes-t40771.htm> [30/08/2020].
- FAO, 1993. *Documento preparado para el Proyecto GCP/RLA/102/ITA Apoyo a las Actividades Regionales de Acuicultura para América Latina y el Caribe (AQUILA II). 3. Análisis proximales*, [Sitio web de la ONU] (Actualizado al 05/1993). Disponible en: http://www.fao.org/3/AB489S/AB489S03.htm?fbclid=IwAR2pZ7_2IOjxgMTIG9mXbV6rR6fn-xE_2HO-S2VlpPuP3_bQY4Dde5D9sol [17/03/2020].
- FAO, 1997. *Producción y manejo de datos de composición química de alimentos en nutrición. Capítulo 16: Análisis de fibra dietética*. [Sitio web de la ONU]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/AH833S18.htm?fbclid=IwAR3naof6p1p6sTH33PuGquz03wnX1WHfABHk3akJ7WoizcvEfeMjkNbK9xY> [09/03/2020].
- FAO, 2003. *Acuicultura: principales conceptos y definiciones*. [Sitio web de la ONU]. Disponible en: <http://www.fao.org/spanish/newsroom/focus/2003/aquaculture-defs.htm> [12/06/2021].
- FAO, 2003. *Nutrición y alimentación de los peces*. [Sitio web de la ONU]. Disponible en: http://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/GeneraI/x6709s/x6709s10.htm#top [05/09/2021].

- FAO, 2005. *Visión general del sector acuícola nacional*. [Sitio web de la ONU]. Disponible en: http://www.fao.org/fishery/countrysector/naso_mexico/es [12/06/2021].
- FAO, 2012. *Código de prácticas para el pescado y los productos pesqueros*. Segunda edición, [Codex Alimentarius]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i2382s/i2382s.pdf> [12/06/2021].
- FAO, 2014. *Manual básico sobre procesamiento e inocuidad de productos de la acuicultura*. [Sitio web de la ONU]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/i3835s/i3835s.pdf> [12/06/2021].
- FAO, 2018. *Aditivos alimentarios. Datos y cifras*, [Sitio web de la ONU]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/food-additives> [13/05/2021].
- FAO, 2020. *Situación alimentaria mundial. Nota informativa de la FAO sobre la oferta y la demanda de cereales*, [Sitio web de la ONU] (Actualizado al 06/02/2020). Disponible en: <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/> [05/03/2020].
- FAOSTAT, 2008. *Wheat: Post-Harvest Operation*, [Sitio web de la ONU]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-ax448e.pdf> [26/08/2020].
- FAOSTAT, 2010. *Maize: Post-Harvest Operation*, [Sitio web de la ONU]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-av007e.pdf> [26/08/2020].
- Fellows, P., 2017. *Food Processing Technology: Principles and Practice*. 3, Duxford: Woodhead Publishing.
- Flores, A., 2020. Extrusor para polímeros. + *ciencia de la Facultad de Ingeniería, Universidad Anáhuac*, 8 (22), 26.
- Flórez, D., 2015. La alfalfa (*Medicago sativa*): origen, manejo y producción. *Conex. Agro. JDC*, 5(1), 27-43.
- Fresquet, S. 2015. *Diseño y validación de herramientas biotecnológicas para la mejora del valor nutricional de la alfalfa (Medicago sativa L.)* [Tesis] (Actualizado al 12/2015). Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/59240/Fresquet%20-%20Dise%c3%b1o%20y%20validaci%c3%b3n%20de%20herramientas%20>

[biotecnol%20c3%b3gicas%20para%20la%20mejora%20del%20valor%20nutricion....pdf?sequence=1&isAllowed=y](#) [12/06/2021].

- Gil, A., 2010. *Tratado de Nutrición. Tomo II Composición y calidad nutritiva de los alimentos*. Ed. 2. Madrid: Médica Panamericana.
- Global Feed, 2021. *Fosfato monocálcico. Materia prima para nutrición animal procedente de sustancias minerales*. [Proveedor] (Actualizado al 2021) Disponible en: <https://globalfeed.es/es/productos/fosfatos/fosfato-monocalcico#:~:text=MATERIA%20PRIMA%20PARA%20NUTRICI%C3%93N%20ANIMAL,y%20correctores%20de%20nutrici%C3%B3n%20animal>. [13/05/2021].
- Guasch, B., 2011. *Selección y caracterización de mutantes de Rhizobium tropici CIAT899 afectados en la producción de factores Nod en condiciones de estrés salino* [Tesis] (Actualizado al 2011). Disponible en: https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/69836/305334_638966.pdf?sequence=1&isAllowed=y [12/06/2021].
- Gueguen, J. y Cerletti, P., 1994. Proteins of some legumes seeds: Soybean, pea, fababean and lupin **En:** Gueguen, J. y Cerletti, P. *New and Developing Sources of Food Proteins*. Hudson: Chapman and Hall. Cap. 6.
- Gutiérrez, C., 2017. *Partes de un pez: todo lo que debes saber* [Enciclopedia] (Actualizado al 10/06/2017). Disponible en: <https://hablemosdepeces.com/partes-de-un-pez/> [12/06/2021].
- Hernández, B., Alvarado, J., Valenzuela, J., 2011. *Descripción de las variedades del trigo para el Valle de Mexicali, B. C. y Norte de Sonora* [INIFAP] (Actualizado al 12/2011). Disponible en: <http://www.oeidrus-bc.gob.mx/sispro/trigobc/Produccion/Paquetes/DescripciondelasVarieddaesdeTrigo.pdf> [02/09/2020].
- Hernández M., et al, 2008. Fungal removal of gaseous hexane in biofilters packed with poly(ethylene carbonate) pine sawdust or peat composites. *Wiley Periodicals, Inc.*;100, 864-871.
- Hettiarachchy, N., Sato, K., Marshall, M., Kannan, A. 2012. *Bioactive food proteins and peptides. Applications in Human health*. New York: CRC Press.

- Htoo, J., Sauer, W., Yáñez, J., Cervantes, M., Zhang, Y., Helm, J., Zijstra, R., 2007. Effect of low-phytate barley or phytase supplementation to a barley-soybean meal diet on phosphorus retention and excretion by grower pigs. *Journal of animal science*, 85(11), 2941.
- Juárez, Z., Bárcenas, M., y Hernández, L., 2014. El grano de trigo: Características generales y algunas problemáticas y soluciones a su almacenamiento. *Temas selectos de ingeniería de alimentos*. 8(1), 79-93.
- Kaczmarek, J., Mikiewicz, K., Nebesny, E., Makowski, B., 2015. Composition and functional properties of lipid components from selected cereal grains. *Research Signpost*. 661 (2), 119-145.
- Kan, L., Nie, S., Hu, J., Wang, S., Cui, S., Li, Y., Xu, S., Wu, Y., Wang, J., Bai, Z. y Xie, M., 2017. Nutrients, phytochemicals and antioxidant activities of 26 kidney bean cultivars. *ELSEVIER*, 108 (B), 467 – 477.
- Kent, N. L., 1983. *Technology of cereals*. Oxfordshire: Pergamon Press.
- Kottelat, 2004. *Botia kubotai*. [Atlas de peces de agua dulce]. Disponible en: <http://atlas.elacuaria.com/peces/ficha/botia-kubotai-kottelat-2004> [07/09/2021].
- Lara, M., 2015. El cultivo del frijol en México. *Revista Digital Universitaria*, 16(2).
- Latham, M., 2002. Legumbres, nueces y semillas oleaginosas **En** M. Latham. *Nutrición humana en el mundo en desarrollo*. Roma: Colección FAO: Alimentación y nutrición N° 29, Cap. 27.
- León, A., Rosell, C., 2007. *De tales harinas, tales panes. Granos, harinas y productos de panificación Iberoamericana*. Córdoba: Hugo Báez.
- Lérida, E., 2018. *Mejora de fermentabilidad de hidrolizados de hoja de olivo*. [Universidad de Jaén] (Actualizado al 02/2018). Disponible en: http://tauja.ujaen.es/jspui/bitstream/10953.1/8242/1/Trabajo_Fin_de_Grado_EMILIO_LRIDA.pdf [02/03/2021].
- Lupano, C., 2013. *Modificaciones de componentes de los alimentos: cambios químicos y bioquímicos por procesamiento y almacenamiento*. La Plata: Universidad Nacional de La Plata.

- Manobanda, N., 2017. *Formulación y caracterización de un pan libre de gluten elaborado a partir de cultivos nativos de Ecuador*. [Proyecto de investigación] (Actualizado al 09/2017). Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/26312/1/AL%20641.pdf> [27/05/2021].
- Mansilla, D., Mercado, M. y Olivera, D., 2014. *Producción de pellets de alfalfa. Estudio de prefactibilidad*. Mendoza: Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional San Rafael.
- Martínez, B., Ibáñez, M., Rincón, F., 2002. Ácido fítico: aspectos nutricionales e implicaciones analíticas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 52(3), 219-231.
- Medic, J., Atkinson, C. y Hurburgh, C., 2014. Current Knowledge in Soybean Composition. *J Am Oil Chem Soc*, 91, 363-384.
- Meelko, 2019. *Extrusora para pellets alimentacion peces 30-40kg/h 6kW - MKED040C*. [Proveedor]. Disponible en: <http://articulo.meelko.com/327-extrusora-para-pellets-alimentacion-gatos-30-40kgh-6kw-mked040c.html> [14/03/2020].
- Moncada, L., 1996. *Puntos de control en la fabricación de alimentos balanceados para acuicultura*. [Universidad Autónoma de Nuevo León]. Disponible en: https://www.uanl.mx/utilerias/nutricion_acuicola/III/archivos//8.pdf [06/09/2021].
- Montoya, J., Giraldo, G. y Lucas, A., 2012. Caracterización física de harina de trigo y pan mediante determinación de la viscosidad y la cristalinidad de la pasta. *Vitae*, 19 (1), S346-S348.
- Moscicki, L., 2011. *Extrusion-Cooking Techniques Applications, Theory and Sustainability*. Weinheim: WILEY-VCH.
- MUIB, 2016. *Hydraulics. Joseph Bramah 1795*. [British Inventions Discoveries Creations and Innovations] Disponible en: <http://madeupinbritain.uk/Hydraulics?year=1777> [16/06/2020].

- Mullin, W.J., 1992. Determination of alkylresorcinols in cereal-based foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40 (10/1021), 212.
- NMX-F-007-1982. Harina de trigo. [Banco de normas]. Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/1982/nmx-f-007-1982.pdf> [03/09/2020].
- NMX-F-019-SCFI-2012. Alimentos. Aceite de palma. Especificaciones. [Banco de normas]. Disponible en: https://caisatech.net/uploads/XXI_2_MXD_C10_NMX-F-019-SCFI-2012_R0_10MAY2012.pdf [14/06/2021].
- NMX-F-046-S-1980. Harina de maíz nixtamalizado norma mexicana. Dirección General de Normas. [Banco de normas]. Disponible en: <http://colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas/NMX-F-046-S-1980.PDF> [26/08/2020].
- NMX-F-800-SCFI-2017. Alimentos – Proteína texturizada de soya – Especificaciones, información comercial y métodos de prueba. Dirección General de Normas. [Banco de normas]. Disponible en: http://sitios1.dif.gob.mx/alimentacion/docs/NMX-F-800-SCFI-2017_SOYA.pdf [06/01/2021].
- NMX-Y-010-1966. Salvado de trigo (destinado a la alimentación de animales). [Banco de normas]. Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/1966/nmx-y-010-1966.pdf> [03/09/2020].
- NMX-Y-015-SCFI-2006. Alimentos para animales. Harina de pescado con solubles destinada a la alimentación de animales. Especificaciones. [Banco de normas]. Disponible en: https://caisatech.net/uploads/XXI_2_MXD_A016_NMX-Y-015-SCFI-2006_R0_3MAR2006.pdf [12/06/2021].
- NMX-Y-305-SCFI-1997. Alimentos para animales. Harina de alfalfa. Especificaciones. [Banco de normas]. Disponible en: https://caisatech.net/uploads/XXI_2_MXD_A016_NMX-Y-305-1997-SCFI_R0_6ENE1998.pdf [12/06/2021].

- Nochebuena, C., 2020. *Reproducción y comportamiento de los cíclidos de los grandes lagos africanos*. [Foro internacional de acuicultura]. Disponible en:
<https://fiacui.com/2017/Ornamentales/Viernes%2029%20sept%20/03%20Carlos%20Nochebuena%20-%20Reproduccio%CC%81n%20y%20comportamiento%20de%20los%20ciclicos%20de%20los%20grandes%20lagos%20africanos%20y%20algo%20ma%CC%81s.pdf> [07/09/2021].
- NOM-247-SSA1-2008. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. [Banco de normas]. Disponible en:
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5100356 [12/12/2020].
- Ojokoh, A., Yimin, W., Eromosele, O., 2015. Effect of some extrusion variables on fermented maize-soybean blend. *Journal Food Science Technology*, 52(9), 5763-5771.
- Olmedilla, B., Farré, R., Asensio, C. y Martín, M., 2010. Papel de las leguminosas en la alimentación actual. *ELSEVIER DOYMA*, 14 (2), 72-76.
- Parada, A., Araya, M., 2010. El gluten. Su historia y efectos en la enfermedad celíaca. *Revista Médica de Chile*, 138 (10), 1319 – 1325.
- Plaza, J., Martínez, O., Gil., Hernández, A., 2013. Los alimentos como fuente de mono y disacáridos: aspectos bioquímicos y metabólicos. *Nutrición Hospitalaria*. 28(4), 5-16.
- PNUD, 2021. *¿Qué son los grandes pelágicos?* [Plataforma de pesquería sostenible de grandes pelágicos] (Actualizado al 2021). Disponible en:
<http://www.pelagicoscr.org/es/pesca-pelagica/que-son-los-grandes-pelagicos> [12/06/2021].
- Portillo, 2017. *Pez hacha*. [Plataforma de difusión animal] Disponible en:
<https://www.depeces.com/pez-hacha.html> [07/09/2021].

- Quilca, G., Balandran, R., Mendoza, A., Mercado, J., 2018. Propiedades y posibles aplicaciones de las proteínas de salvado de trigo. *Biotecnología y Ciencias Agropecuarias*. 12(2): 137-147.
- Ramos, F., 2013. *Maíz, trigo y arroz. Los cereales que alimentan al mundo*. Monterrey: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Riaz, Mian N., 2004. *Extrusores en las aplicaciones de alimentos*. Madrid: Acribia.
- Ridner, E., et. al., 2006. *Soja, propiedades nutricionales y su impacto en la salud*. Buenos Aires: Grupo Q. S. A.-Sociedad Argentina de Nutrición.
- Rimache, M., 2008. *Cultivo de trigo, cebada y avena*. Lima: Colección de Cereales.
- Roos, Y, Livney, Y., 2016. *Engineering foods for bioactives stability and delivery*. New York: Springer.
- Rosas, R., 2006. Soja. *ELSEVIER*, 25(2), 80-86.
- SADER, 2016. *¿Legumbre o Leguminosa?* [Sitio web SADER]. (Actualizado al 20/05/2016). Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/legumbre-o-leguminosa#:~:text=Las%20leguminosas%20son%20las%20plantas,legumbres%20m%C3%A1s%20conocidos%20y%20consumidos> [30/08/2020].
- SADER, 2017. *Cierre Estadístico de la Producción Agrícola 2017*. [Sitio web SADER]. (Actualizado al 31/05/2018). Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/articulos/cierre-estadistico-de-la-produccion-agricola-2017?idiom=es> [30/08/2020].
- Sánchez, A., 2001. *Proyecto de planta de elaboración de crepes dulces en el término municipal de Albolote (Granada)* [Trabajo profesional fin de carrera]. (Actualizado al 09/2001). Disponible en: <http://www.uco.es/dptos/bromatologia/tecnologia/bib-virtual/bajada/memcrepe.pdf> [27/05/2021].
- SERA, 2021. *Alimentación de los peces de acuario de acuerdo con la naturaleza*. [Proveedor] Disponible en:

<https://www.sera.de/fileadmin/epapers/aqua-food-2020-es/epaper/ausgabe.pdf> [07/09/2021].

- Serna, S., 2013. *Química, almacenamiento e industrialización de los cereales*. Ciudad de México: AGT Editor.
- SIAP, 2018. *Alfalfa verde, producción y comercio exterior*. [Servicio de Información Alimentaria y Pesquera] (Actualizado al 11/10/2018). Disponible en: https://www.gob.mx/siap/articulos/alfalfa-verde-produccion-y-comercio-exterior#:~:text=En%202018*%20se%20obtuvieron%2033.6%20millones%20de%20toneladas%20en%20el%20pa%C3%ADs&text=En%202017%20d%20est%20en%20un%20pa%C3%B3%20de%20pesos.&text=En%202017%20aument%20a%20cinco,pa%C3%ADses%20que%20adquirieron%20forraje%20mexicano. [12/10/2020].
- SIAP, 2018. *Reporte del mercado de Cebada*. [Servicio de Información Alimentaria y Pesquera] (Actualizado a 02/2019). Disponible en: https://www.cima.aserca.gob.mx/work/models/cima/pdf/cadena/2019/Reporte_mercado_cebada_210219.pdf [12/10/2020].
- SIAP, 2019. *Avance de Siembras y Cosecha. Resumen por estado*. [Servicio de Información Alimentaria y Pesquera]. (Actualizado al 2019). Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do [30/08/2020].
- Sierra-Márquez, J., Sierra-Márquez, L. y Olivero-Verbel, J., 2017. Potencial económico de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq). *Agron. Mesoam.*, 28 (2), 523-534.
- Tacon, A., 1988. Nutrientes esenciales-vitaminas **En** Tacon, A., 1988. *Nutrición y alimentación de peces y camarones cultivados. Manual de capacitación*. Brasilia: FAO, capítulo 5.
- Tacon, A., 1988. Nutrientes esenciales-minerales **En** Tacon, A., 1988. *Nutrición y alimentación de peces y camarones cultivados. Manual de capacitación*. Brasilia: FAO, capítulo 6.

- Tetra, 2018. *Pellets de variedad Goldfish*. [Proveedor] Disponible en: <https://www.tetra-fish.com/products/nutrition/goldfish-variety-pellets.aspx> [07/09/2021].
- Van Dam, J., 2016. Oil Palm By-Products as Biomass Commodities. *Palmas*, 37 (Tomo II), 149-156.
- Van Soest PJ, Wine RH, 1963. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin. *J Assoc Off Ana Chem* 46:829-835.
- Van Soest PJ, Wine RH, 1967. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of plant cell-wall constituents. *J Assoc Off Ana Chem* 50:50-55.
- Wilhelm, P., 2016. *Comparación de la cinética de gelatinización de almidón de papa mediante: DSC y Microscopía de Luz Polarizada* [Tesis]. Disponible en: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2016/faw678c/doc/faw678c.pdf> [20/06/2021].
- Windsor, M. L., 2001. *Fish Meal* [FAO]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/x5926e/x5926e01.htm#Composition%20and%20nutritional%20value> [09/03/2020].
- Wrigley, C., 1996. Giant proteins with flour power. *Nature*, 381, 738-739.
- Wrigley, C, Corke, H., Seetharaman, K., Faubion, J, 2015. *Encyclopedia of Food Grains*, Langford Lane: Academic Press
- Yanniotis, S., Taoukis, P., Karathanos, V., 2013. *Advances in Food Process Engineering Research and Applications*. New York: Springer.
- Zaldívar, F., 2002. *Las harinas y aceites de pescado en la alimentación acuícola*. En: Cruz-Suárez, L., Ricque-Marie, D., Tapia-Salazar, M., Gaxiola-Cortés, M., Simoes, N. *Avances en Nutrición Acuícola VI*. VI Symposium Internacional de Nutrición Acuícola. 3 al 6 de Septiembre del 2002. Cancún, Quintana Roo, México.
- Zeki, B., 1992. Technology of production of edible flours and protein products from soybeans. *Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO*, 97.

9. Anexo 1

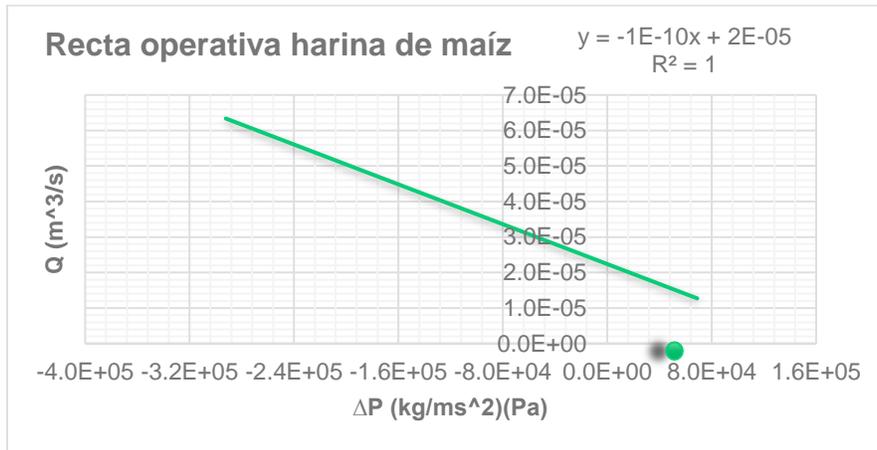


Figura 53. Recta operativa para harina de maíz modificada a la mitad de D

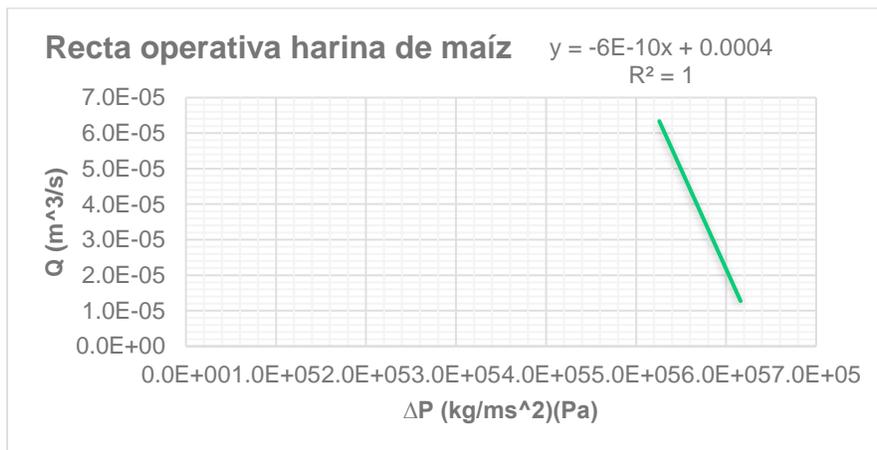


Figura 54. Recta operativa para harina de maíz modificada al doble de D

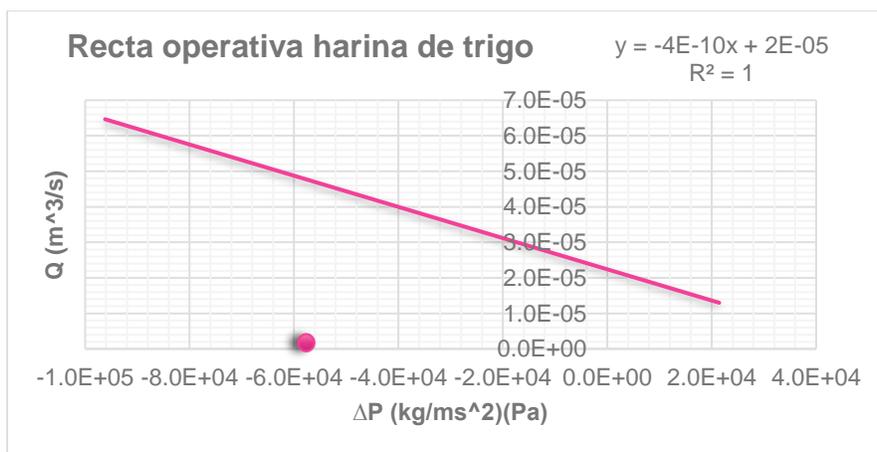


Figura 55. Recta operativa para harina de trigo modificada a la mitad de D

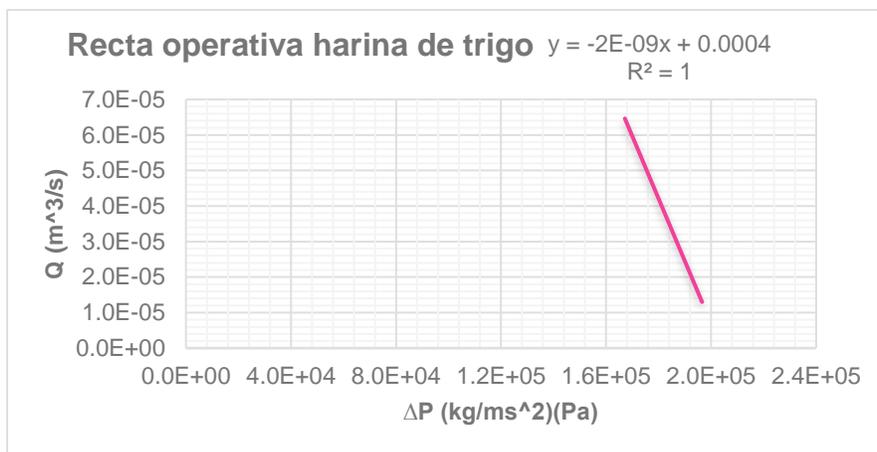


Figura 56. Recta operativa para harina de trigo modificada al doble de D

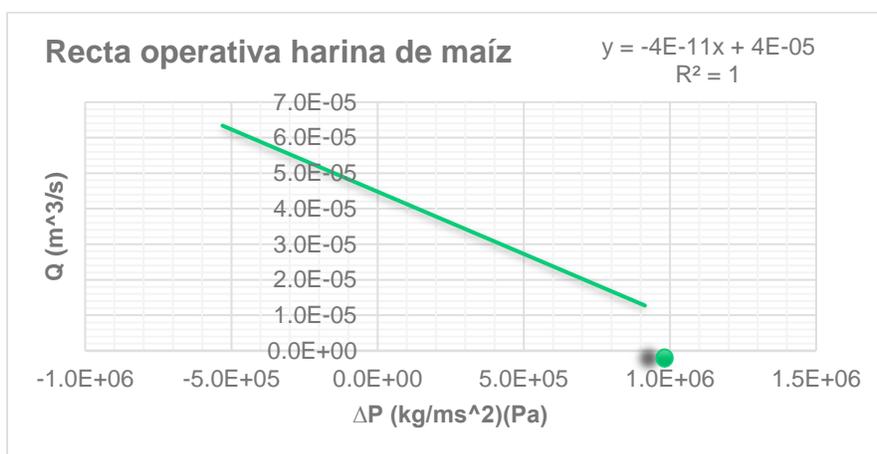


Figura 57. Recta operativa para harina de maíz modificada a la mitad de h

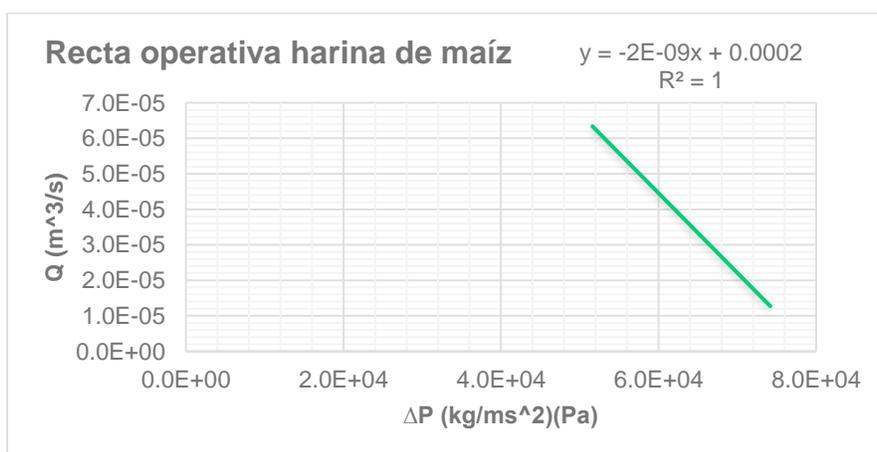


Figura 58. Recta operativa para harina de maíz modificada al doble de h

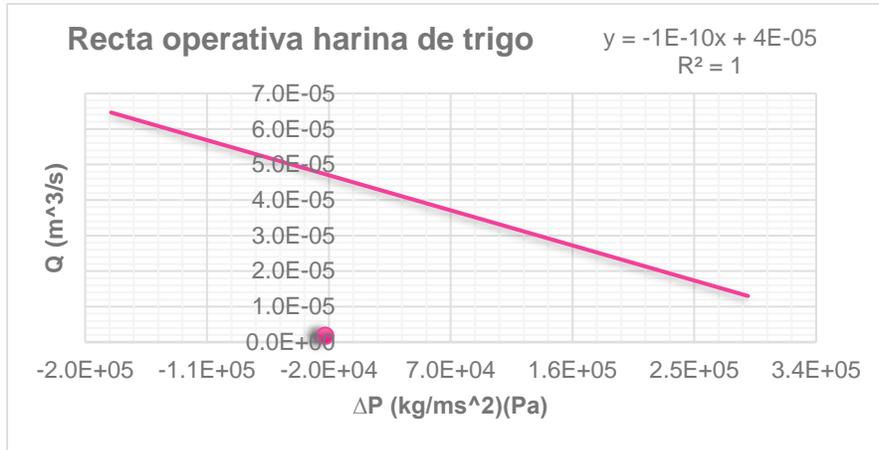


Figura 59. Recta operativa para harina de trigo modificada a la mitad de h

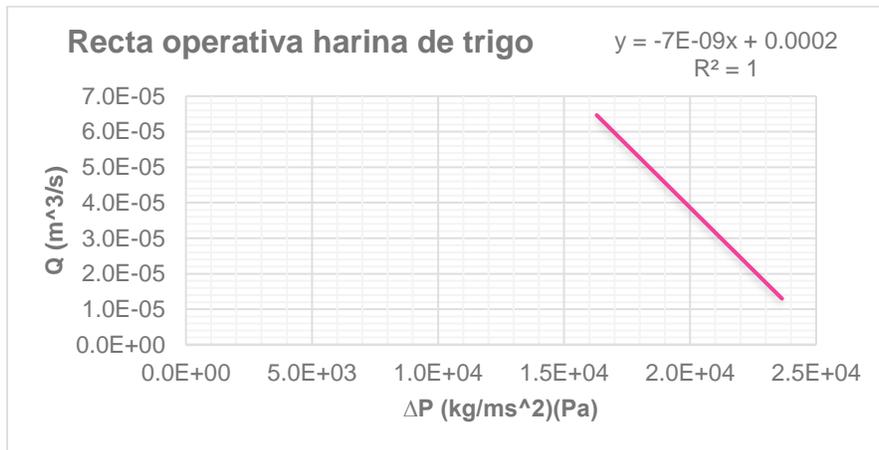


Figura 60. Recta operativa para harina de trigo modificada al doble de h

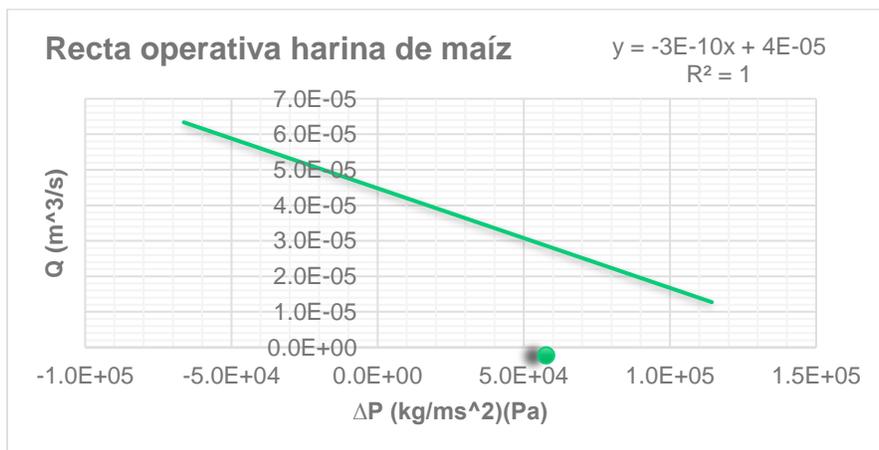


Figura 61. Recta operativa para harina de maíz modificada a la mitad de N

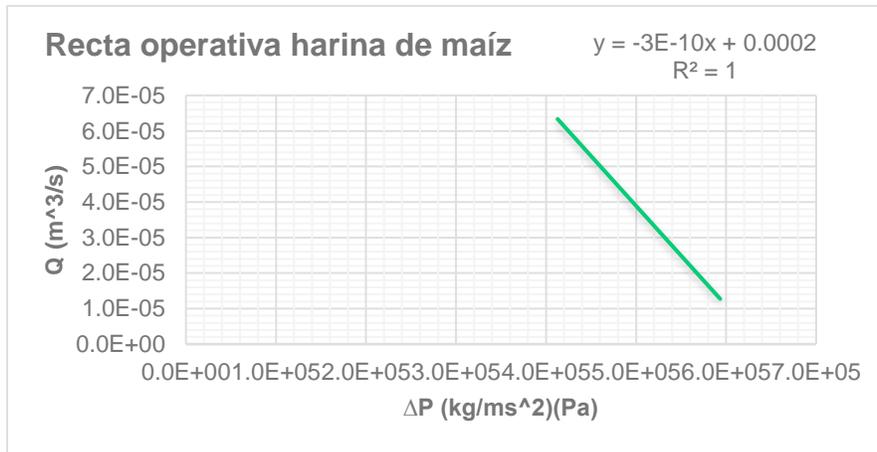


Figura 62. Recta operativa para harina de maíz modificada al doble de N

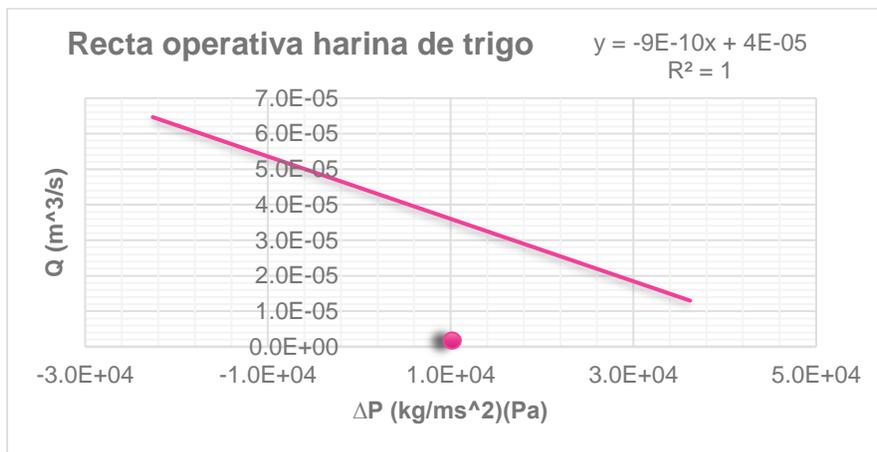


Figura 63. Recta operativa para harina de trigo modificada a la mitad de N

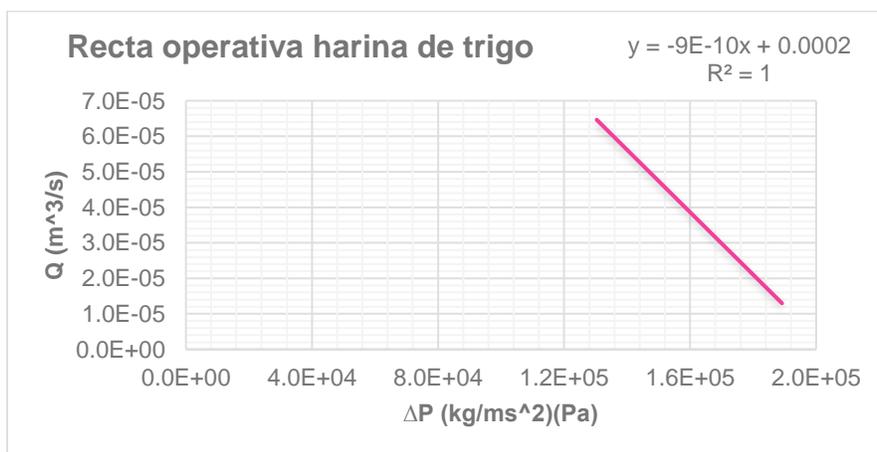


Figura 64. Recta operativa para harina de trigo modificada al doble de N

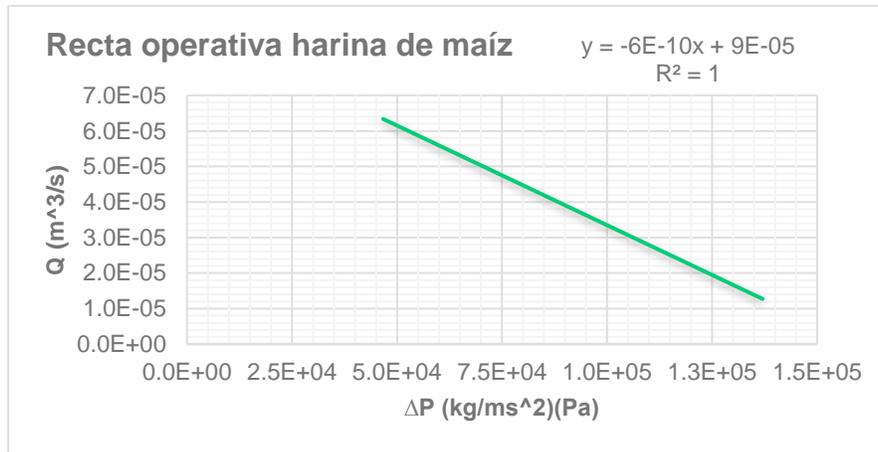


Figura 65. Recta operativa para harina de maíz modificada a la mitad de L

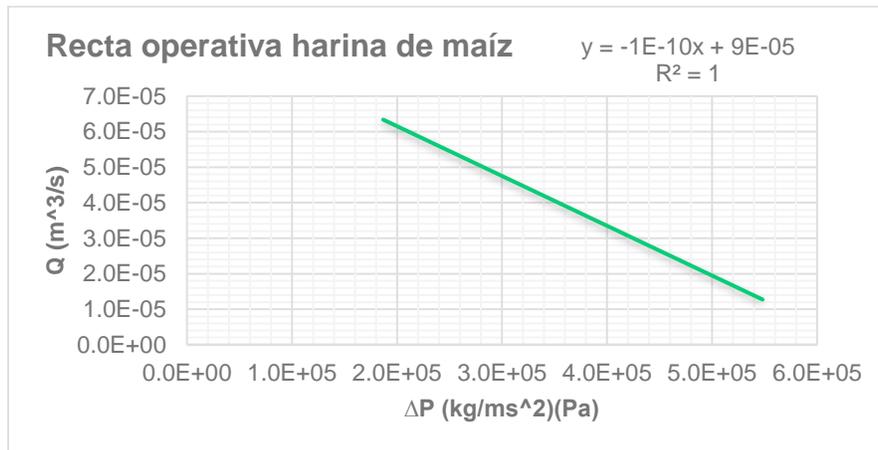


Figura 66. Recta operativa para harina de maíz modificada al doble de L

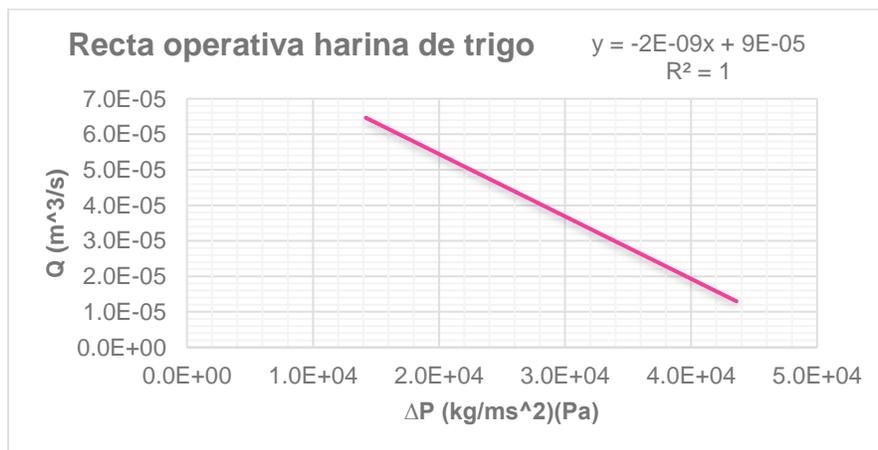


Figura 67. Recta operativa para harina de trigo modificada a la mitad de L

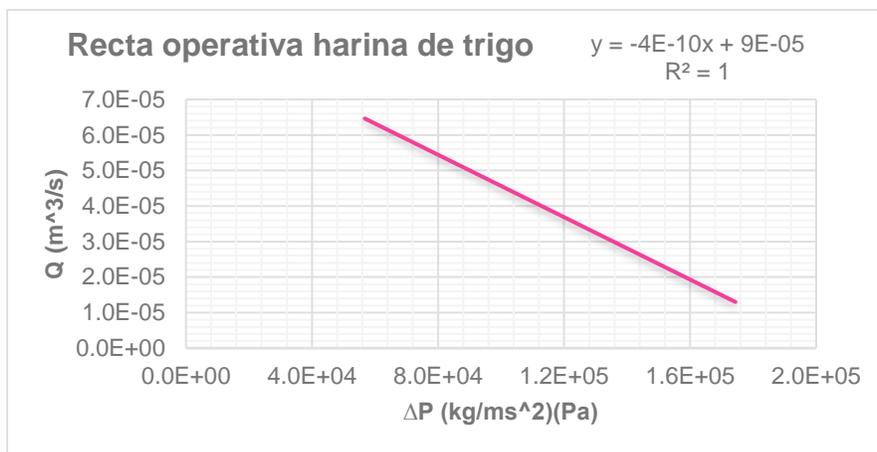


Figura 68. Recta operativa para harina de trigo modificada al doble de L

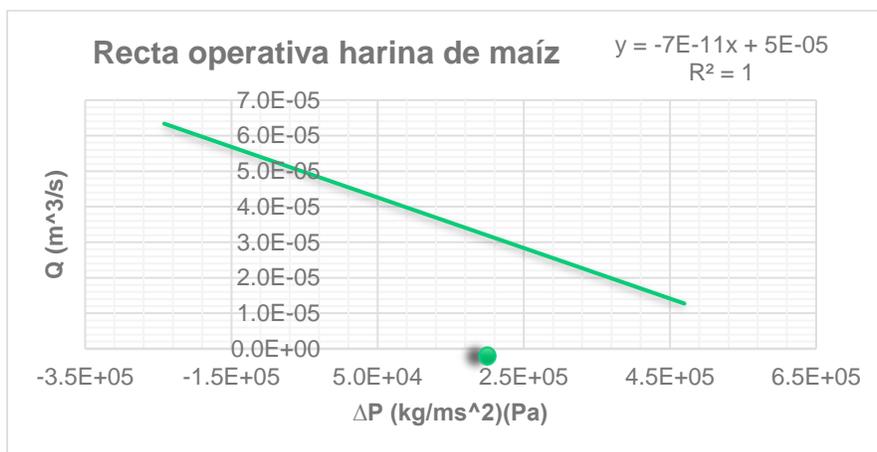


Figura 69. Recta operativa para harina de maíz modificada a la mitad de θ

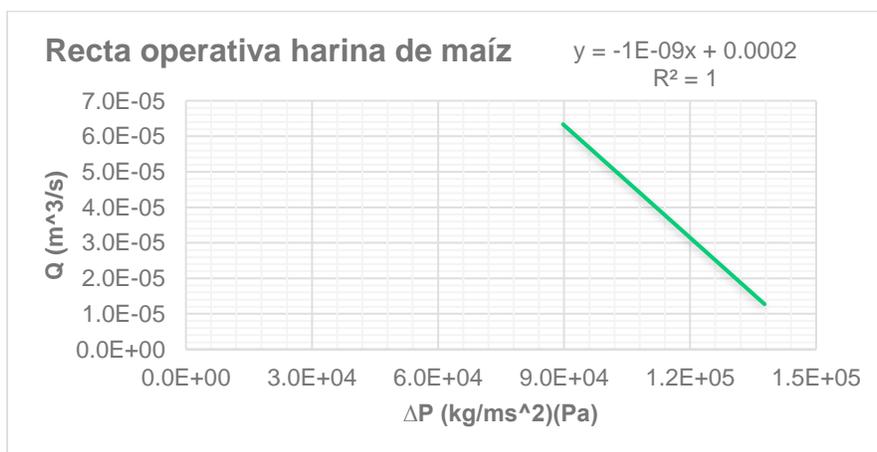


Figura 70. Recta operativa para harina de maíz modificada al doble de θ

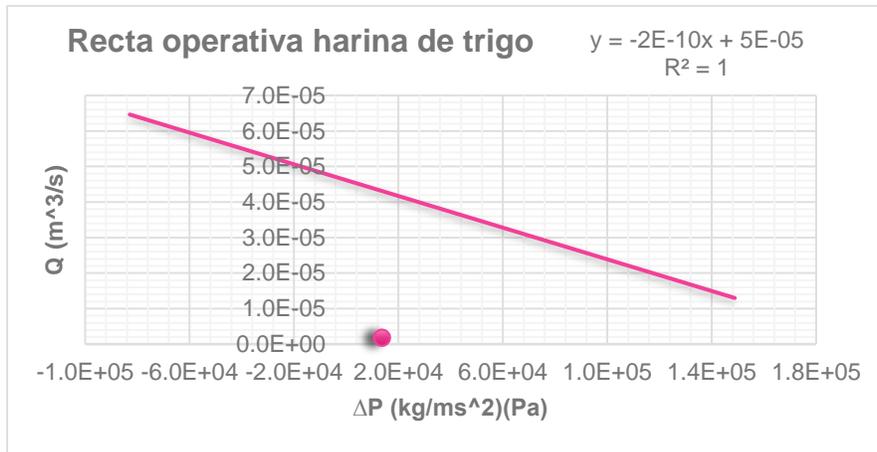


Figura 71. Recta operativa para harina de trigo modificada a la mitad de θ

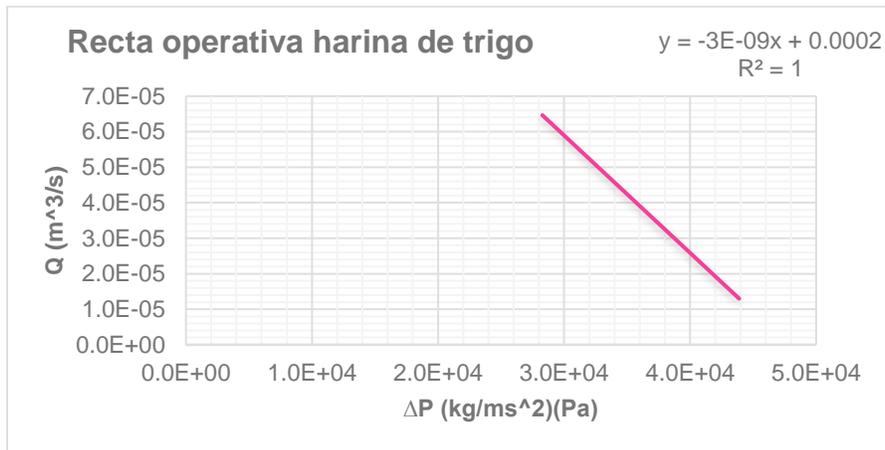


Figura 72. Recta operativa para harina de trigo modificada al doble de θ