



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Evaluación fisicoquímica y nutricional de un extrudido tipo cereal para desayuno a base de harina de *Oxalis tuberosa* adicionado con fibra

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIA DE LOS ALIMENTOS

Presenta:

L. N. Marisol Patricia Castro Mendoza

Dirección:

Dr. Juan Pablo Hernández Uribe

Dr. Erick Heredia Olea

UAEH-ICAp

Tecnológico de Monterrey-EIC

Tulancingo de Bravo, Hgo., octubre 2018



COORDINACION DE INVESTIGACION Y POSGRADO DEL ICAP

Actas de la reunión del Comité de Tesis de Maestría en Ciencia de los Alimentos
Apertura:

La reunión ordinaria para evaluar los avances de la tesis intitulada: **“Evaluación fisicoquímica y nutricional de un extrudido tipo cereal para desayuno a base de harina de Oxalis tuberosa adicionado con fibra”**, que desarrolla la estudiante Marisol Patricia Castro Mendoza.

Asistentes:

Dr. Juan Pablo Hernández Uribe

Dr. Erick Heredia Olea

Dr. Apolonio Vargas Torres

Dra. Heidi Maria Palma Rodríguez

A. Revisión de Trabajo de Tesis

Observaciones:

El comité revisó con antelación el trabajo de tesis en extenso propuesto por la estudiante, comunicando a la estudiante, Marisol Patricia Castro Mendoza, oportunamente las correcciones, adiciones y/o modificaciones que debería considerar para mejorar su trabajo y poder continuar con el proceso de obtención de grado. La estudiante atendió de forma conveniente las sugerencias del comité.

B. Acuerdos

En esta fecha, se comunica atentamente que el comité conformado por los profesores firmantes, otorgamos nuestra autorización para que la estudiante imprima su trabajo final de tesis, y continúe con los trámites necesarios para la obtención del grado de maestría respectivo.

ATENTAMENTE

“AMOR, ORDEN Y PROGRESO”

Tulancingo de Bravo, Hidalgo a 5 de octubre de 2018

Dr. Juan Pablo Hernández Uribe

Dr. Erick Heredia Olea

Dr. Apolonio Vargas Torres

Dra. Heidi Maria Palma Rodríguez

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
 COORDINACIÓN DE INVESTIGACION Y POSGRADO DEL INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
 [Signatures]



Este trabajo de tesis titulado “Evaluación fisicoquímica y nutricional de un extrudido tipo cereal para desayuno a base de harina de *Oxalis tuberosa* adicionado con fibra de avena” fue realizado en el laboratorio de Fisicoquímica del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, bajo la dirección del Dr. Juan Pablo Hernández Uribe y codirección del Dr. Erick Heredia Olea.

Se agradece el apoyo recibido al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) para la realización de este trabajo y el apoyo recibido a través de la beca No. 606795 para los estudios de posgrado de la alumna M.P.C.M.

Se agradece el apoyo brindado, al Dr. Sergio O. Serna Saldívar por las facilidades otorgadas durante la estancia realizada en el Laboratorio de Biotecnología del Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey. Al Dr. Luis Arturo Bello Pérez por las facilidades proporcionadas durante la estancia realizada en el laboratorio de Desarrollo Tecnológico del Centro de Desarrollo de Productos Bióticos-IPN (CEPROBI). También se agradece al Ing. Tlatoani López Suarez de la empresa Derivados Macroquímicos S. A de C. V., por la donación de la muestra de fibra de avena.

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que directa o indirectamente, participaron en este largo proceso, leyendo, corrigiendo y acompañándome en los momentos no tan buenos y en los de felicidad, sin ellos esto no sería posible. GRACIAS.

Al Dr. Juan Pablo Hernández Uribe por haberme dado la oportunidad de trabajar con él, por sus enseñanzas, por acompañarme profesional y humanamente en cada paso, permitiéndome trabajar con absoluta libertad. Gracias por su paciencia, apoyo y consejos.

Al Dr. Erick Heredia Olea por haber aceptado la codirección de este proyecto; por su hospitalidad durante mi estancia en Monterrey, por su amistad, confianza, paciencia, consejos y por siempre estar dispuesto a compartir sus conocimientos.

Al Dr. Apolonio Vargas Torres y la Dra. Heidi María Palma Rodríguez por ser parte de mi comité tutorial, por sus consejos, por el apoyo profesional y personal que me brindaron durante estos dos años.

Al Dr. Sergio O. Serna Saldívar por recibirme como una alumna más, por abrirme las puertas de su laboratorio, por sus palabras de aliento, por su confianza y consejos, por su valiosa colaboración y participación en este trabajo.

A las doctoras, Esther Pérez Carrillo y Marilena Antunes Ricardo, por su ayuda en la parte experimental de este proyecto de investigación.

DEDICATORIA

A Dios por guiarme por el camino correcto, ser mi fortaleza para seguir adelante y no rendirme ante los problemas, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en los intentos.

A mi hija Amaya, por acompañarme en esta aventura de forma incondicional entendiendo mis ausencias y malos momentos; por enseñarme tanto, por ser mi fuente de motivación e inspiración para poder superarme cada día y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor. Te Amo.

A mis padres, Norma y Agustín, por haberme dado la vida, por su apoyo y por enseñarme a luchar por mis sueños. A mis hermanos, Eli, Bianca y Tito, por todo el apoyo, por sus palabras de aliento que no me dejaban decaer y me daban fuerzas para seguir adelante.

INDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS.....	1
INDICE DE FIGURAS	2
RESUMEN	4
I. INTRODUCCIÓN	5
2.1 CEREALES PARA DESAYUNO.....	7
2.1.1 Aspectos generales.....	7
2.1.1.1 Beneficios a la salud	7
2.2 MATERIAS PRIMAS EN LA ELABORACIÓN DE CEREALES PARA DESAYUNO	8
2.3 NUEVAS MATERIAS PRIMAS	10
2.3.1 <i>Oxalis tuberosa</i>	11
2.3.1.1 Composición química de <i>Oxalis tuberosa</i>	12
2.4 PROCESOS DE ELABORACIÓN DE CEREALES PARA DESAYUNO	13
2.5 EXTRUSIÓN	14
2.5.1 Tipos de extrusores.....	14
2.6 PROCESO TECNOLÓGICO DE EXTRUSIÓN.....	16
2.7 CAMBIOS ESTRUCTURALES Y NUTRICIONALES DURANTE LA COCCIÓN POR EXTRUSIÓN	18
2.8 VENTAJAS Y APLICACIONES DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN	18
II. JUSTIFICACIÓN.....	20
III. OBJETIVOS.....	21
4.1 OBJETIVO GENERAL	21
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	22
5.1 MATERIA PRIMA.....	22
5.1.1 Preparación de la materia prima.....	22
5.1.1.1 Obtención de la harina de <i>Oxalis tuberosa</i>	22
5.2 PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	23
5.3 MÉTODOS ANALÍTICOS	25
5.3.1 Caracterización fisicoquímica.....	25
5.3.1.1 Índice de expansión	25
5.3.1.2 Densidad aparente	26
5.3.1.3 Índice de solubilidad en agua (ISA) e índice de absorción de agua (IAA.....	26
5.3.1.5 Dureza.....	27

5.4	CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES ESTRUCTURALES.....	28
5.4.1	<i>Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de los productos extrudidos</i>	28
5.4.2	<i>Análisis de rayos X de los productos extrudidos</i>	28
5.5	CARACTERIZACIÓN NUTRICIONAL	29
5.5.1	<i>Fibra dietética integrada</i>	29
5.5.2	<i>Cuantificación de azúcares</i>	30
5.5.3	<i>Digestibilidad del almidón y predicción del índice glicémico</i>	31
5.5.4	<i>Actividad antioxidante celular (AAC)</i>	32
5.6	DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	33
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
6.1	OBTENCIÓN DE LOS EXTRUDIDOS “TIPO CEREAL PARA DESAYUNO”	34
6.2	CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA.....	36
6.2.1	<i>Índice de expansión (IE)</i>	36
6.2.2	<i>Densidad Aparente (DA)</i>	41
6.2.3	<i>Índice de solubilidad en agua (ISA) e índice de absorción de agua (IAA)</i> 42	
6.2.4	<i>Color</i>	48
6.2.5	<i>Dureza</i>	53
6.3	CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MICROESTRUCTURALES	55
6.3.1	<i>Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)</i>	55
6.3.2	<i>Difracción de rayos X</i>	58
6.4	CARACTERIZACIÓN NUTRICIONAL	60
6.4.1	Fibra dietética total integrada	60
6.4.1.1	Cuantificación de Azúcares	62
6.4.1.2	Digestión del almidón y predicción del índice glicémico (pIG).....	63
6.4.1.3	Actividad Antioxidante Celular (AAC).....	66
6.5	OPTIMIZACIÓN DEL EXTRUDIDO “TIPO CEREAL PARA DESAYUNO” A BASE DE HARINA DE OXALIS TUBEROSA	68
VII.	CONCLUSIONES	71
VIII.	PERSPECTIVAS	72
IX.	BIBLIOGRAFIA	73

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales materias primas utilizadas en la elaboración de cereales para desayuno.....	9
Tabla 2. Composición proximal de <i>Oxalis tuberosa</i>	12
Tabla 3. Principales usos del proceso de extrusión en los distintos sectores.....	19
Tabla 4. Diseño del experimento utilizado para obtener extrudidos con diferentes combinaciones de humedad de alimentación de extrusión/concentración de fibra de avena para la producción de extrudidos tipo cereal para desayuno a base de <i>Oxalis tuberosa</i> adicionados con fibra de avena.....	24
Tabla 5. Resultados de los parámetros fisicoquímicos y de digestibilidad, determinados en los extrudidos tipo cereal para desayuno correspondientes a los distintos tratamientos.....	37
Tabla 6. Porcentaje de contribución de cada factor, sobre los parámetros fisicoquímicos y de digestibilidad evaluados en los extrudidos tipo cereal para desayuno.....	40
Tabla 7. Porcentaje de cristalinidad de los diferentes tratamientos.....	59
Tabla 8. Cuantificación de azúcares por HPLC de los distintos extrudidos tipo cereal para desayuno.....	63
Tabla 9. Coeficientes de regresión del modelo para variables respuesta: índice de expansión (IE), densidad aparente (DA), índice de solubilidad en agua (ISA), índice de absorción de agua (IAA), dureza (DZA), índice de hidrolisis (IH), predicción del índice glucémico (pGI), fibra dietética total (FDT), capacidad antioxidante celular (CAC), Luminosidad (L*), rojo a verde (a*), amarillo a azul (b*).....	70

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo generalizado para la producción de cereales para desayuno.....	13
Figura 2. Principales partes de un extrusor	17
Figura 4. Oxalis tuberosa rebanada, antes de colocarla en la estufa de secado..	23
Figura 5. Extrusor de doble tornillo (Bühler, Suiza) utilizado para la producción del extrudido tipo cereal para desayuno.	25
Figura 6. Apariencia física de los extrudidos tipo cereal para desayuno a base de <i>Oxalis tuberosa</i> adicionados con fibra de avena. a) Tratamiento 1 (80% <i>Oxalis tuberosa</i> , 20% fibra, 20% humedad). b) Tratamiento 2 (100% <i>Oxalis tuberosa</i> , 0% fibra, 20% humedad). c) Tratamiento 3 (90% <i>Oxalis tuberosa</i> , 10% fibra, 17.5% humedad). d) Tratamiento 4 (80% <i>Oxalis tuberosa</i> , 20% fibra, 13% humedad). e) Tratamiento 5 (100% <i>Oxalis tuberosa</i> , 0% fibra, 13% humedad).	35
Figura 7. Efecto del contenido de fibra de avena y la humedad sobre el índice de expansión de los extrudidos tipo cereal para desayuno.....	39
Figura 8. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad en la densidad aparente de los extrudidos tipo cereal para desayuno.	43
Figura 9. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad en el índice de solubilidad en agua (ISA) de los extrudidos tipo cereal para desayuno	45
Figura 10. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre el índice de absorción de agua de los extrudidos tipo cereal para desayuno.....	47
Figura 11. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre la luminosidad (L*) en extrudidos tipo cereal para desayuno.	50
Figura 12. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre el parámetro de color a* en extrudidos tipo cereal para desayuno.....	51

Figura 13. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre el parámetro de color b* en los distintos extrudidos tipo cereal para desayuno	52
Figura 14. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre la dureza de los distintos extrudidos tipo cereal para desayuno.	54
Figura 15. Microestructura interna de los extrudidos: a) Tratamiento 1 (80% <i>Oxalis tuberosa</i> , 20% fibra, 20% humedad). b) Tratamiento 2 (100% <i>Oxalis tuberosa</i> , 0% fibra, 20% humedad). c) Tratamiento 3 (90% <i>Oxalis tuberosa</i> , 10% fibra, 17.5% humedad). d) Tratamiento 4 (80% <i>Oxalis tuberosa</i> , 20% fibra, 13% humedad). e) Tratamiento 5 (100% <i>Oxalis tuberosa</i> , 0% fibra, 13% humedad).	57
Figura 16. Difractograma de harina de <i>Oxalis tuberosa</i> y de los extrudidos tipo cereal para desayuno (T1-T5).	59
Figura 17. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre el contenido de Fibra dietética total de los distintos extrudidos tipo cereal para desayuno.	61
Figura 18. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre la predicción del índice glicémico de los distintos extrudidos tipo cereal ara desayuno	65
Figura 19. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre la actividad antioxidante celular de los distintos extrudidos obtenidos por extrusión.	67

RESUMEN

Actualmente los consumidores buscan alimentos que impacten de manera positiva en su salud, los cuales han sido definidos como alimentos funcionales, algunos ejemplos son: yogurt adicionado con probióticos, galletas y cereales para desayuno adicionados con fibra; los cereales para desayuno juegan un papel importante en la dieta, debido al aporte de nutrientes y los beneficios a la salud que se pueden obtener al consumirlos. Actualmente se investigan materias primas que puedan ser utilizadas como materia prima en la elaboración de ciertos productos. *Oxalis tuberosa* es un tubérculo, rico en compuestos bioactivos que podría ser utilizado como materia prima en la elaboración de productos procesados. Es por ello que el objetivo del presente trabajo fue incorporar harina de *Oxalis tuberosa* en un extrudido tipo cereal para desayuno adicionado con fibra de avena, así como analizar las características fisicoquímicas, estructurales y nutricionales de los extrudidos. En cuanto a los resultados obtenidos, se observó que las características físicas del producto fueron afectadas tanto por el contenido de humedad, como por el contenido de fibra, ya que la disminución de estos dos parámetros, provocó un aumento en el índice de expansión, lo que también trajo como consecuencia una disminución de la dureza y de la densidad aparente. Por otro lado, a mayor índice de expansión, se observó una estructura más porosa, la cual está relacionada con la disminución de dureza y densidad de los extrudidos. En relación con el índice de absorción de agua, no se observó una relación definida entre el contenido de fibra y humedad, mientras que un aumento en las variables, dieron como resultado un incremento en el índice de solubilidad en agua. Respecto a la caracterización nutricional, aquellos tratamientos que fueron adicionados con fibra de avena aumentaron significativamente el contenido de fibra dietaria total, lo cual se vio reflejado en los resultados de predicción del índice glucémico, ya que los tratamientos con un mayor contenido de fibra obtuvieron los menores valores de índice glucémico. En base a los resultados anteriores, se puede afirmar que es posible obtener extrudidos a base de harina de *Oxalis tuberosa*, con características fisicoquímicas y nutricionales comparables a los productos que existen actualmente en el mercado.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad como cambio en el estilo de vida, ha influido de manera importante sobre los hábitos de alimentación, el consumo de alimentos procesados está aumentando a un ritmo acelerado (Mohammed Shafiq Alam, 2016), sin embargo, los consumidores están tomando conciencia de la importancia de la dieta en relación con los problemas de salud (Arribas *et al.* 2017); es por ello que el interés por conocer más acerca de los alimentos que tienen un impacto en la salud, ha crecido de manera considerable; Es por ello que el desarrollo de alimentos, a base de materias primas no convencionales, que aporten compuestos bioactivos, ha tenido gran interés en los últimos años. Este tipo de alimentos son llamados comúnmente alimentos funcionales. Alimento funcional se define como aquel que tiene uno o más componentes específicos, que tienen influencia positiva en la salud y el bienestar del consumidor (Sarmiento Rubiano, 2006), dentro de la clasificación de alimentos funcionales podemos encontrar una gran variedad, por mencionar algunos, pan de caja, productos lácteos, jugos, galletas y los cereales para desayuno; estos últimos juegan un papel importante en la dieta ya que aseguran el funcionamiento adecuado del organismo, el sistema nervioso y el tracto gastrointestinal (Asociación Española de Fabricantes de Cereales, 2010) (AEFC). Una de las tecnologías más utilizadas actualmente en la elaboración de cereales para desayuno, es la extrusión. La cocción por extrusión es una tecnología versátil, de bajo costo y muy eficiente en el procesamiento de alimentos (Shivendra Singh, 2007). Esta tecnología es ampliamente utilizada por las industrias alimentarias en la producción de cereales para el desayuno, alimentos para bebés, refrigerios, análogos de carne y almidones modificados (Brennan *et al.* 2013). El consumo de un desayuno se ha asociado con una mayor ingesta de fibra y de calcio, así como un menor riesgo de sobrepeso u obesidad (Spence C. , 2008). Una de las tecnologías más utilizadas para la elaboración de cereales para desayuno, es la extrusión; la cual tiene la posibilidad de cambiar las propiedades funcionales de las materias primas utilizadas (Singh *et al.* 2014). Existe la posibilidad de manipular el valor nutricional de los productos extruidos mediante la incorporación de materias primas ricas en componentes bioactivos (como carotenoides, fibra dietética, etc). Existen nuevas fuentes

botánicas, las cuales se busca sean explotadas por su alto contenido en compuestos bioactivos los cuales dan grandes beneficios a la salud; una de esas nuevas fuentes es la *Oxalis tuberosa*, que constituye una fuente de recursos poco conocidos y explotados que representan posibilidades para la agricultura, la alimentación, la agroindustria y el comercio internacional. *Oxalis tuberosa* representa una buena fuente de antioxidantes por lo que puede considerarse como una excelente opción de materia prima para la elaboración de alimentos con propiedades funcionales (Chirinos *et al.* 2009). El objetivo del presente trabajo es la elaboración de un extrudido tipo cereal para desayuno usando como materia prima *Oxalis tuberosa*, la cual es rica en compuestos bioactivos, ya que en la actualidad no hay cereales para desayuno a base de tubérculos.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Cereales para desayuno

2.1.1 Aspectos generales

La industria de cereales para desayuno es de las más versátiles y tecnificadas. Los productos terminados son convenientes y prácticos ya que requieren un mínimo de preparación y tienen una larga vida de anaquel. Se consideran el primer alimento del día y poseen un bajo contenido de grasa, la mayoría contienen azúcar, están enriquecidos o fortificados con vitaminas y minerales y son casi siempre consumidos con leche por la mañana. Los cereales para desayuno se componen de uno o más cereales a los que, según su formulación, se añaden vitaminas y minerales que completan el producto, haciéndolo más adecuado desde el punto de vista nutricional (Serna-Saldívar, 2013).

2.1.1.1 Beneficios a la salud

Los cereales de desayuno juegan un papel importante en la dieta, ya que ayudan al adecuado funcionamiento del organismo. Desde el punto de vista nutricional, ayudan a que la dieta sea más variada y equilibrada, debido a que son adicionados con vitaminas y minerales, ayudan con el aporte de estos componentes en la dieta, además de ser considerados una buena fuente de fibra e hidratos de carbono (Spence C. , 2008). Un cereal para desayuno alto en carbohidratos puede influir positivamente en los procesos internos del cuerpo, alimentando la función cerebral y la acción muscular (Charunuch et al. 2011). Otro punto importante de este tipo de productos es que debido a las materias primas que suelen utilizarse para su elaboración son bajos en grasa (2-4%), la pequeña cantidad de grasa es mayoritariamente insaturada (también conocida como saludable por el papel que ejerce en el control del colesterol y de las enfermedades cardíacas) por lo que, dentro de una dieta equilibrada, resultan muy aconsejables para prevenir el sobrepeso y la obesidad. Otra característica nutricional que hacen a los cereales para desayuno una opción idónea como parte importante de la dieta es que facilitan un mayor consumo de calcio, por sus características de presentación, su consumo

induce de manera significativa una mayor ingesta de calcio a través de los lácteos, ya que ambos alimentos suelen consumirse combinados (AEFC, 2010). Para que se produzca una buena absorción de calcio, el organismo necesita vitamina D, ambos nutrientes están presentes en los lácteos y en algunos cereales de desayuno. Otro componente de los cereales para desayuno que sobresale por los beneficios que aporta al consumidor, es la fibra. Algunos cereales para desayuno son ricos en fibra, debido a la materia prima o a la adición de este componente en su elaboración. Algunos cereales para desayuno son ricos en fibra, debido a la materia prima o a la adición de este componente en su elaboración. La fibra proporciona sensación de saciedad, disminución de la presión arterial (Grundy et al. 2016) un menor riesgo de padecer accidentes cardiovasculares e incluso algunos tipos de cáncer. Su consumo habitual ayuda también a regular el exceso de peso, disminuyendo la obesidad abdominal (Collins et al. 2010).

2.2 Materias primas en la elaboración de cereales para desayuno

Las materias primas más utilizadas son: trigo, maíz (Oliveira *et al.* 2015), arroz, avena, cebada y otros cereales comestibles, ya sean enteros o troceados (Leszek, 2011). En la Tabla 1, se mencionan las principales materias primas que se utilizan en la elaboración de cereales para desayuno. Además de los cereales, en ocasiones se utilizan otros ingredientes como cacao, frutas, frutos secos, malta, miel y leche. Los cereales más relevantes desde el punto de vista de la nutrición humana son el trigo y el arroz, que constituyen la base de la alimentación de cuatro quintas partes de la población mundial (Serna-Saldívar, 2013).

Tabla 1. Principales materias primas utilizadas en la elaboración de cereales para desayuno.

Trigo <i>Triticum vulgare</i>	Aporta un 61% de hidratos de carbono, 12% de proteínas, 10% de fibra y solo un 2% de lípidos. Contiene vitaminas, principalmente del grupo B (B1, B2, B3, B6, ácido fólico) y vitamina E. Los minerales que posee, en mayor contenido son: potasio, fósforo, magnesio y calcio. El aporte energético del trigo es de 249 kcal por cada 100 g.
Arroz <i>Oryza sativa</i>	El componente mayoritario son los hidratos de carbono (87%). Contiene un 8% de proteínas y un 1,4% de fibra; la grasa es prácticamente inexistente (0,6%). La mayor parte de las vitaminas (principalmente del grupo B, como el ácido fólico) y minerales como el potasio, fósforo, magnesio y calcio, se encuentran en las capas externas. Aporta 361 kcal por cada 100 g.
Maíz <i>Zea mays</i>	El grano de maíz se compone de un 65% de hidratos de carbono, 9% de proteínas, 3,8% de lípidos y 9,2% de fibra. Contiene principalmente vitaminas del grupo B y vitamina E. En cuanto a minerales, destaca su contenido en potasio, fósforo, magnesio y calcio. La proteína más importante del maíz es la zeína, que representa aproximadamente la mitad de las proteínas totales. El maíz aporta 311 kcal por cada 100 g.
Avena <i>Avena sativa</i>	Contiene un 66,3% de hidratos de carbono, pero además es muy valorado por su riqueza en proteínas (16,9%) y aminoácidos esenciales. Es el cereal con mayor porcentaje de lípidos (7%) y con un alto contenido en ácidos grasos insaturados. Abundan dentro de su composición lipídica los ácidos grasos linoleico y oleico. Contiene un 10,6% de fibra, y se caracteriza por su contenido en β -glucano, que es un tipo de fibra soluble. Posee vitaminas del grupo B, como el ácido fólico, y vitamina E. Con respecto al contenido mineral, posee mayor cantidad de calcio, hierro y zinc que el resto de los cereales. Por último, el aporte energético de la avena es de 378 kcal por 100 g.
Cebada <i>Hordeum vulgare</i>	Aporta unas 344 kcal por cada 100 g. Contiene un 69% de hidratos de carbono, un 10,5% de proteínas, un bajo nivel de lípidos (2%), y un 4% de fibra. La cebada, al igual que el resto de los cereales, contiene vitaminas principalmente del grupo B y vitamina E. El potasio, fósforo, magnesio y calcio son los minerales mayoritarios. La cebada comparte con la avena la riqueza en β -glucano.

Adaptado del libro: Cereales de desayuno, Nutrición y Gastronomía. Asociación Española de Fabricantes de Cereales, 2010.

2.3 Nuevas materias primas

Para atender las necesidades de salud y nutrición, así como satisfacer las demandas de consumidores cada vez más conscientes de su salud, se están agregando ingredientes funcionales en la elaboración de este tipo de alimentos. Especial consideración se le está dando al aumento en el contenido de fibra, principalmente en productos tales como aperitivos y cereales para el desayuno (Brennan *et al.* 2008; Holguín-Acuña *et al.* 2008). Dentro de las nuevas materias primas podemos encontrar algunos tipos de fibra, almidones, fuentes ricas en carotenoides y algún tipo de antioxidantes, entre otros.

Oliveira *et al.* (2015) elaboraron un cereal para desayuno a base de harina integral y harina de maíz, esto con el objetivo de aumentar el contenido de fibra del producto. Evaluaron el efecto de la incorporación de la harina integral de trigo y de los parámetros del proceso de extrusión en la calidad nutricional de los cereales para desayuno. Los cereales se elaboraron en un extrusor de doble tornillo variando el contenido de harina integral de trigo (0-100%), humedad de alimentación (14-24%). La fibra dietética y el almidón resistente se incrementaron significativamente con la adición de harina integral de trigo. Los parámetros del análisis rápido de viscosidad (RVA, por sus siglas en inglés), se vieron significativamente afectados por todas las condiciones de extrusión y el contenido de harina integral de trigo. Se concluyó que la combinación de harina integral de trigo con harina de maíz es una buena alternativa para aumentar el contenido de fibra de los productos extrudidos. Camire *et al.* (2006) elaboraron un cereal para desayuno, a base de harina de maíz blanco (84.3%), sacarosa (14.3%), ácido cítrico (0.4%) y frutas deshidratadas en polvo (arándano, uva y frambuesa roja) (1%). Llevaron a cabo una investigación que tenía como objetivo obtener un cereal para desayuno a base de harina de frutas deshidratadas como fuente de colorantes y antioxidantes. Se obtuvieron extrudidos de color rojizo y mayor contenido de antocianinas y compuestos fenólicos en comparación con el control. Se concluyó que la utilización de harina de frutas deshidratadas es una buena opción ya que puede reemplazar la utilización de

colorantes artificiales. En la actualidad se está prestando atención en materias primas no convencionales y su uso como materias primas en la elaboración de productos que puedan aportar beneficios al consumidor, pero para lograr esto es fundamental caracterizar la materia prima, evaluar si es factible su aplicación en la elaboración de ciertos productos.

2.3.1 *Oxalis tuberosa*

Los tubérculos de *Oxalis tuberosa* son conocidos con los nombres comunes de “oca” en Ecuador, Bolivia, Perú y Chile; “cuiba” o “quiba” en Venezuela; “macachin” o “miquichi” en Argentina; “huasisai” o “ibia” en Colombia y en México; “papa extranjera” o “papa roja”; “yam” en Nueva Zelanda; “truffette acide” en Francia, y “knollen-sauerklee” en Alemania (Montaldo, 1996). Su cultivo se extiende desde las huertas familiares de Acaxochitlán, Hidalgo, y es solo para consumo local en épocas navideñas. La forma del tubérculo varía desde formas ovoides a cilíndricas y claviformes. El color de la superficie varía de blanco a crema, amarillo, naranja, rosa y morado. En la región andina, *Oxalis tuberosa* se consume en sopas y estofados, al vapor, hervido o cocido al horno como patatas.

El cultivo de *Oxalis tuberosa* es muy importante en los Andes Centrales, especialmente en lugares húmedos entre 2800 y 4100 m; sin embargo, su cultivo se ha extendido a otros países como Nueva Zelanda, que se ha convertido en el principal exportador de este cultivo a los mercados europeos (Chirinos *et al.* 2009). Desde hace aproximadamente dos décadas este cultivo fue introducido a México, específicamente en el municipio de Tulancingo destaca la cosecha de este tubérculo, aunque la producción se hace a menor escala en comparación con otros países sudamericanos. *Oxalis tuberosa* puede ser más rentable que *Solanum tuberosa*, ya que tiene mayor potencial de productividad, se ha visto que presenta mayor resistencia a plagas y enfermedades, crece en climas extremos, y por último tiene un gran potencial de transformación en productos procesados.

2.3.1.1 Composición química de *Oxalis tuberosa*

Existen estudios donde se ha analizado la composición química de *Oxalis tuberosa* (Chirinos *et al.* 2009), con el fin de conocer a fondo que funcionalidad podría presentar en aplicaciones tecnológicas y nutrimentales. En la Tabla 2, se describe la composición proximal del tubérculo, se puede observar que la mayor parte de su composición es agua, hidratos de carbono, del cual se asume que, a comparación de otro tipo de tubérculos, predomina el contenido de almidón, el resto de los componentes presenta un contenido menor de 1%, por lo que no es considerada fuente de grasa y proteínas. Los minerales que se encuentran en mayor proporción son fósforo, calcio y zinc, en cuanto a vitaminas: a, B1, B2, B3, B12 y C. Respecto a los minerales mencionados anteriormente destaca el contenido de Calcio (40-247 ppm de MS) y hierro (8-49 ppm de MS). Así también el aporte de vitamina C (39.68 mg/100 g) (Chirinos *et al.* 2009).

Tabla 2. Composición proximal de *Oxalis tuberosa* *.

COMPONENTE	%
Húmedad	86.79
Carbohidratos	10.41
Grasa	0.47
Fibra	0.78
Cenizas	0.78
Proteína	0.77
Minerales	0.06
Vitaminas	0.04

*Chirinos *et al.* 2009.

2.4 Procesos de elaboración de cereales para desayuno

En general, los procesos de manufactura de los cereales para desayuno incluyen la combinación de ingredientes o materia prima, cocimiento, formación, horneado, saborizado y envasado (Figura 1) (Serna-Saldívar, 2013). La fabricación de cereales para el desayuno es un proceso sencillo, basado en las dos estrategias principales de fabricación de copos o extrusión. El grano se limpia, y si es necesario se muele para retirar la cáscara antes de proceso de cocinado. Cuando se trata de los cereales integrales, las capas fibrosas exteriores de grano se dejan intactas.

En el caso de los cereales en copos, se utilizan dos rodillos los cuales son utilizados para aplanar el grano, generando el laminado. Posteriormente se añaden ingredientes adicionales, además de vitaminas y minerales, el grano laminado se hornea y se seca para que quede crujiente. El proceso de los cereales por extrusión comienza con la molienda del grano para obtener harina, la cual después es mezclada con agua para formar una pasta. A continuación, se le da forma a la pasta con un extrusor. Al igual que los copos de cereales, los cereales obtenidos por extrusión pasan por un proceso de secado para aportarles su textura crujiente habitual (Kellogg's, 2018).

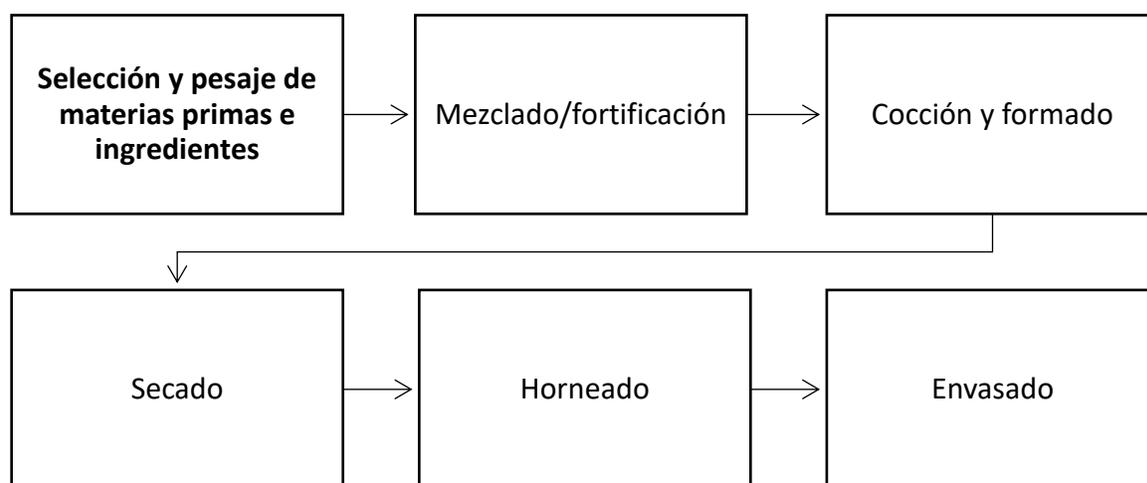


Figura 1. Diagrama de flujo generalizado para la producción de cereales para desayuno (Serna-Saldívar, 2013).

2.5 Extrusión

La extrusión es una tecnología desarrollada inicialmente en la industria de los plásticos, ahora se ha convertido en una tecnología ampliamente utilizada en la industria de procesamiento agroalimentario, donde se conoce como cocción por extrusión (Leszek, 2011). La extrusión es un proceso eficiente, continuo, el cual combina distintas operaciones, como son: mezcla, cizalla, calentado, formado y expandido (Tiwari & Jha, 2017). Hoy en día, la tecnología de cocción por extrusión se recomienda para la fabricación de distintos tipos de alimentos como son: cereales para el desayuno, snacks expandidos, sopas, alimentos para bebés, harinas precocidas, componentes funcionales, emulsiones, productos de confitería almidón gelatinizado y texturizados de proteínas vegetales (Leszek, 2011). La cocción por extrusión presenta numerosas ventajas sobre los métodos de procesamiento convencionales como son: producir una amplia gama de productos extruidos a partir de materias primas baratas, tiempos de procesamiento mínimos, permitiendo así una producción uniforme a través de un sistema eficiente y continuo, menores costos y mayor ahorro de energía, entre otras (Akhtar *et al.* 2015).

2.5.1 Tipos de extrusores

Los extrusores de alimentos se pueden clasificar en dos categorías: extrusores de tornillo simple o múltiples que rotan dentro de un barril fijo (Clextral, 2018). Los extrusores de diseño de tornillo simple son equipos adecuados para el procesamiento de materiales caracterizados por un alto coeficiente de fricción, como maíz o sémola de arroz; tales granos son materiales básicos para la producción de snacks expandidos, cereales para desayuno (Leszek, 2011). Un extrusor de tornillo simple tiene un solo tornillo que gira dentro de un cilindro y se basa en las fuerzas de fricción para transportar el material hacia adelante (Tiwari *et al.* 2017). La principal desventaja de los extrusores de un solo tornillo es la mala mezcla del material (Leszek, 2011), por lo tanto se recomienda que todos los componentes se mezclen en una licuadora antes de entrar al extrusor (Tiwari *et al.* 2017); una de las

desventajas que tiene este tipo de extrusor es que presenta una eficiencia limitada, especialmente cuando se usan mezclas multicomponentes de materias primas (Leszek, 2011). Los extrusores de doble tornillo son mucho más complejos, ya que tienen la capacidad de procesar formulaciones de materias primas más diversas a un rendimiento constante (Offiah *et al.* 2018); un extrusor de doble tornillo es un biorreactor de corta duración a alta temperatura que transforma una variedad de materias primas/ingredientes en productos terminados (Tiwari *et al.* 2017); este tipo de extrusores han ganado gran popularidad entre los productores de alimentos debido a su gran versatilidad, menor consumo de energía y la capacidad de ampliar el surtido de producción. Se caracterizan por una buena eficiencia de transporte de material, mezcla, plastificación y extrusión (Leszek, 2011). Algunas de las aplicaciones de los extrusores de doble tornillo son: recubrimientos de chocolates, dulces, gomas, cereales para desayuno.

En la actualidad existen diferentes tipos de extrusión.

Extrusión en frío: es usada para realizar mezclas suaves y moldear pasta, sin utilizar calor directo ni procesos de cocción dentro del extrusor. En lo relativo al procesamiento de alimentos, se usa principalmente para la producción de pasta y masa. Estos productos pueden ser procesados de manera consecutiva: secados, cocidos, envasados al vacío, congelados (Clextral, 2018). Mediante la extrusión en frío, la temperatura del alimento no aumenta y se obtienen productos de elevada densidad y elevada humedad, como galletas, panecillos o golosinas (Revelo, 2010).

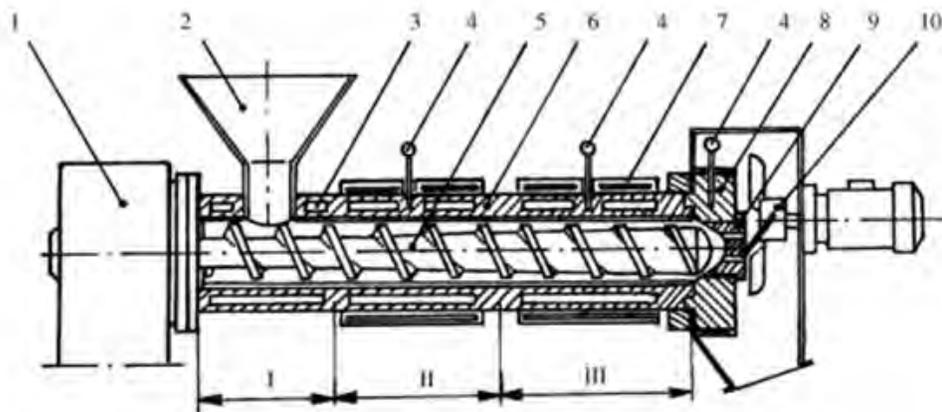
Extrusión en caliente: consiste en la transformación termomecánica de materias primas en lapsos de tiempo acotados, a altas temperaturas, y aplicando presión. En lo relativo al procesamiento de alimentos, se usa principalmente para la cocción de materias primas a base de biopolímeros, y para producir alimentos texturizados y productos alimentarios, tales como: cereales para el desayuno listos para ser consumidos, aperitivos (salados y dulces), alimentos para mascotas, pellets (Leszek, 2011).

Coextrusión: combina la expansión inducida por vapor y la inyección de relleno, dando como resultado productos expandidos con doble textura. La misma es

principalmente usada para elaborar cereales para desayuno y aperitivos (Leszek, 2011) (Clextral, 2018).

2.6 Proceso Tecnológico de extrusión

La cocción por extrusión es un proceso térmico de altas temperaturas en un corto tiempo (high temperatura/short time por sus siglas en inglés HT/ST) (Guy *et al.* 2001) que involucra el flujo forzado de un material a diferentes condiciones controladas de mezclado, cocción, amasado, formado, expansión y secado, es un proceso versátil, de bajo costo y una tecnología muy eficiente en el procesamiento de alimentos (Singh *et al.* 2007). El principal objetivo de la extrusión consiste en ampliar la gama de alimentos que componen la dieta, a partir de ingredientes básicos, alimentos de distinta forma, textura y color. El extrusor es una máquina para moldear materiales por el proceso de cambio de presión y calor, constando de un tornillo de Arquímedes o sin fin con los álabes helicoidales adheridas a su alrededor, con rotación corta, en una estrecha armadura cilíndrica (Tiwari *et al.* 2017). En la Figura 2 se muestra de forma esquemática las principales partes de un extrusor. El extrusor consta de tres secciones (Figura 2): la alimentación donde entra el producto, la de transición y en la parte final donde se produce la presión. En la parte de alimentación los álabes son altos y ayudan a transportar la masa. A medida que la masa avanza la presión aumenta de forma gradual hasta llegar a la sección donde se genera más presión. En la sección final se logra una alta homogenización del producto, lo que permite que se eleve la presión previa a la salida por el dado. Las características físicas como la expansión, la densidad y la dureza son parámetros importantes para evaluar la aceptabilidad del producto final por parte del consumidor (Leszek, 2011). El material previamente acondicionado es alimentado al extrusor para ser transportado por el tornillo sin fin a través del cañón. El papel del tornillo es transportar, comprimir, fundir y plastificar el material y forzarlo bajo presión a través de pequeños orificios en el extremo del cilindro, con el objeto de transformar su estructura granular en una masa semisólida plástica (Leszek, 2011).



1. motor, 2. alimentador, 3. camisa de refrigeración, 4. termopar, 5. tornillo, 6. barril, 7. camisa calefactora, 8. cabeza, 9. troqueles, 10. cortador
 Secciones: I. sección de transporte, II. sección de compresión, III. sección de fusión y plastificación

Figura 2. Principales partes de un extrusor (Tiwari *et al.* 2017).

Los mayores cambios que sufre el material se realizan dentro del cañón del extrusor, con ayuda del tornillo sinfín. Debido al calor generado por la energía mecánica que produce el tornillo, la misma transferencia de calor y la presión que va ejerciendo el material a través de los alabes del tornillo a una velocidad dada, provocan transformaciones formando un material viscoso y plastificado (Akhtar *et al.* 2015). La presión de vapor del agua de la masa que fluye dentro del cañón está relacionada con la temperatura a la que se encuentra, produciendo una mayor presión antes de emerger por el dado de salida del extrusor. Una vez en contacto con la presión ambiental sufre un cambio brusco de presión, lo que provoca que el agua contenida en el material se evapore instantáneamente, induciendo así la expansión del producto al salir por el dado del extrusor, lo que lleva a la formación de nuevas estructuras (Ye *et al.* 2017).

Actualmente existe una gran variedad de alimentos expandidos elaborados mediante complejas formulaciones que incluyen además del almidón, proteínas, grasas, azúcares y fibras; todos estos ingredientes tienen efectos sobre la expansión del extrudidos (Brennan *et al.* 2013).

2.7 Cambios estructurales y nutricionales durante la cocción por extrusión

La cocción por extrusión produce efectos variables en diferentes sistemas alimentarios, debido a la variable composición de almidón, proteínas, humedad y otros componentes presentes en la materia prima, lo cual influye directamente sobre la estructura y la textura del producto terminado (Offiah *et al.* 2018). La exposición a los efectos combinados de alta presión, alta temperatura y corte conduce a varias reacciones y modificaciones en la composición nutricional de los materiales alimenticios con los cambios resultantes en las propiedades funcionales (Brennan *et al.* 2013). Algunos de los cambios que ocurren en los compuestos químicos durante el proceso incluyen: gelatinización de almidón (Singh *et al.* 2007), solubilización y dextrinización del almidón, desnaturalización, polimerización o reticulación y texturización de proteínas, desactivación parcial o completa de enzimas, reacciones de pardeamiento (Offiah *et al.* 2018), formación de complejos entre amilosa y lípidos, y reacciones de degradación de vitaminas y pigmentos e inactivación de factores antinutricionales, dependiendo del tipo de materia prima y de las variables de cocción por extrusión (Brennan *et al.* 2008). La mayoría de estas reacciones químicas tienen lugar en la zona de alta presión del cilindro del extrusor (Offiah *et al.* 2018).

2.8 Ventajas y aplicaciones del proceso de extrusión

La tecnología de extrusión es un proceso de alta temperatura y corto tiempo que presenta grandes ventajas con relación a otros procesos de preparación de alimentos como son (Apró *et al.* 2000): 1) Flexibilidad de operación, permitiendo la obtención de una gran diversidad de productos, 2) Posibilidad de procesamiento en diversas formulaciones, permitiendo adecuar el nivel nutricional de acuerdo con las necesidades, 3) Bajo costo de procesamiento, 4) Tecnología simple, 5) Mínimo deterioro de nutrientes de los alimentos durante su procesamiento, 6) Eficiente

utilización de la energía, 7) Ausencia de efluentes, 8) Inactivación de enzimas y factores anti nutricionales, 9) Producción de alimentos inocuos. Además, esta tecnología presenta alta capacidad de producción, mejorando la digestibilidad de proteínas (por desnaturalización) y almidones (por gelatinización), para el consumo en la dieta humana. Todo esto en un único proceso, eficiente y rápido.

De acuerdo con Apró *et al.* (2000), las aplicaciones de esta tecnología pueden ser en varios sectores como se muestra en la Tabla 3:

Tabla 3. Principales usos del proceso de extrusión en los distintos sectores.

Alimentación humana	Cereales para desayuno, snacks (aperitivos salados y dulces), alimentos para bebés, sopas instantáneas, proteínas vegetales texturizadas, sustitutos de carne, harinas enriquecidas, sustitutos lácteos, aditivos de panificación, almidones modificados, productos de confitería, pastas, bebidas en polvo, ingredientes de sopas, galletas.
Alimentación animal	Cereales, oleaginosas y legumbres precocidas o ingredientes para alimentos balanceados, alimentos para rumiantes, cerdos, aves, animales de piel, peces, etc., procesamiento de subproductos o desechos de la industria alimentaria
Uso industrial	Industria del papel, industria textil, fundiciones metalúrgicas, perforación de pozos de petróleo, adhesivos y agentes ligantes, coadyuvantes de insecticidas y fungicidas.

III. JUSTIFICACIÓN

Los cereales para desayuno forman parte importante en la dieta de la mayor parte de la población mundial; Las materias primas utilizadas tradicionalmente en su elaboración, maíz, trigo y arroz, aportan grandes beneficios a la salud, entre ellos, aporte significativo de fibra, calcio, vitaminas y minerales, ayudan a que la dieta sea más equilibrada y variada, lo que favorece en la disminución de la prevalencia de sobrepeso y obesidad. En la actualidad se buscan materias primas que aporten nuevas características nutricionales a los productos alimenticios. *Oxalis tuberosa* es un tubérculo, con características muy particulares; en su composición química destaca su alto contenido en vitamina C, antioxidantes, alto contenido de almidón lo que lo hace una materia prima atractiva para ser transformada en un alimento funcional; en algunos países de Latinoamérica, ya se ha utilizado *Oxalis tuberosa* en la producción de “snacks saludables”, sin embargo, en México no se ha investigado su potencial de transformación en productos procesados. Para la elaboración de cereales matinales o de desayuno se han utilizado distintos procesos, uno de ellos, es la extrusión, la cual es una tecnología versátil, de bajo costo, alta productividad, gran capacidad de desarrollar una gama de productos de diferente textura, forma, sabor, tiempos de cocción más cortos, mayor digestibilidad, menos pérdida de compuestos bioactivos. Por lo anterior, se plantea la elaboración de un cereal para desayuno usando *Oxalis tuberosa*, como materia prima principal, adicionado con fibra de avena; esperando obtener un producto con características físicas deseables, alto contenido en fibra, rico en compuestos bioactivos y bajo índice glucémico.

IV. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Obtener y analizar las propiedades fisicoquímicas, funcionales y nutricionales de un extrudido tipo cereal para desayuno, utilizando como materia prima harina de *Oxalis tuberosa* adicionado con fibra.

4.2 Objetivos específicos

1. Elaborar un extrudido tipo cereal para desayuno a base de harina de *Oxalis tuberosa* adicionado con fibra mediante el proceso de extrusión.
2. Evaluar el efecto del contenido de humedad y la cantidad de fibra de avena utilizando un diseño experimental de punto central compuesto sobre las características fisicoquímicas (índice de adsorción de agua, índice de solubilidad de agua, índice de expansión y densidad aparente), nutricionales y de digestibilidad de los extrudidos.
3. Determinar las características estructurales de los extrudidos por medio de difracción de rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido.
4. Evaluar el índice glucémico y la capacidad antioxidante de los extrudidos obtenidos a base de harina de *Oxalis tuberosa* obtenidos mediante extrusión.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Materia prima

Se utilizó el tubérculo *Oxalis tuberosa* como materia prima, la cual fue comprada en el mercado local de Acaxochitlán Hidalgo, México. La fibra de avena (Vitacel®, HF 401) fue donada por el laboratorio J. RETTENMAIER USA LP. Todos los reactivos utilizados fueron grado analítico.

5.1.1 Preparación de la materia prima

5.1.1.1 Obtención de la harina de *Oxalis tuberosa*

Para la obtención de la harina de *Oxalis tuberosa*, las papas se lavaron y desinfectaron con agua y jabón (Detergente líquido marca Salvo), posteriormente, se cortaron con un rebanador de vegetales en rodajas finas, se colocaron en charolas de acero inoxidable (ver Figura 4), las cuales se metieron en un horno de convección (Marca Shel-Lab, modelo 1380FX) a una temperatura de 45 °C durante 24 horas. Después del secado las muestras se molieron utilizando una licuadora (Marca Oster modelo BPST02-B00) con una velocidad máxima durante 1 minuto, en seguida el tubérculo molido se cribó utilizando una malla (U. S) No. 40, luego de la molienda, la harina obtenida se colocó dentro de bolsas resellables, manteniéndose protegidas de la luz hasta su posterior uso.



Figura 3. *Oxalis tuberosa* rebanada, antes de colocarla en la estufa de secado.

5.2 Proceso de extrusión

Para la elaboración del extrudido “tipo cereal para desayuno” mediante el proceso de extrusión se elaboraron 5 formulaciones distintas (ver Tabla 4) en las cuales varió el contenido de: fibra de avena (0%-20%), harina de *Oxalis tuberosa* (80%-100%) y contenido de humedad (13%, 17.5% y 20%).

El proceso de extrusión se realizó en un extrusor marca Bühler modelo BCTM-30 (Uzwil, Suiza) (ver Figura 5) equipado con dos tornillos de 800 mm de longitud con relación largo/diámetro $L / D = 20$ utilizando una configuración para productos expandidos recomendada por la empresa Bühler. Los tornillos estuvieron funcionando a una velocidad constante de 250 rpm. El cañón del extrusor estuvo compuesto por 5 secciones de 120 mm de largo cada una, la primera sección de la configuración estaba conformada por elementos de transporte, la siguiente combinaba elementos de transporte y mezclado, la última sección del tornillo poseía dos elementos reversos, un elemento de amasado y elementos de transporte para generar alta cizalla.

Tabla 4. Diseño del experimento utilizado para obtener extrudidos con diferentes combinaciones de humedad de alimentación de extrusión/concentración de fibra de avena para la producción de extrudidos “tipo cereal para desayuno” a base de *Oxalis tuberosa* adicionados con fibra de avena.

Tratamiento	Fibra de avena (%)	Harina de <i>Oxalis tuberosa</i> (%)	Humedad (%)
Tratamiento 1	20	80	20
Tratamiento 2	0	100	20
Tratamiento 3	10	90	17.5
Tratamiento 4	20	80	13
Tratamiento 5	0	100	13

La materia prima ingresó al extrusor usando un alimentador automático a una velocidad de alimentación de 25.6 kg/h. Para que las harinas extrudidas tuvieran un contenido de humedad de 13%, 17.5% o 20%, el agua de alimentación fue introducida en la segunda sección del cañón variando su alimentación. La temperatura de la quinta zona del cañón se mantuvo entre 145 °C-155 °C, con la ayuda de un intercambiador de calor TT-137N (Tool-Temp, Sulgen, Suiza) acoplado a la quinta zona del cañón del extrusor inyectando agua caliente o fría. Se utilizó un dado de un solo orificio con un diámetro de 4 mm y los extrudidos fueron cortados utilizando tres navajas en la cortadora del extrusor a una velocidad de 300 rpm, posteriormente, los extrudidos fueron secados en un horno de convección marca Electrolux a 120 °C durante 15 minutos y se almacenaron en bolsas de plástico resellables a temperatura ambiente hasta su análisis.



Figura 4. Extrusor de doble tornillo (Bühler, Suiza) utilizado para la producción del extrudido tipo cereal para desayuno.

5.3 Métodos analíticos

5.3.1 Caracterización fisicoquímica

5.3.1.1 Índice de expansión

El índice de expansión se calculó siguiendo la metodología de Escalante-Aburto *et al.* 2014. El cual consistió en medir el diámetro de los extrudidos y dividirlo entre el diámetro del orificio del dado de salida del extrusor (4 mm). El diámetro de los extrudidos se obtuvo empleando un Calibrador digital Weston (Modelo STW-1116-150) con una precisión de 0.025 mm.

5.3.1.2 Densidad aparente

La densidad aparente de los extrudidos fue determinada utilizando un recipiente Winchester Bushel, de acuerdo con el método 55-10, AACC, 2005. Se utilizó una balanza analítica (Marca Sartorius), se pesó el recipiente Winchester Bushel que tenía un volumen conocido de 100 mL, posteriormente se llenó el recipiente con la muestra, se eliminó el exceso de esta con ayuda de una espátula de madera, por último, se pesó el recipiente con la muestra y se registró el dato. El resultado se expresó como g/ml.

5.3.1.3 Índice de solubilidad en agua (ISA) e índice de absorción de agua (IAA)

Para determinar el índice de solubilidad e índice de absorción de agua de los extrudidos se siguió el procedimiento descrito por Anderson *et al.* 1970, con algunas modificaciones. Se pesaron 2.5 g de muestra, (molido y tamizado), en un tubo de polipropileno de 50 mL previamente tarado, se adicionaron 30 mL de agua destilada a temperatura ambiente, los tubos se taparon y agitaron vigorosamente durante 1 min, se colocaron en un baño María a una temperatura de 30 °C con agitación constante a 70 rpm, durante 30 min, posteriormente, la muestra se centrifugó a 6000 rpm durante 10 min, después de la centrifugación, el gel sedimentado se separó por decantación vaciando el sobrenadante en charolas de aluminio previamente taradas y puestas a peso constante previamente las cuales se sometieron a evaporación a 90 °C en un horno de convección durante 24 horas después las charolas se dejaron enfriar por 30 minutos en un desecador y se pesaron para obtener el peso de los sólidos solubles (residuo de la evaporación) y así calcular el índice de solubilidad en agua (ISA). Después de decantar el sobrenadante, el sedimento remanente en el tubo se pesó y se expresó como gramos de agua absorbida por gramo de muestra seca.

Para obtener IAA se utilizó la siguiente fórmula:

$$IAA = \frac{\text{peso del residuo de centrifugación}}{\text{peso de la muestra} - \text{peso del residuo de evaporación}}$$

ISA se calculó mediante la siguiente formula:

$$ISA = \frac{\text{peso del residuo de la evaporación}}{\text{peso de la muestra}} \times 100$$

5.3.1.4 Determinación de Color

La determinación de color se realizó utilizando un colorímetro triestímulo Hunter Lab (MiniScan Hunter Lab, modelo 45/0L, Hunter Associates Lab., Ind., USA), registrándose el valor L* que indica la opacidad y luminosidad del producto en una escala de 0 a 100 respectivamente, así también se determinó el valor de a* que indica una tonalidad de rojo a verde en un rango de 0 a 100, y b* que indica una tendencia de tonos amarillos a azules en una escala de 0 a 100 respectivamente. Para poder llevar a cabo las mediciones, las muestras se cubrieron con plástico adherente.

5.3.1.5 Dureza

La dureza de los extruidos se determinó usando un analizador de textura TA-XT2i (Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido), equipado con una celda de carga estándar de 5 kg y una sonda cilíndrica de 2 mm en un modo de compresión por punción, para determinar la resistencia del extrudido a la penetración (dureza del extrudido). Los extruidos fueron perforados por la sonda a una velocidad de 2 mm/s a una distancia de 3 mm. La máxima fuerza de penetración se reportó en N.

5.4 Caracterización de propiedades estructurales

5.4.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de los productos extrudidos

Los análisis de microscopía electrónica de barrido se realizaron de acuerdo con el procedimiento de Zazueta-Morales *et al.* (2002). Las muestras se colocaron sobre una cinta conductora de cobre de doble adhesión, la cual se fijó previamente en un soporte de aluminio del microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-5800LV posteriormente las muestras se cubrieron con una capa de carbón de 30 nm y enseguida se colocaron en el ionizador de metales JEOL y se recubrieron con una capa de oro.

5.4.2 Análisis de rayos X de los productos extrudidos

El análisis de rayos X se realizó de acuerdo con los procedimientos y observaciones descritos por Martínez-Flores *et al.* (1997) y Zazueta-Morales *et al.* (2002). El análisis se realizó en la harina de *Oxalis tuberosa* y en los extrudidos, con el objetivo de determinar el efecto del procesamiento sobre la cristalinidad de los almidones. Las muestras fueron previamente molidas a un tamaño de partícula menor a malla (U. S) No.100, posteriormente se colocaron en un difractómetro de rayos X (D-500, Siemens, Madison, WI) el cual El difractómetro operó a 27 mV y 50 kV. La región de barrido con ángulo dos teta fue de 4° a 40° con un tamaño de paso de 0.05°, con un tiempo de conteo de 2 segundos. La cristalinidad relativa fue calculada de acuerdo al método de Hermen y descrito por Nara *et al.* (1978). El área de la fracción cristalina fue dividida entre el área de difracción de la muestra control. La cristalinidad relativa fue calculada como:

$$CR (\%) = \frac{(RCE \times 100)}{RCH}$$

Donde CR= cristalinidad relativa (%)

RCE= región cristalina del producto extrudido

RCH= región cristalina de la mezcla sin procesar (control).

5.5 Caracterización nutricional

5.5.1 Fibra dietética integrada

El contenido de fibra dietética integrada se determinó siguiendo la metodología reportada por McCleary *et al.* (2015) con algunas modificaciones. Se pesó 1 g de muestra en matraz Erlenmeyer, después se adicionó 1 mL de etanol al 98%, posteriormente se adicionaron 40 mL de mezcla enzimática (α -amilasa pancreática y amiloglucosidasa) y se llevó a incubación durante 16 horas a 37 °C. Después de 16 h, se retiraron las muestras del baño de agua e inmediatamente se colocaron en un baño de agua a ebullición (sin agitación) durante 20 min con agitación manual. Posteriormente se agregó 0.1 mL de solución de proteasa y se incubaron las muestras a 60 °C por 30 minutos, pasado este tiempo se adicionaron 200 mL de etanol y se dejó precipitar toda la noche. Al siguiente día, se prepararon los crisoles para filtrar, a los cuales se les añadió 0.1 mg de celite y se registró el peso, después se vertió el contenido de los matraces en los crisoles de filtrado, posteriormente se lavó el residuo con 60 mL de etanol al 78%, 40 mL de etanol al 96% y acetona, al término de la filtración los crisoles fueron colocados en un horno a 105 °C durante una noche, al día siguiente se enfriaron los crisoles en el desecador durante aprox. 1 h y después se registró el peso. Para seguir con el procedimiento, el residuo de un crisol se analizó en busca de proteínas y el segundo residuo del duplicado se analizó en busca de cenizas. Se realizó el análisis de proteínas en residuos usando Kjeldahl. Para el análisis de cenizas, se incineró el segundo residuo durante 5 horas a 525 °C, se enfrió en desecador y se pesó. Se restó peso inicial del crisol y el peso

final para determinar la ceniza. Para determinar el contenido de fibra dietética integrada se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Fibra dietética integrada} = \left(\frac{\text{Residuo} - \text{proteína} - \text{cenizas}}{\text{peso de la muestra en base seca}} \right) \times 100$$

5.5.2 Cuantificación de azúcares

La extracción de azúcares de las muestras se realizó siguiendo la metodología de Harrigan *et al.* (2007), con algunas modificaciones. Se pesaron 100 mg de muestra, de harina nativa de *Oxalis tuberosa* y de los extrudidos en un tubo Eppendorf de 2 mL, posteriormente se suspendió en 1 mL de una solución de etanol: agua (80:20), después las muestras se sometieron a mezcla durante 15 minutos en vortex a velocidad media. Inmediatamente las muestras se almacenaron durante 24 h a 4 °C, con el objetivo de permitir la extracción de los azúcares. Al día siguiente se agregaron 0.60 mL de agua a las muestras y se mezclaron nuevamente en vortex (10 minutos), posterior a esto las muestras se colocaron en un baño a 85 °C durante 5 minutos, transcurrido este tiempo, las muestras se centrifugaron a 11,000 g por 15 minutos a temperatura ambiente, después se separó el sobrenadante y se almacenaron a 4 °C hasta su uso. Las concentraciones de azúcares se analizaron con una cromatografía líquida de alta resolución (HPLC, modelo Waters HPLC Breeze, Milford, MA) equipada con un par bombas isocráticas (Waters 1515), un desgasificador de fase móvil (AF Waters), un automuestreador (Waters 717 plus), un detector de índice de refracción (Waters 2414) y el software Empower para procesar datos y controlar el equipo. Los analitos se separaron mediante una columna Shodex SH1011 (300 x 7.8 mm) con un caudal de 0.6 mL por minuto de agua de grado HPLC. La cuantificación del azúcar se realizó con una columna Shodex SP0810 y un desalinizador de catión / anión (Biorad). La temperatura de la columna se ajustó a 85 °C para azúcares, mientras que el detector (detector de índice de refracción Waters 2414) y el automuestreador a 50 °C y 4 °C, respectivamente. Se usaron patrones de etanol, celobiosa, D-glucosa, D-xilosa, L-arabinosa, D-manosa, D-galactosa, ácido acético, 5-hidroximetilfurfural y furfural

(Sigma Chemical Co. St. Louis, MO). Los tiempos de ejecución para la cuantificación de los azúcares fue de 20 minutos.

5.5.3 Digestibilidad del almidón y predicción del índice glicémico

La digestibilidad *in vitro* del almidón se determinó usando el método propuesto por Holm *et al.* (1986). Se pesaron 500 mg de almidón disponible (en base seca de los extrudidos), que fueron dispersados en 50 mL de regulador de fosfato en un vaso de precipitado, que posteriormente se colocaron en un baño a 37 °C. Durante los primeros 5 min y antes de agregar la enzima se tomaron alícuotas de 200 µL de la muestra (con la finalidad de marcar el tiempo cero). Las cuales fueron puestas en tubos que contenían 800 µL de agua destilada y 1 mL del reactivo de ácido Dinitrosalisílico (DNS). Posteriormente a intervalos de 30 s se agregaron a cada uno de los vasos 1 mL de la solución enzimática (amilasa pancreática), incubándose a 37 °C con agitación constante. A tiempos intermedios: 15, 30, 45, 60, 75 y 90 min, se tomaron alícuotas de 200 µL, que se agregaron a tubos que contenían 800 µL de agua destilada y 1 mL de DNS (las alícuotas se tomaron en estricto orden, como se agregó la enzima y respetando los 3 s entre muestras). A continuación, los tubos se sumergieron en un baño de agua a ebullición por 15 min, pasado este tiempo se dejaron enfriar y reposar para agregarles 15 mL de agua destilada. Se agitaron y se determinó la densidad óptica a 530 nm. Previamente se preparó una curva tipo de maltosa para poder calcular los azúcares reductores que se reportan como equivalentes de maltosa La predicción del índice glucémico se calculó usando la ecuación propuesta por Goñi *et al.* (1997):

$$pGI=39.21+0.803(H_{90})$$

H₉₀= porcentaje de hidrólisis a los 90 min

5.5.4 Actividad antioxidante celular (AAC)

La actividad antioxidante celular se determinó siguiendo la metodología reportada por Wang *et al.* (2013) y Wolf *et al.* (2007), con algunas modificaciones. Se partió de una placa de cultivo celular con una confluencia mayor o igual a 90%, se levantaron las células con Tripsina + EDTA y se realizó un conteo, se preparó una suspensión de 6.5 mL con una concentración de 500,000 cel/mL, se añadieron 100 µL de la suspensión celular a cada pozo para obtener 50,000 cel/pozo, se colocaron 100 µL de Agua o PBS en las orillas. Después de haber transcurrido 24 h se colocaron los extractos y soluciones. Se realizaron las diluciones pertinentes de los extractos a probar en DMEM-F12 a una concentración de 2X. Se colocó en proporción 1:1 el DCFH a 120 µM en cada muestra. Se retiró el medio de las células cuidadosamente, se vertieron 100 µL de PBS estéril en cada pozo y se agitó con cuidado, posteriormente se eliminó el PBS de lavado. Se repitió el lavado nuevamente y se revisó en el microscopio que la integridad de las células no se hubiera comprometido. Se colocaron 100 µL de DMEM-F12 en el control negativo, 100 µL de DMEM-F12+DCFH 60 µM en el control positivo y Blanco, 100 µL de los extractos con medio DMEM-F12 que contenían DCFH 60 µM (S1:S16), se dejó incubar a 37°C durante 20 min. Una vez que transcurrió el tiempo de incubación se removió el medio de los pozos con mucho cuidado, se eliminó el PBS de lavado, se repitió el lavado 2 veces, se adicionaron 100 µl de APPH en todos los pozos. Se inició el proceso de lectura del programa por 2 h con lecturas cada 2 min para medir fluorescencia 485/528. El área bajo la curva de fluorescencia a través del tiempo se integró y se eliminó la fluorescencia del valor de células blanco. Las unidades de CAA se calcularon de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$CAA\ unit = 1 - \frac{\int SA}{\int CA}$$

Donde, SA es el área integrada de las muestras a través del tiempo y CA es el área integrada del control positivo.

5.6 Diseño experimental y análisis Estadístico

El diseño experimental utilizado fue un diseño de dos factores cada uno con tres niveles, los cuales fueron humedad (13%, 17.5% y 20%) y contenido de fibra de avena (0%, 10% y 20%). Se empleó un diseño experimental central compuesto, rotatable ($\alpha= 0.05$). El modelo estadístico fue el siguiente:

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2$$

Donde y_i es la respuesta genérica, x_1 es el porcentaje de humedad, x_2 es el porcentaje de fibra de avena. b_0 , b_1 , b_2 , b_{11} , b_{22} , b_{12} , son los coeficientes de regresión. La significancia estadística de los modelos fue confirmada por el análisis de varianza, y la influencia de las variables se analizó utilizando gráficos de superficie de respuesta, con la ayuda del programa estadístico Minitab 18.

Los datos fueron analizados con una prueba de análisis de varianza (ANOVA) usando un nivel de confianza de 95% ($\alpha=0.05$). Para la comparación de medias se utilizó el método de comparaciones múltiples de Tukey al mismo nivel de significancia. El análisis estadístico se realizó con el programa estadístico Sigma Stat 12.5 (SYSTAT software, 2010).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Obtención de los extrudidos tipo cereal para desayuno

En la Figura 6 se puede observar la apariencia física de los extrudidos correspondientes a los distintos tratamientos (Tabla 4). Cada tratamiento tuvo distintas características de color, forma y textura. Los tratamientos 1 y 2 (Figura 6 a y b, respectivamente) fueron procesados con un contenido de humedad del 20% lo cual afectó de manera importante en los atributos de cada uno. La diferencia que más destaca, entre estos dos tratamientos fue el color, el cual está dado principalmente por la formulación del producto y el impacto del proceso sobre la materia prima. Sin embargo, el impacto del proceso no solo se vio reflejado en el color, sino también en la textura del extrudido, ya que se ha reportado que un mayor contenido de humedad durante el proceso de extrusión propicia una estructura más compacta y por lo tanto una expansión reducida del producto, que fue lo que sucedió en estos tratamientos. Por otro lado, el tratamiento 3 (Figura 6c) tuvo una forma más definida, pero conservando la estructura interior compacta, lo cual nos hace pensar que en este caso la humedad (17.5%) siguió afectando de una manera similar a los tratamientos descritos anteriormente. Por último, los tratamientos 4 y 5 (Figura 6 d y f, respectivamente) fueron distintos a los anteriores, se pueden observar productos más expandidos, lo cual puede atribuirse al bajo contenido de humedad, no obstante, el tratamiento 4 siguió teniendo una forma diferente lo cual se atribuyó al efecto de la adición de la fibra, que ya se ha visto limitó la expansión del producto. Cabe mencionar que la forma que se eligió para los extrudidos fue de “bolita”, sin embargo, en los tratamientos con mayor contenido de humedad no fue posible obtener la forma deseada, ya que no se pudieron cortar debido al contenido de humedad del producto y a la textura que presentó la masa; ese tipo de textura en las muestras generan más de un 10% de torque en la cortadora, y se sabe que un valor mayor de 10% de torque causa daño en las navajas y a la cortadora, por lo que se decidió no cortarlos.

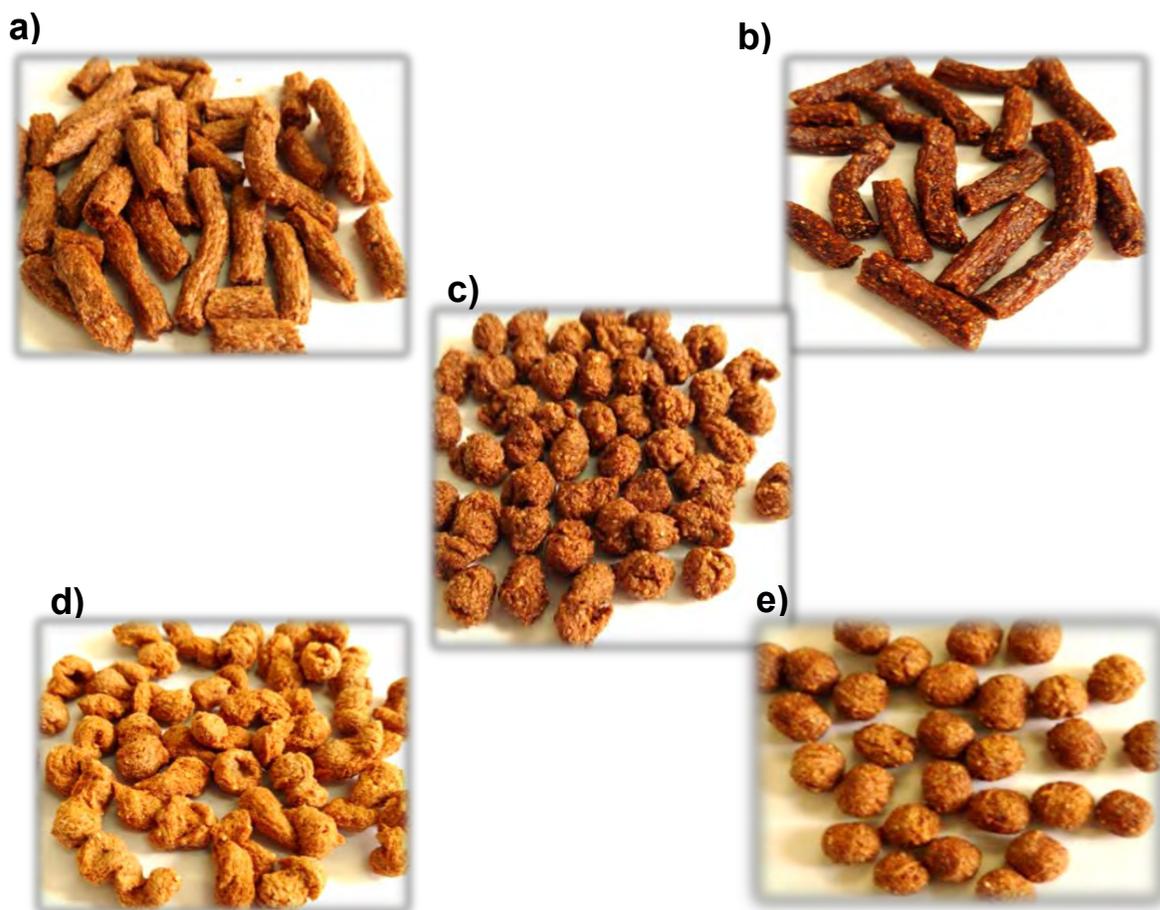


Figura 5. Apariencia física de los extrudidos tipo cereal para desayuno a base de *Oxalis tuberosa* adicionados con fibra de avena. **a) Tratamiento 1** (80% *Oxalis tuberosa*, 20% fibra, 20% humedad). **b) Tratamiento 2** (100% *Oxalis tuberosa*, 0% fibra, 20% humedad). **c) Tratamiento 3** (90% *Oxalis tuberosa*, 10% fibra, 17.5% humedad). **d) Tratamiento 4** (80% *Oxalis tuberosa*, 20% fibra, 13% humedad). **e) Tratamiento 5** (100% *Oxalis tuberosa*, 0% fibra, 13% humedad).

6.2 Caracterización fisicoquímica

6.2.1 Índice de expansión (IE)

En la Tabla 5 se muestran los valores de índice de expansión (IE) de los diferentes tratamientos, los cuales variaron entre 1.32 y 2.56. Mientras tanto, el comportamiento gráfico del efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre el índice de expansión se muestra en la Figura 7, donde se aprecia que el IE aumentó a medida que el contenido de humedad y fibra de avena disminuyó. Sin embargo, de acuerdo con el porcentaje de contribución de cada factor (Tabla 6) la humedad contribuyó en un 50% al comportamiento del índice de expansión. La alta dependencia de la expansión en relación con la humedad fue el resultado de su influencia en las características elásticas de los materiales ya que un alto contenido de humedad durante la extrusión reduce la fricción (mecánico-cizalla) entre la masa y la superficie interna del extrusor por lo cual no se genera la expansión deseada, así también reduce la elasticidad mediante la plastificación del material fundido y por lo tanto la energía mecánica específica, lo que disminuye la gelatinización dando como resultado una menor expansión y un aumento de la densidad aparente (Tiwari *et al.* 2017). Por el contrario, un bajo contenido de humedad durante la extrusión contribuye a la formación de burbujas junto con la acción de la temperatura (Guy *et al.* 1988), lo que permite que se forme una matriz que atrapa el vapor de agua y permite la formación de burbujas y de esta manera el material se expande (Thymi *et al.* 2005). Sin embargo, el contenido de fibra de avena también ejerció un papel importante en el índice de expansión (Delgado-Nieblas, *et al.* 2014) ya que puede romper las paredes de las burbujas de aire debido a la baja compatibilidad entre las partículas de fibra y de almidón, así también puede contribuir a la reducción de la cantidad de almidón gelatinizado en el material fundido y así producir un mayor colapso de las burbujas de aire evitando así la expansión del producto (Zambrano-Zaragoza *et al.* 2013).

Tabla 5. Resultados de los parámetros fisicoquímicos y de digestibilidad, determinados en los extrudidos tipo cereal para desayuno correspondientes a los distintos tratamientos.

Variables de procesamiento		Respuestas fisicoquímicas											
Avena	Humedad	IE	DA	ISA	IAA	DZA	IH	pGI	FDT	AAC	L*	a*	b*
%	%		g/cm ³	% g/g	g/g	N	%		%	%			
20	20	1.3±0.1	0.4±0.01	32.0±0.5	3.8±0.2	321.5±6.7	42.2±0.4	72±1.7	29.3±0.5	61.5±1.2	34.2±2.8	9.3±0.8	13.1±2.0
0	20	1.6±0.1	0.5±0.01	33.7±0.5	4.0±0.4	422.0±2.8	49.8±0.5	79±0.4	14.4±0.8	73.4±3.9	10.5±0.5	16.2±1.3	17.5±0.5
10*	17.5*	1.6±0.1	0.2±0.01	36.0±0.8	4.2±0.5	168.0±2.1	49.6±1.1	79±1.0	20.3±0.9	73.2±5.8	39.3±1.7	6.2±0.2	7.8±0.5
20	13	1.7±0.2	0.1±0.01	44.4±0.6	2.8±0.2	157.8±2.8	43.8±0.1	76±1.0	21.3±1.6	54.5±0.8	42.9±1.5	8.9±0.1	15.2±0.3
0	13	2.6±0.1	0.1±0.01	49.9±0.6	3.7±0.1	124.7±2.7	53.5±1.1	80±1.0	13.1±0.2	74.1±0.3	42.7±0.2	6.3±0.1	7.4±0.2
Harina nativa de Oxalis tuberosa									10.5±1.9	71.2±0.3			
Fibra de avena									82.5±1.7	76.4±1.1			

IE=índice de expansión, DA=Densidad aparente, ISA=Índice de Solubilidad en Agua, IAA=Índice de Absorción de Agua, DZA= Dureza, IH=Índice de Hidrolisis, pGI=predicción del índice glucémico, FDT=Fibra Dietética Total, AAC=Actividad Antioxidante Celular, L*=Luminosidad, a*=rojo a verde, b*=amarillo a azul.

*punto central del diseño de experimentos

El índice de expansión de los distintos tratamientos está dentro de los valores reportados para extrudidos expandidos. En un estudio realizado por Escalante-Aburto *et al.* (2014), al elaborar bocadillos expandidos con harina nixtamalizada de maíz azul obtenidos mediante extrusión, el índice de expansión obtenido varió de 1.71 a 3.26. Valenzuela-Lagarda *et al.* (2016) elaboraron una botana expandida a base de una mezcla de harinas de calamar, papa y maíz, el índice de expansión de las botanas expandidas varió de 0.77 y 2.87, observando el mismo comportamiento, la disminución en el contenido de humedad de la alimentación proporcionó una mayor expansión. Por otro lado, Wang & Ryu (2013), evaluaron las propiedades físicas de un extrudido al cual se añadió fibra de maíz, reportando un comportamiento similar, ya que con un mayor contenido de fibra el índice de expansión disminuyó.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, el contenido de humedad y la adición de fibra de avena influyeron de manera significativa en el índice de expansión del producto; los resultados obtenidos en cuanto a este parámetro son bajos en comparación con cereales para desayuno comerciales (Zhang *et al.* 2014), sin embargo, el uso de harina de *Oxalis tuberosa* puede dar mejores resultados optimizando las condiciones de procesamiento.

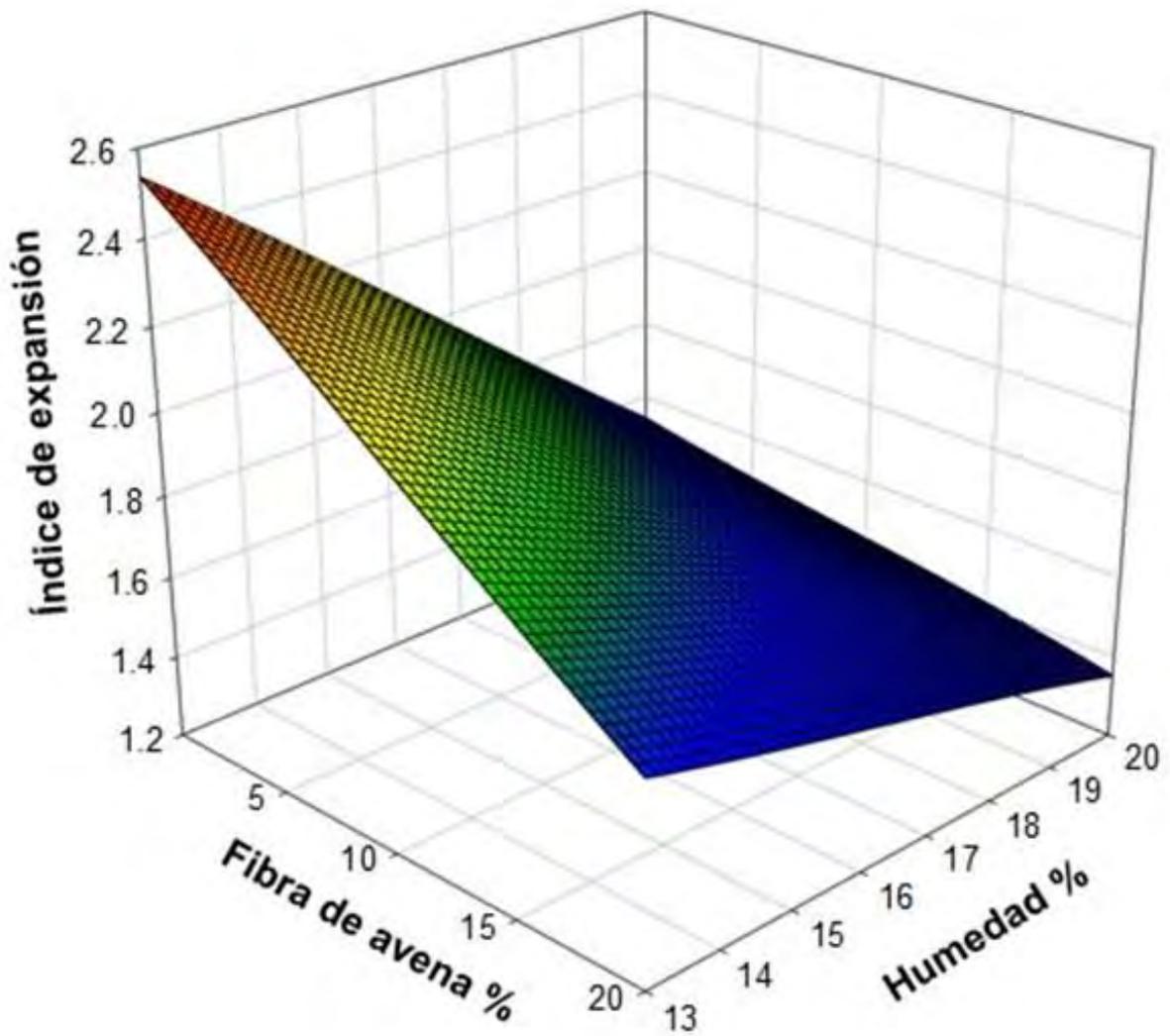


Figura 6. Efecto del contenido de fibra de avena y la humedad sobre el índice de expansión de los extrudidos tipo cereal para desayuno.

Tabla 6. Porcentaje de contribución de cada factor, sobre los parámetros fisicoquímicos y de digestibilidad evaluados en los extrudidos tipo cereal para desayuno.

Factores	IE	DA	ISA	IAA	DZA	IH	pIG	FDT	AAC	L*	a*	b*
A	18.9*	4.0*	19.0*	0.04	82.1*	67.3*	65.0*	69.4*	35.7*	27.5*	13.7*	0.00
H	50.1*	86.6*	8.4*	9.2	1.2*	7.4*	13.1*	6.0	1.8	52.8*	32.1*	14.2*
A²	0.01	20.9*	43.8*	25.9*	0.3*	12.6*	15.5*	0.00	24.0*	19.6*	44.3*	54.7*
A*H	12.4*	1.7*	27.8*	19.3	39.2*	1.2*	4.2*	5.3	2.7	17.3*	27.6*	33.4*

IE=índice de expansión; DA=Densidad aparente; ISA=Índice de Solubilidad en Agua; IAA=Índice de Absorción de Agua; DZA=Dureza; IH=Índice de Hidrolisis; pIG=predicción del índice glucémico; FDT=Fibra Dietética Total; AAC=Actividad Antioxidante Celular; L*=Luminosidad; a*=rojo a verde; b*=amarillo a azul; A = Avena; H = Humedad
*p < 0.05

6.2.2 Densidad Aparente (DA)

Los valores de Densidad Aparente estuvieron en un intervalo de 0.13-0.51 g/cm³, donde los valores más bajos de DA presentaron los valores más altos de IE. Debido a que entre mayor es la expansión hay más burbujas de aire en los extrudidos por lo tanto la densidad del producto disminuye. Cabe mencionar que los resultados obtenidos en este trabajo son menores a los valores que se han reportado en un cereal para desayuno comercial (Wójtowicza *et al.* 2015). En la Figura 8, se muestra como influyeron las variables de estudio en la densidad aparente de los extrudidos, se puede observar que los extrudidos con menor densidad fueron aquellos con menor contenido de fibra y baja humedad, por el contrario, los extrudidos que presentaron mayor densidad (0.51 g/cm³) fueron aquellos que se procesaron a una humedad del 20%, esto puede deberse a que un aumento en el contenido de humedad durante la extrusión reduce la gelatinización y disminuye la expansión e incrementa la densidad del material extruido (Thymi *et al.* 2005). La relación de expansión y la densidad aparente, que son características importantes para los productos extrudidos, se pueden controlar mediante la configuración de las condiciones de procesamiento de la extrusión, incluidas las especificaciones de la materia prima. Lo cual trae consigo que la adición de fibra pudo haber provocado una menor expansión y una mayor densidad aparente, debido a que las partículas de fibra tienden a romper las paredes celulares del extrudido, causando el comportamiento mencionado. Singh *et al.* (2014) quienes desarrollaron aperitivos extrudidos a base de una mezcla de papa, arroz y garbanzo, obteniendo resultados de densidad aparente de 0.27 y 0.34g/cm³, el valor más alto se obtuvo en aquellas muestras procesadas a una humedad alta (19.4%), comportamiento similar al observado en este trabajo de investigación. Distintos autores han investigado el efecto de la inclusión de fibra en el proceso de extrusión. Brennan *et al.* (2008) estudiaron el efecto de la inclusión de fibra soluble e insoluble en productos de cereales para desayuno extrudidos, usando cinco ingredientes ricos en fibra dietética a niveles de reemplazo del 5%, 10% y 15% en una base de cereal de harina blanca para producir un cereal extrudido, encontrando que la inclusión de las fibras dietéticas no tuvo un efecto significativo en la relación de expansión de los

productos, sin embargo, la densidad aparente de los productos extruidos aumentó; en este trabajo, la adición de fibra en los extruidos disminuyó el índice de expansión y aumentó la densidad aparente. Ferreira *et al.* (2011) desarrollaron un extruido a base de maíz adicionado con salvado de trigo (0-24.6%), aquellos extruidos con mayor contenido de salvado y procesados a humedad alta (29.7%) dando como resultado productos de menor índice de expansión y por lo tanto mayor densidad aparente, comportamiento similar al observado en los extruidos elaborados a base de harina de *Oxalis tuberosa*.

En esta investigación los porcentajes de humedad y cantidad de fibra de avena adicionados, redujeron posiblemente la elasticidad de la masa mediante la plastificación del almidón, disminuyendo la energía mecánica específica y, por lo tanto, la gelatinización, lo que dio como resultado un menor índice de expansión y aumentando la densidad aparente del extruido, por otra parte la adición de fibra de avena contribuyó con la reducción de la expansión y por lo tanto con la formación de una estructura más compacta de los extruidos.

6.2.3 Índice de solubilidad en agua (ISA) e índice de absorción de agua (IAA)

Los resultados obtenidos para el índice de solubilidad en agua (ISA) se encontraron en un intervalo de 32.3-49.1% (Tabla 5), como se puede observar los valores son similares en comparación con lo reportado para cereales para desayuno comerciales (4-40%) (Zhang, *et al.* 2014). Sin embargo, existen diferencias entre los valores, lo cual se puede deber principalmente a las materias primas utilizadas para la elaboración de cereales comerciales y la que se utilizó en este proyecto de investigación, otro factor importante son los parámetros de procesamiento utilizados.

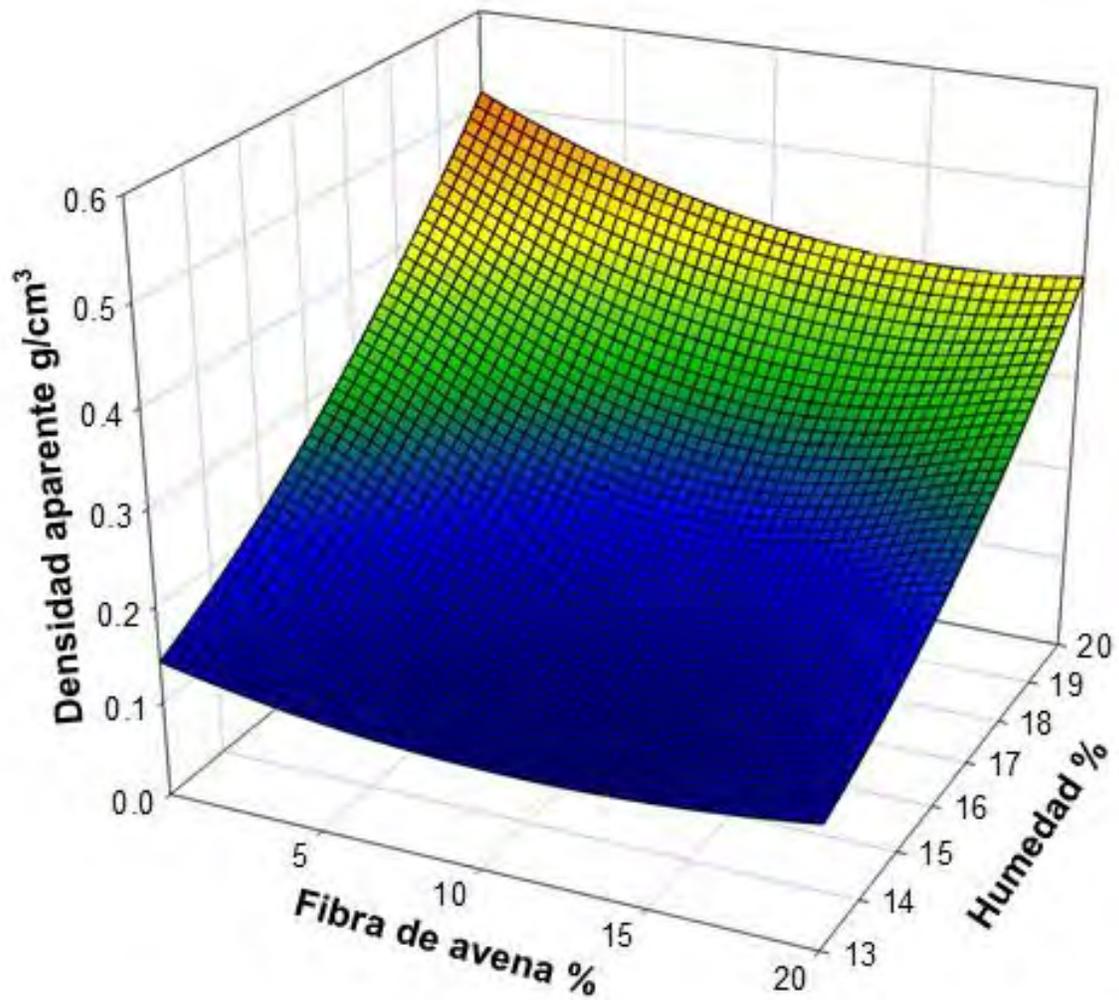


Figura 7. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad en la densidad aparente de los extrudidos tipo cereal para desayuno.

En la Figura 9 se muestra la gráfica de superficie de respuesta donde se observa que a medida que incrementa el contenido de humedad el ISA disminuye. Esto podría deberse a que una mayor cantidad de agua reduce la fricción de la masa con el extrusor y el efecto de cizallamiento disminuye por lo que la fragmentación del almidón es limitada.

Una tendencia similar fue observada por Ding et al. (2005) y Camacho-Hernández et al. (2014), los cuales observaron que, al aumentar el contenido de humedad el ISA disminuía significativamente, este comportamiento lo atribuyeron al grado de gelatinización de las muestras. El ISA está relacionado con la cantidad de moléculas solubles, lo que se correlaciona con el aumento de la dextrinización (degradación de los componentes del almidón a cadenas más cortas) por la temperatura y esfuerzo de corte durante la extrusión (Ding et al. 2006). Los valores más altos de ISA encontrados en esta investigación son aquellos que fueron procesados con un menor contenido de humedad lo cual está relacionado con una mayor degradación del almidón provocado por la severidad del proceso. Similar comportamiento fue reportado por Charunuch et al. (2011), al desarrollar un cereal para desayuno a base de una mezcla de harina de distintos vegetales, variando el contenido de la mezcla de vegetales (8, 12 y 16%), la velocidad del tornillo (300, 350 y 400 rpm) y el contenido de humedad (13, 15 y 17%), observando que a menor contenido de humedad el ISA aumentaba considerablemente. En la Tabla 5 se reportan los resultados de índice de absorción de agua (IAA) de los extrudidos. Mientras que en la Figura 10 se observa el comportamiento general que tuvieron los tratamientos respecto al IAA. Se puede notar que los resultados muestran un comportamiento diferente a los obtenidos en el ISA. El tratamiento con 17.5% de humedad y 10% de fibra (T3) obtuvo el mayor valor de IAA, por el contrario el tratamiento con 13% de humedad y 0% de fibra (T5) presentó el menor valor, mientras que los tratamientos que presentaron diferencias estadísticas significativas fueron los tratamientos 2, 3, y 4. Brennan *et al.* (2008) mencionan que la adición de cualquier tipo de fibra en la elaboración de un cereal para desayuno puede aumentar la absorción de agua, sobre todo si hay fibra soluble.

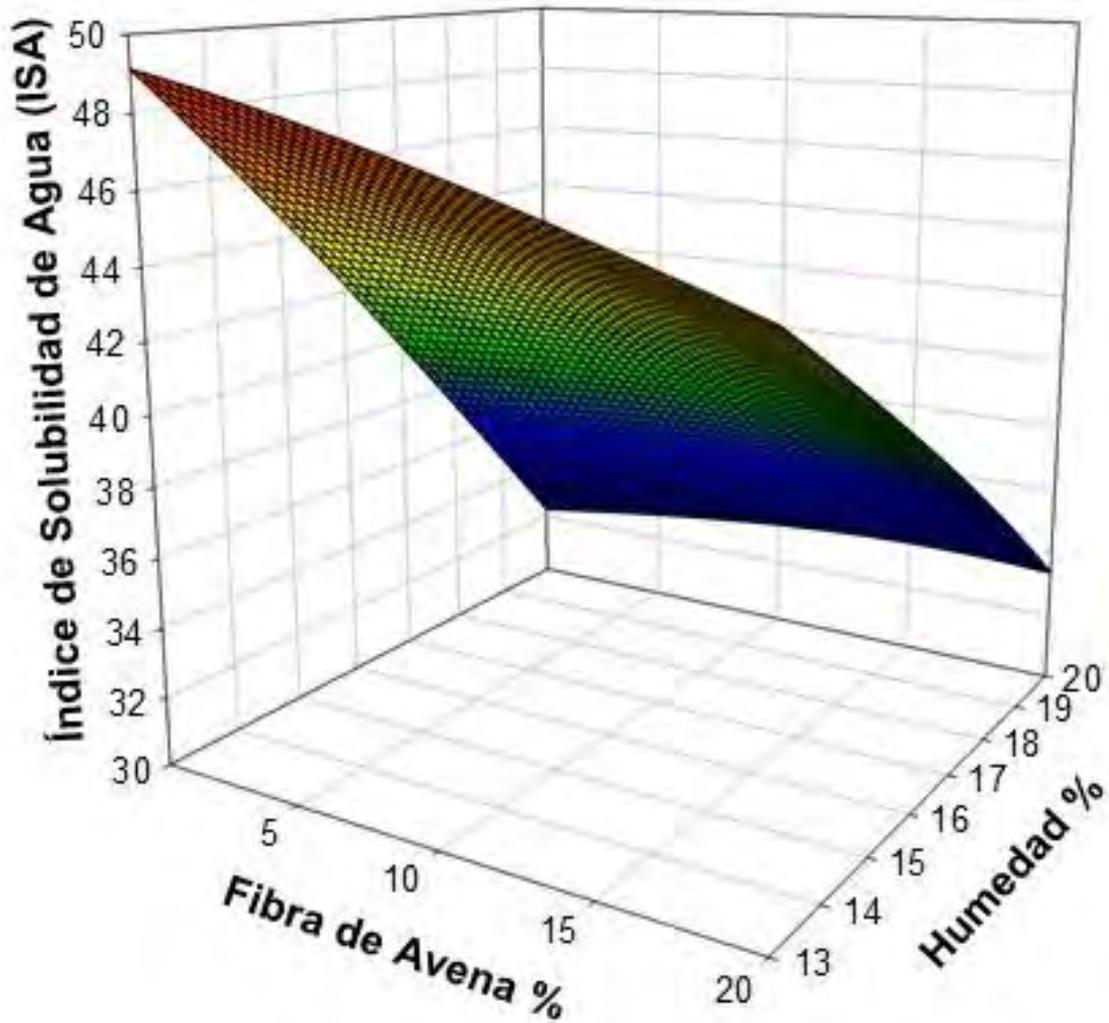


Figura 8. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad en el índice de solubilidad en agua (ISA) de los extrudidos tipo cereal para desayuno.

Fernández-Gutiérrez *et al.* (2004) mencionan que el IAA depende de la disponibilidad de grupos hidrofílicos que se unen a las moléculas de agua, así como también de la capacidad de formar geles, mientras que por el contrario a menor capacidad de hidratación se favorece debido a la formación de enlaces inter e intramoleculares de las proteínas y fibra con la amilosa y la amilopectina.

Singh *et al.* (2007) reportaron un comportamiento similar al que se obtuvo para el IAA en este trabajo, ya que observaron que el incremento en el contenido de humedad y la temperatura de extrusión de guisantes y sémola de arroz dio como resultado en un incremento en el IAA. San Martín *et al.* (2004) reportaron que cuando se obtienen valores altos de ISA, los valores de IAA usualmente son bajos, debido a que después del proceso de extrusión se obtienen carbohidratos simples y dextrinas, lo cual aumenta la solubilidad y reduce la capacidad de absorción de agua.

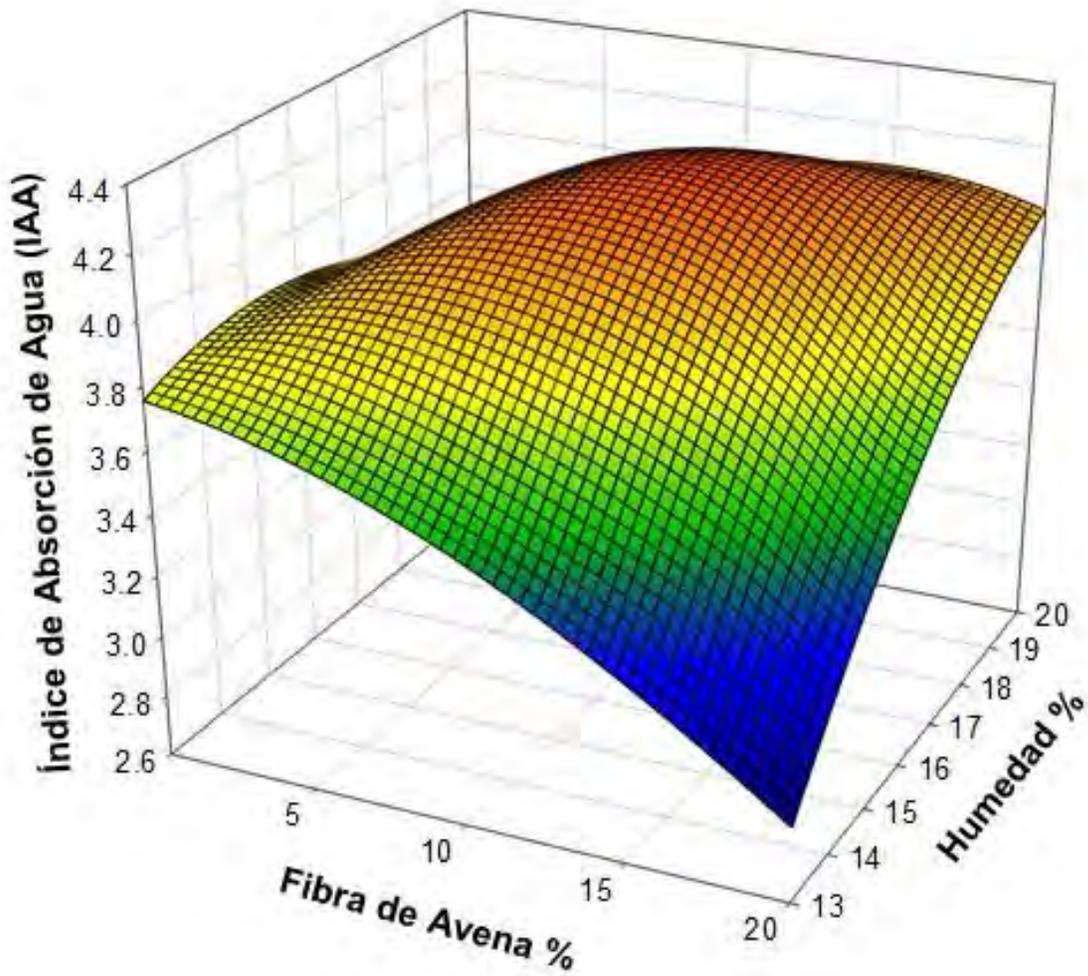


Figura 9. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre el índice de absorción de agua de los extrudidos tipo cereal para desayuno.

6.2.4 Color

Los valores para los parámetros de color se presentan en la Tabla 5, por otro lado, el efecto del contenido de humedad y fibra de avena se presenta en la gráfica 11. Los valores obtenidos para L^* oscilaron entre 10.46-42.96, el valor más bajo lo obtuvo el tratamiento 2 (0% de fibra de avena y 20% de humedad), y el valor más alto lo obtuvo el tratamiento 4 (20% de fibra de avena, 13% de humedad). Sin embargo, los porcentajes de contribución que se muestran en la Tabla 6 indican que el contenido de humedad fue el factor que más afectó la Luminosidad (L^*) debido a que presentó un 52.79% mientras que el contenido de fibra de avena solo contribuyó en un 27.48%. Los valores positivos y negativos de a^* indican tonos rojos y verdes que van de 0 a 100 respectivamente. Los valores de a^* de los extrudidos “tipo cereal para desayuno” oscilaron entre 6.21 a 16.20, el valor más bajo fue para el tratamiento 3 (17.5% de humedad, 10% de fibra de avena), y el valor más alto al tratamiento 2 (0% de fibra de avena, 20% de humedad). Los valores positivos y negativos de b^* indican tonos de amarillo a azul, que van en una escala de 0 a 100 respectivamente. En la Tabla 5 se presentan los valores de b^* en los extrudidos “tipo cereal para desayuno”, los cuales oscilaron entre 7.24 a 17.86, el valor más bajo fue obtenido por el tratamiento 5 (13% de humedad, 100% de harina de *Oxalis tuberosa*), por el contrario, el valor más alto lo obtuvo al tratamiento 2 (100% de harina de *Oxalis tuberosa*, 20% de humedad). Diversos trabajos se han llevado a cabo con el objetivo de evaluar el impacto del proceso de extrusión sobre el color de los extrudidos. Charunuch *et al.* (2011) reportaron que los extrudidos elaborados a base de harina de mezcla de vegetales presentaron un aumento de la luminosidad a medida que disminuía el contenido de humedad. Por su parte, Liu *et al.* (2000) evaluaron el efecto de las variables de la velocidad del tornillo (200, 300 y 400 rpm), contenido de humedad (18, 19,5 y 21%) y diferentes porcentajes de harina de avena (55, 70, 85 y 100%), sobre las propiedades físicas del extrudido (expansión, densidad aparente y perfiles de textura) y observaron que el parámetro de color L^* presentó una disminución a medida que se incrementó el contenido de humedad. Además, Ferreira *et al.* (2011) mencionan que el color de un extrudido es influenciado tanto por la temperatura, como por la composición de la materia prima,

el tiempo de residencia, la humedad, y el cizallamiento. En la Figura 12 se muestra la gráfica de superficie de respuesta donde se observan los efectos de las variables de procesamiento de extrusión sobre el parámetro de color a^* . Se puede observar que de acuerdo con los valores numéricos obtenidos de a^* , se puede afirmar que los extrudidos presentan una tonalidad rojiza, por otro lado, a medida que aumentó el contenido de humedad (20%), los valores de a^* también aumentaron. La coloración característica de este parámetro está dada por lo general por las antocianinas, por lo que la degradación de estos compuestos origina una disminución en los valores positivos (Escalante-Aburto *et al.* 2014). En la Figura 13 se muestra la gráfica de superficie de respuesta, donde se puede ver el efecto de la interacción entre la humedad y el contenido de fibra de avena sobre el parámetro b^* del producto extrudido. Se observó que a medida que el contenido de fibra disminuye y la humedad aumenta, el valor de a^* se incrementa. Esto se puede deber a que un menor contenido de humedad podría contribuir con la destrucción de los flavonoides y pigmentos de carotenoides, que generalmente son responsables del color amarillo y naranja. Escalante-Aburto *et al.* (2014) elaboraron extrudidos a base de maíz azul, los factores de estudio fueron: contenido de humedad (15-23%), concentración de hidróxido de calcio (0-0,25%) y temperatura final del extrusor (110-150°C). Los autores observaron que a medida que aumentaba la humedad los valores positivos de b^* incrementaban. Este estudio presentó resultados similares a los encontrados en este trabajo, ya que el valor más alto de b^* se obtuvo con el tratamiento procesado con un 20% de humedad, por el contrario, el valor más bajo se obtuvo con el tratamiento 5 (13% humedad). Otro estudio que se encargó de evaluar el efecto de la extrusión sobre el color de los extrudidos fue el llevado a cabo por Orrego *et al.* (2017) los cuales elaboraron, donde las variables de estudio fueron los efectos de la temperatura de extrusión (50°C-100°C) y la formulación (glicerina 0-3%, glucosa 5-15% y goma xantana 0-3%). Estos autores reportaron que los extrudidos elaborados a base de mango mostraron que el valor de b^* se vio afectado por el contenido de humedad. Cuanto menor era el contenido de humedad, menor era el valor de b^* . Comportamiento similar al reportado en este estudio.

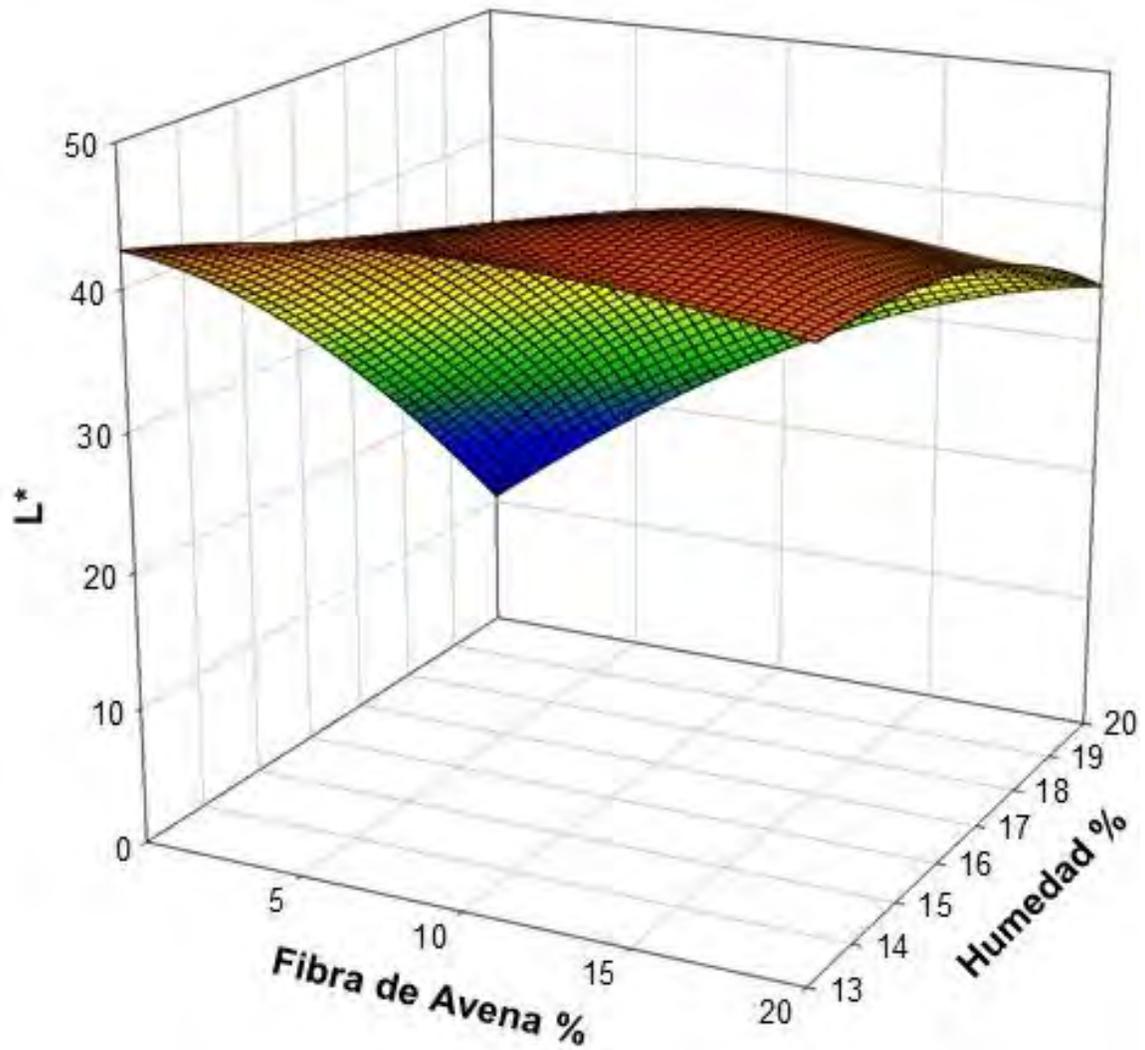


Figura 10. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre la luminosidad (L^*) en extrudidos tipo cereal para desayuno.

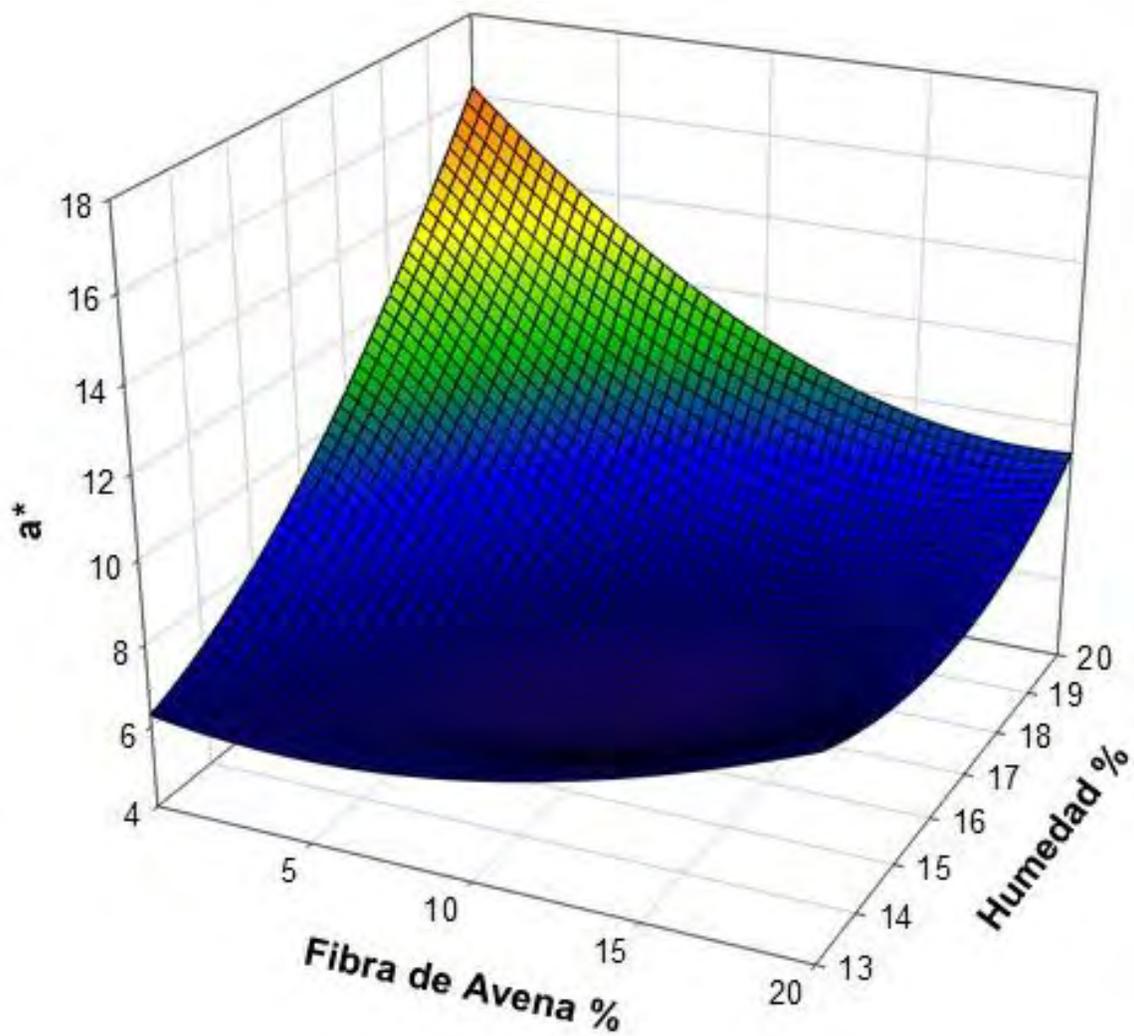


Figura 11. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre el parámetro de color a^* en extrudidos tipo cereal para desayuno.

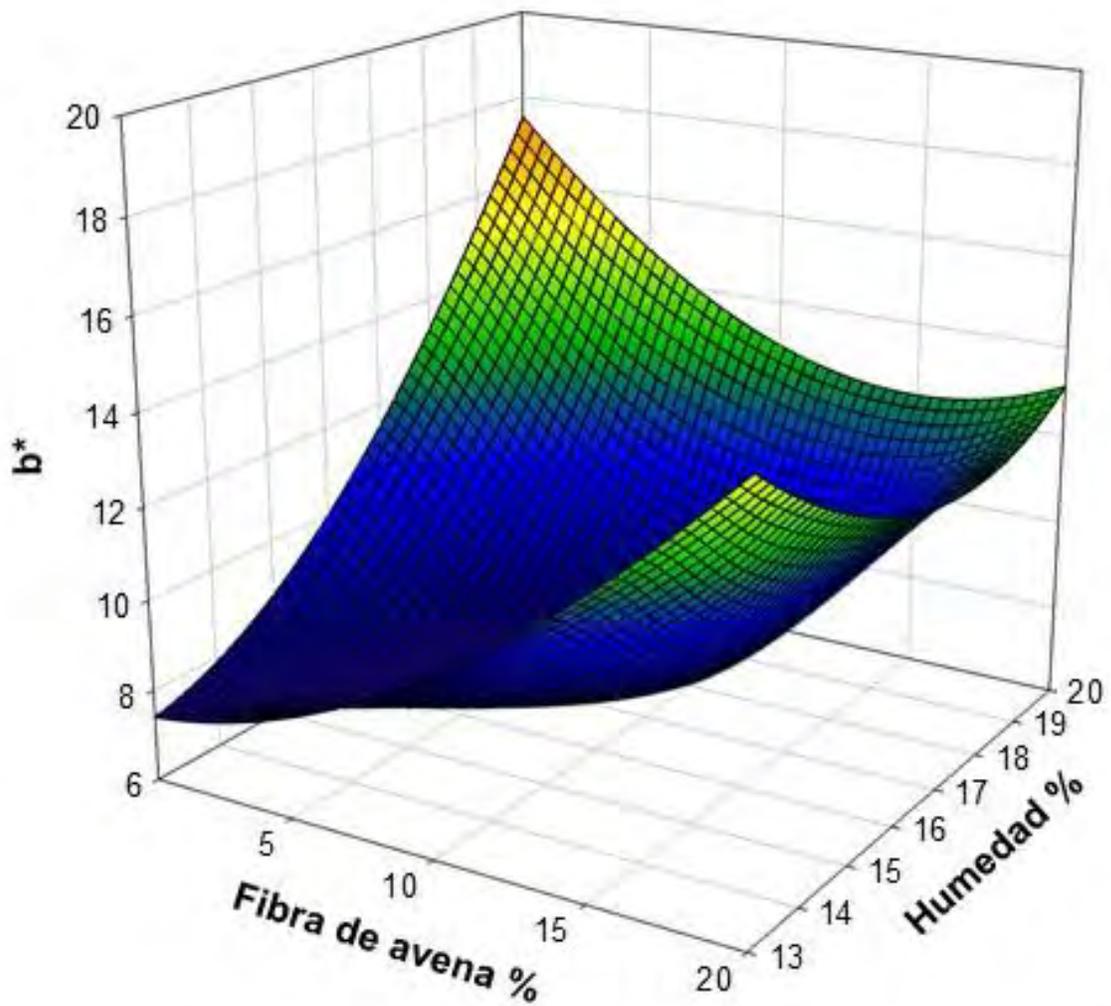


Figura 12. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre el parámetro de color b^* en los distintos extrudidos tipo cereal para desayuno.

6.2.5 Dureza

Los resultados de dureza de los extrudidos se muestran en la Tabla 5 donde se observa que, los valores encontrados estuvieron en un intervalo de 124.72 a 436 N. El menor valor de dureza fue para el tratamiento 5 (13% de humedad y 0% de fibra de avena), con un valor de 124.72 N. El valor más alto de dureza fue para el tratamiento 1 (20% de humedad, 20% de fibra). En la figura 14 se observa la representación gráfica de la dureza, se muestra que a mayor contenido de humedad los productos presentan una mayor dureza, lo cual se relaciona directamente con el índice de expansión obtenido en los productos elaborados a partir de harina de *Oxalis tuberosa*, donde a mayor contenido de humedad se presentó un menor índice de expansión y una mayor dureza. El aumento del contenido de humedad posiblemente da como resultado un menor grado de gelatinización y una menor expansión, por lo cual se aumenta la dureza de los materiales extrudidos. Por otro lado, se sabe también que, la dureza y el carácter crujiente de un producto expandido están relacionados con la expansión, el tamaño y el número de burbujas desarrolladas dentro de la matriz de almidón (Zhang *et al.* 2014). Ferreira *et al.* (2011) evaluaron el efecto de tres variables: adición de salvado de trigo (0 a 24.6%), contenido de humedad (16.3 a 29.7%) y temperatura de extrusión (104.8 a 155.2°C), en la elaboración de extrudidos a base de maíz y reportan que a mayor contenido de humedad la dureza del producto fue mayor y mencionan que esto puede ser debido a que el agua actúa como un plastificante del almidón dentro del extrusor. Por otra parte, reportan que el contenido de fibra no tuvo efecto significativo en los valores de dureza, sin embargo, Charunuch *et al.* (2011) mencionan que un cambio en los valores de dureza, debido a la presencia de fibra, es resultado del efecto de este material sobre el grosor de la pared celular formando paredes celulares menos porosas, más gruesas y materiales extrudidos más duros. Por su parte, Zhang *et al.* (2014) evaluaron las propiedades fisicoquímicas de 11 cereales elaborados, que fueron elaborados con diferentes materias primas y reportaron que la dureza de los extrudidos, elaborados con trigo y avena, fue más alta que la de otros extrudidos, también reportó que la humedad tuvo efecto significativo e incremento la dureza.

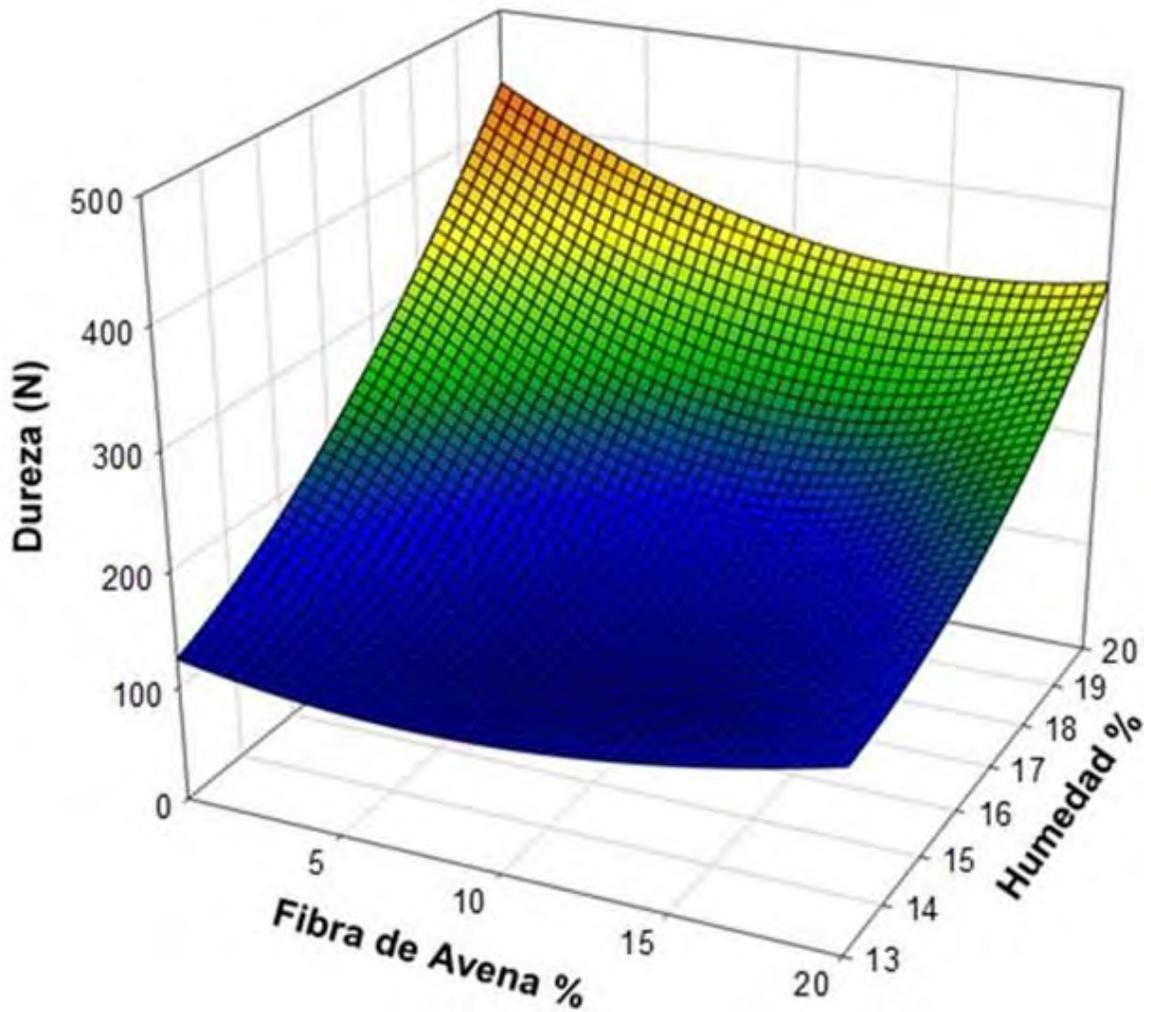


Figura 13. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre la dureza de los distintos extrudidos tipo cereal para desayuno.

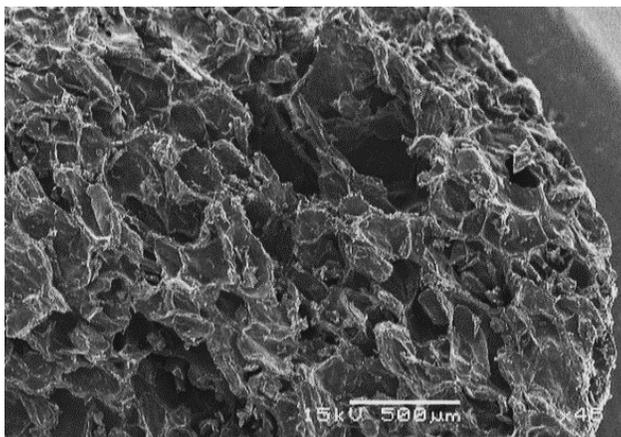
6.3 Caracterización de propiedades microestructurales

6.3.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

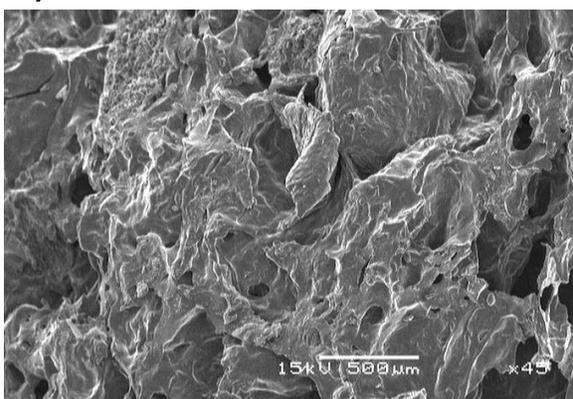
En la figura 15 se muestra la morfología de la parte interna de los extrudidos obtenidos mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). En la Figura 15a se presenta la micrografía correspondiente al extrudido elaborado, de acuerdo a las condiciones del tratamiento 1 (20% humedad y 20% de fibra de avena), en la cual se pueden apreciar burbujas de aire de menor tamaño, con formas irregulares y aparentemente de estructura densa, este comportamiento podría deberse al alto contenido de humedad y fibra con la que se elaboró el extrudido. Como se mencionó anteriormente, un alto contenido de humedad disminuye la temperatura, lo cual tiene impacto sobre la gelatinización del almidón, por otro lado, la adición de fibra causa una disminución en el tamaño de los poros y la formación de paredes más gruesas, además de que la fibra tiene la capacidad de un enlace más fuerte con el agua durante la extrusión en comparación con el almidón, esa unión puede inhibir la pérdida de agua en la salida del extrusor, y así reducir la expansión lo que contribuyó a un aumento en la densidad de los productos. La micrografía 15b, la cual corresponde al extrudido elaborado con las condiciones del tratamiento 2 (20% de humedad y 0% de fibra de avena), muestra una escasa formación de burbujas de aire, de menor tamaño, lo cual se vio reflejado en un menor índice de expansión y por lo tanto un aumento en la densidad aparente. Esto podría deberse al efecto del contenido de humedad, ya que la humedad disminuye la fricción entre la materia prima y el extrusor lo que disminuye el grado de gelatinización del almidón, que se relaciona directamente con la expansión del producto. La micrografía 15c, muestra la estructura interna de los extrudidos del tratamiento 3 (17.5% de humedad y 10% de fibra de avena), donde se observa que el producto exhibe algunos poros de mayor tamaño, aunque prevalecen los de menor diámetro. En este caso la humedad ya no es tan alta, sin embargo, la formulación contiene 10% de fibra lo que probablemente pudo haber disminuido la expansión. Por otro lado, la estructura interna de los productos extrudidos del tratamiento 4 se muestran en la Figura 15d; los cuales presentan una característica particular de los productos expandidos, que

es la formación de poros de tipo “panal de miel”, donde el tamaño y forma es más homogénea en comparación con los tratamientos anteriores. Sin embargo, la expansión aún se encuentra disminuida, probablemente debido a la presencia de la fibra de avena. Por último, la micrografía del producto correspondiente al tratamiento 5 (13% de humedad y 0% de fibra de avena) (Figura 15e), muestra que aquellos extrudidos con un mayor índice de expansión presentan poros de mayor tamaño y número, lo cual se relacionó con un menor contenido de humedad y fibra, mostrando un producto con burbujas de aire grandes, aunque, no uniformes en tamaño, ya que presentaron celdas circulares y hexagonales, cabe mencionar que esta muestra fue la que obtuve el mayor índice de expansión (2.56). Esto pudo deberse a que un menor contenido de humedad aumenta la fricción (mecánico-cizalla) entre la masa y la superficie interna del extrusor, lo cual tiene un impacto positivo en la gelatinización, además la expansión es el resultado de la presión interna del agua que se mantiene dentro de la matriz durante la gelatinización y la cual se liberó mientras el producto salía del extrusor. Esto da como resultado productos extrudidos más expandidos, con una superficie más lisa y con burbujas de aire de mayor tamaño. Resultados similares a los obtenidos en este trabajo han sido reportados por Jaques-Fajardo *et al.* (2017), quienes elaboraron extrudidos a partir de una mezcla de maíz azul, frijol amarillo y salvado de avena, encontrando que a menor contenido de humedad se obtenían extrudidos más expandidos y se formaba un mayor número de burbujas de aire en los extrudidos. Por otro lado, Bisharat *et al.* (2013) reportaron extrudidos con mayor expansión presentaron poros más grandes y paredes celulares más delgadas, lo que los hace más suaves para masticar. Ferreira *et al.* (2011) reportaron que la alta humedad en el material resultó en botanas con una estructura densa y con pobre formación celular. Por otro lado, en opinión de numerosos autores Lazou y Krokida, (2010); Robin *et al.* (2011); Wang y Ryu (2013) y Yanniotis *et al.* (2007) reportan que la introducción de una materia prima rica en fibra contribuye a la aparición de una estructura más compactada en los extrudidos, lo que provoca una disminución de la expansión.

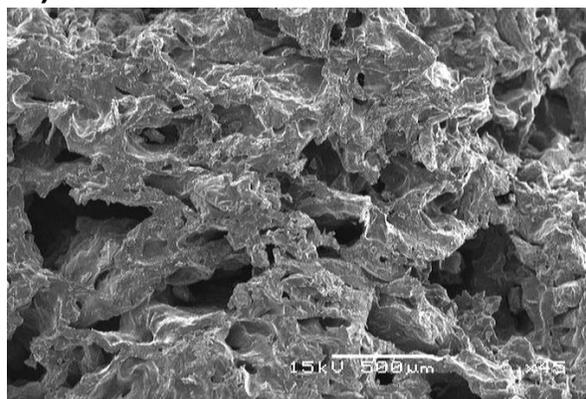
a)



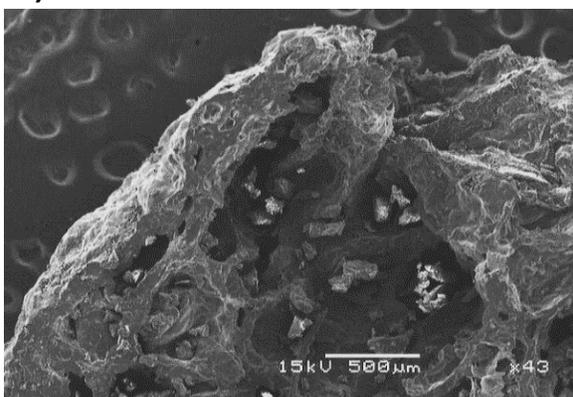
b)



c)



d)



e)

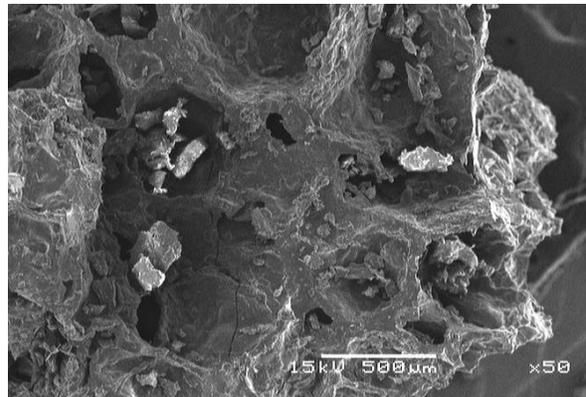


Figura 14. Microestructura interna de los extrudidos: **a) Tratamiento 1** (80% *Oxalis tuberosa*, 20% fibra, 20% humedad). **b) Tratamiento 2** (100% *Oxalis tuberosa*, 0% fibra, 20% humedad). **c) Tratamiento 3** (90% *Oxalis tuberosa*, 10% fibra, 17.5% humedad). **d) Tratamiento 4** (80% *Oxalis tuberosa*, 20% fibra, 13% humedad). **e) Tratamiento 5** (100% *Oxalis tuberosa*, 0% fibra, 13% humedad).

6.3.2 Difracción de rayos X

Los resultados gráficos de difracción de rayos X se muestran en la Figura 16, mientras que los valores numéricos obtenidos se muestran en la Tabla 7. Como se puede observar el patrón correspondiente a la harina de *Oxalis tuberosa*, exhibe los picos característicos del patrón de tipo B correspondiente a tubérculos (15°, 17°, 19°, 22° y 24°). Resultados similares fueron reportados por Santacruz *et al.* (2002) y Cruz *et al.* (2016), los cuales llevaron a cabo la caracterización fisicoquímica de almidones de diferentes tubérculos andinos, entre ellos *Oxalis tuberosa*.

En cuanto a los resultados de los distintos tratamientos obtenidos por extrusión, podemos observar que presentan picos con intensidad reducida comparadas con la muestra de harina sin extruir, lo cual nos indica que la región cristalina de la materia prima fue afectada por el proceso de extrusión. Comportamiento similar fue observado por Jafari *et al.* (2017), quienes reportaron que al disminuir la humedad de alimentación y aumentar la temperatura de la matriz tuvo un efecto negativo sobre la cristalinidad del almidón; ya que un bajo contenido de humedad aumenta la intensidad de la fuerza de corte que destruye la cristalinidad del almidón por la disrupción mecánica de los enlaces moleculares.

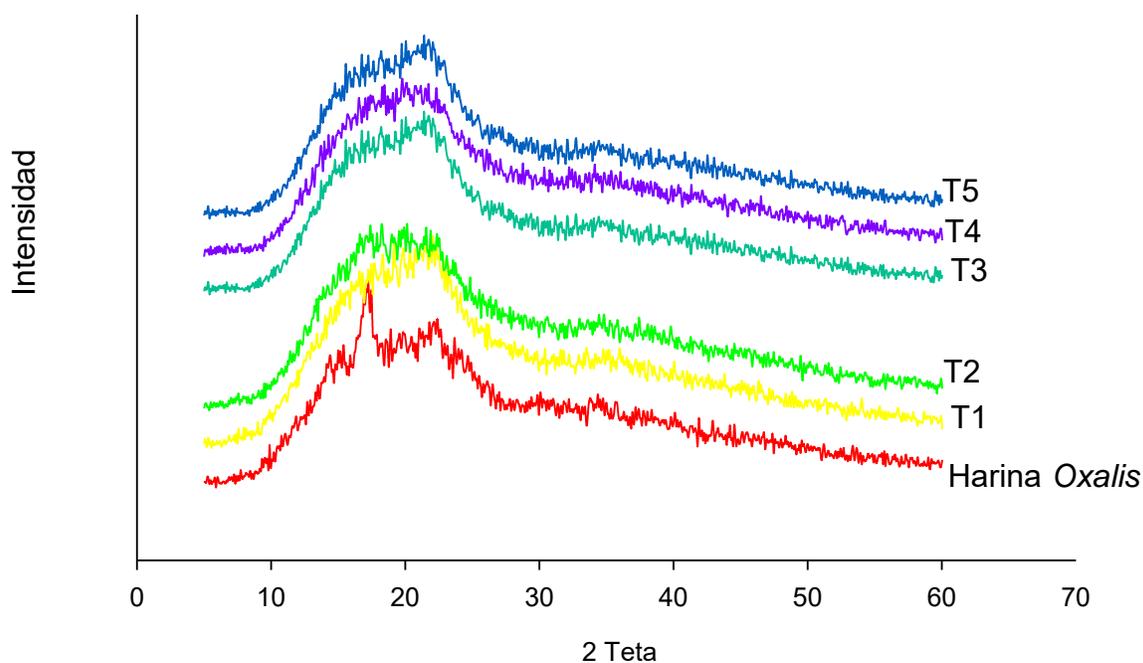


Figura 15. Difractograma de harina de *Oxalis tuberosa* y de los extrudidos tipo cereal para desayuno (T1-T5).

Tabla 7. Porcentaje de cristalinidad de los diferentes tratamientos

Tratamientos	Cristalinidad %
Harina nativa de <i>Oxalis tuberosa</i>	29.5±0.7 ^c
T1	38.7±5.1 ^c
T2	33.5±2.7 ^a
T3	30.4±0.4 ^b
T4	28.1±2.0 ^b
T5	21.4±1.7 ^d

Promedio de 3 repeticiones ± desviación estándar

Letras iguales indican que no hay diferencias significativas, letras diferentes si hay diferencias significativas

6.4 Caracterización nutricional

6.4.1 Fibra dietética total integrada

El contenido de fibra dietética total integrada de los extrudidos se muestra en la Tabla 5, como se puede observar los valores obtenidos oscilaron entre 13.09-29.53%. El valor más bajo lo obtuvo el tratamiento 5 (0% de fibra de avena y 13% de humedad), por el contrario, el valor más alto fue el correspondiente al tratamiento 1 (20% de fibra de avena y 20% de humedad). En base a estos resultados se confirmó el efecto de enriquecimiento de los extrudidos con fibra de avena. En la Figura 14 se presenta la gráfica de superficie de respuesta donde se muestra el efecto del contenido de humedad y fibra de avena sobre el contenido de fibra total de los extrudidos, como se puede observar, a medida que los valores de fibra de avena incrementaron (0, 10 y 20%), los valores de fibra dietética total también aumentaron. Cabe aclarar que la adición de fibra se realizó con el objetivo de aumentar el contenido de esta en los extrudidos, ya que la harina de *Oxalis tuberosa* es deficiente en este compuesto. Como se sabe, la fibra dietética juega un papel importante en la disminución del riesgo de muchas enfermedades (diabetes, enfermedades cardiovasculares, cáncer de colon o estreñimiento) y es uno de los ingredientes más importantes utilizados en alimentos nutricionales y funcionales. Además, la incorporación de fibra a alimentos reduce su aporte calórico, lo que puede ayudar en las dietas de control de peso. El contenido total de fibra de los distintos extrudidos fue de 13.09-29.53% (Tabla 5), es importante mencionar que al consumir 100 g de extrudido con 20% de fibra de avena, se estarán consumiendo 15.96 g de carbohidratos metabolizables. cabe mencionar que estos valores son altos en comparación con los cereales que se encuentran actualmente en el mercado. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Ingesta Diaria Recomendada (IDR) de fibra dietética total para adultos es de 25 g/día, de acuerdo con esto, los niveles de fibra de los extrudidos contribuirían de manera importante con la cantidad recomendada, por lo tanto, este tipo de productos elaborados a base de harina de *Oxalis tuberosa* podrían tener un impacto positivo en la salud del consumidor.

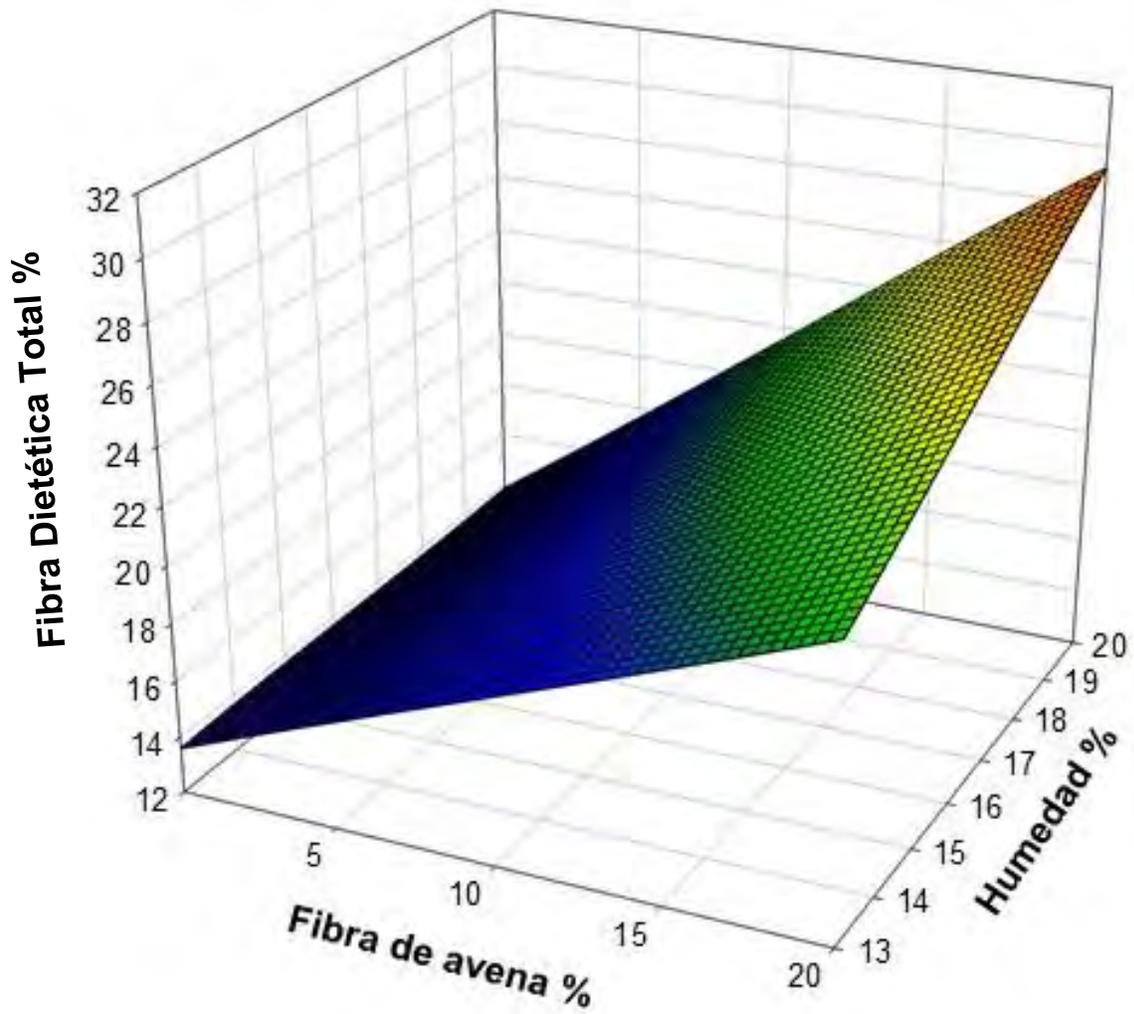


Figura 16. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre el contenido de Fibra dietética total de los distintos extrudidos tipo cereal para desayuno.

6.4.1.1 Cuantificación de Azúcares

En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos de la cuantificación de azúcares de los extrudidos. Los azúcares que se cuantificaron fueron: sacarosa, glucosa y fructosa. Esta cuantificación se realizó con el objetivo de conocer el contenido de este tipo de azúcares en la materia prima y evaluar el impacto de la extrusión sobre estos compuestos. La harina de *Oxalis tuberosa* es rica en azúcares, principalmente en fructosa. En cuanto a la cuantificación en los extrudidos, el contenido de sacarosa disminuyó significativamente en comparación con la materia prima. Esto puede deberse a que, durante el proceso de extrusión, debido al efecto combinado de la alta temperatura y la presión, puede producirse una hidrólisis parcial de los compuestos glucosídicos. Se ha reportado que las condiciones del proceso de extrusión, como la temperatura y la cizalla, pueden causar la ruptura de los enlaces 1,2-glucosídicos de la glucosa (Leszek, 2011). En cuanto al contenido de glucosa, la cantidad disminuyó después de la extrusión en todos los tratamientos, lo cual pudo deberse a las condiciones del procesamiento (contenido de humedad) y la formulación de cada tratamiento, contenido de fibra de avena y harina de *Oxalis tuberosa*. El contenido de fructosa aumentó numéricamente sin embargo estadísticamente no fue significativo en los tratamientos 2, 3 y 4, cabe mencionar que este cambio probablemente se debió a que en estos tratamientos existe un mayor contenido de harina de *Oxalis tuberosa*, por otro lado, la cantidad de fructosa disminuyó en el tratamiento 1 y 5, lo cual pudo deberse a la adición de fibra de avena en la formulación lo que ayudo a la disolución de los azúcares presentes en la harina nativa. El contenido de azúcares podría influir en el sabor, ya que proporciona más dulzor al producto, probablemente esto también afecte la textura, debido al efecto plastificante, sin embargo, no existe correlación estadísticamente significativa entre el contenido de azúcares y la textura del producto.

En la Tabla 9 se muestran los resultados de la cuantificación de azúcares, cabe destacar que al producir este tipo de extrudido con harina de *Oxalis tuberosa*, no será necesario agregar aditivos de color ni de sabor, ya que el producto que se obtiene tiene un color similar al de los productos existentes en el mercado. La

cantidad de azúcares presentes en los extrudidos es menor en comparación con los cereales comerciales, ya que estos tienen un contenido que va desde 296 a 22 g/100 g dependiendo la marca que se consuma, en cambio el contenido de azúcares de los extrudidos estuvo entre de 46.8-47.12 g/100 g lo cual podría tener un impacto positivo en la salud del consumidor.

Tabla 8. Cuantificación de azúcares por HPLC de los distintos extrudidos tipo cereal para desayuno.

Tratamientos	Sacarosa	Glucosa	Fructosa
Harina de <i>Oxalis tuberosa</i>	28.0 ± 0.5 ^a	7.4 ± 0.1 ^a	491.0 ± 19.4 ^a
Tratamiento 1	21.1 ± 0.1 ^b	5.3 ± 0.1 ^b	471.9 ± 25.4 ^{ab}
Tratamiento 2	26.3 ± 0.3 ^a	7.0 ± 0.2 ^a	504.4 ± 17.5 ^a
Tratamiento 3	24.1 ± 1.2 ^c	6.0 ± 0.3 ^c	509.5 ± 19.9 ^a
Tratamiento 4	21.5 ± 0.1 ^{bc}	4.0 ± 0.0 ^d	506.6 ± 18.0 ^a
Tratamiento 5	23.4 ± 0.1 ^c	4.9 ± 0.0 ^b	439.9 ± 39.2 ^b

Promedio de 3 repeticiones ± desviación estándar

Letras iguales no hay diferencias significativas, letras diferentes si hay diferencias significativas

Los resultados están expresados en mg/g de muestra seca

6.4.1.2 Digestión del almidón y predicción del índice glicémico (pIG)

Los valores de índice de hidrólisis y predicción del índice glucémico se presentan en la Tabla 5. El valor más bajo (42.16%) de índice de hidrólisis (IH) fue para el tratamiento 1 (2% de humedad y 20% de fibra de avena) con lo cual, se obtienen también un índice glucémico bajo (72). Este valor puede estar influenciado por el contenido de fibra total, que se encontró en el producto, elaborado con las condiciones del tratamiento 1, lo cual impactó inicialmente, en el índice de hidrólisis y posteriormente en el índice glucémico.

Por el contrario, el tratamiento con el máximo índice de hidrólisis y predicción del índice glucémico fue el T5 (13% de humedad y 0% de fibra de avena) con un valor de 53.5% y 80, respectivamente. En la Figura 18 se muestra la gráfica de superficie

de respuesta, en la cual se observa el comportamiento general del efecto del contenido de humedad y fibra, sobre la predicción del índice glucémico. En la gráfica se observa que, a medida que el contenido de humedad y fibra de avena aumentan, los valores de predicción del índice glucémico disminuyen. Este comportamiento podría deberse a un menor grado de gelatinización que presentó la muestra, debido al efecto de la humedad y la adición de fibra. Como ya se mencionó anteriormente el contenido de humedad afecta la gelatinización del almidón presente en la harina. Por otro lado, un mayor contenido de fibra también disminuye el índice de hidrólisis y por lo tanto la predicción del índice glucémico. Esto está de acuerdo, con los resultados obtenidos en este trabajo, debido a que, en los extrudidos con bajos contenidos de humedad y altos contenidos de fibra, se observó un aumento significativo en la digestibilidad del almidón. Resultados similares fueron reportados por Brennan *et al.* (2008) donde reportan que la presencia de fibra disminuyó los valores del índice glucémico, mientras que Reyes-Pérez *et al.* (2013) reportó que el aumento en el contenido de humedad disminuyó también el índice glucémico.

De acuerdo con Ferng *et al.* (2016), los alimentos con IG de ≤ 60 , 60-85 y ≥ 85 se clasifican como IG bajo, medio y alto, respectivamente. De acuerdo con esta clasificación, el producto elaborado en esta investigación se considera un alimento de índice glucémico medio. A pesar de que algunos de los tratamientos contienen un porcentaje de fibra en su formulación, todos los extrudidos son de IG medio, esto probablemente se debió a que la materia prima principal (*Oxalis tuberosa*) es rica en azúcares como son: glucosa, fructosa y sacarosa, el alto contenido de azúcares lo que probablemente, disminuyó el efecto de la fibra en el índice de hidrólisis.

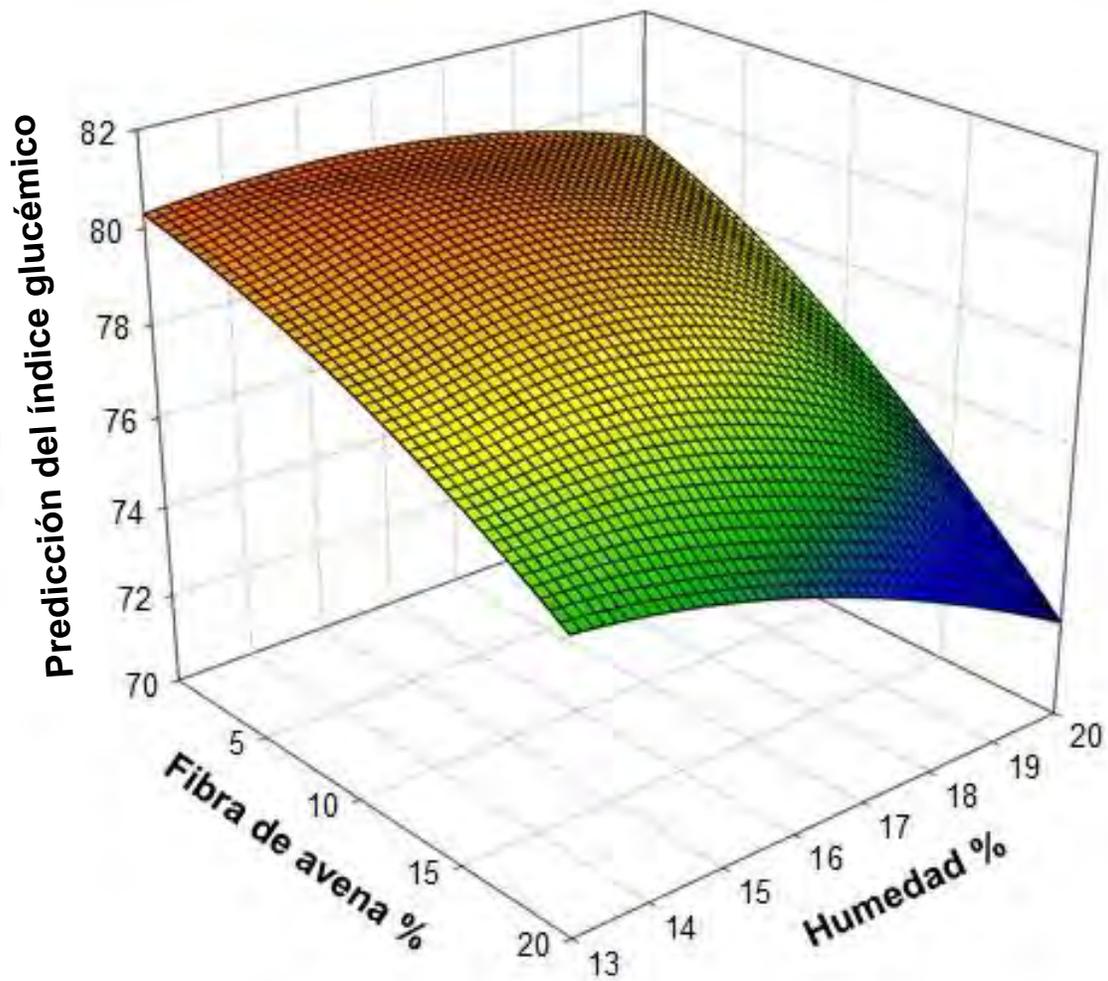


Figura 17. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre la predicción del índice glicémico de los distintos extrudidos tipo cereal ara desayuno.

6.4.1.3 Actividad Antioxidante Celular (AAC)

En la Tabla 5 se presentan los resultados de actividad antioxidante celular de los extrudidos, de la harina de *Oxalis tuberosa* y de la fibra de avena, donde el porcentaje de AAC obtenido para la harina fue de 71.2%, para la fibra de avena fue de 76.4% y para los extrudidos obtenidos con los diferentes tratamientos, los valores oscilaron entre 54.54 a 74.1%. Por otro lado, en la Figura 19 se muestra la representación gráfica de los efectos del contenido de fibra de avena y humedad sobre la actividad antioxidante de los extrudidos. La gráfica señala que, a mayor contenido de humedad, la actividad antioxidante celular se favorece. Por otro lado, el tratamiento 1 se procesó con un mayor contenido de humedad en comparación con el tratamiento 4, lo cual podría tener un efecto positivo en la capacidad antioxidante de los extrudidos.

Nayak *et al.* (2014), evaluaron la bioactividad de antioxidantes en productos extrudidos elaborados con harina de papa morada y chicharos secos, utilizando dos métodos distintos para determinar la capacidad antioxidante, ORAC y actividad antioxidante en células. Estos autores reportaron que los productos extrudidos tenían mayor capacidad antioxidante cuando fueron comparados con cada una de las formulaciones sin procesar, y que esto fue debido a que el proceso de extrusión aumentó la cantidad de fitoquímicos bioaccesibles, así como una mayor absorción celular de estos fitoquímicos, los autores explican que este aumento podría deberse a: la ruptura de compuestos fenólicos conjugados en compuestos fenólicos libres y a la lixiviación de fibras solubles, proteínas y otros compuestos no fenólicos, tales como, mono, di- y oligosacáridos. Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos en este proyecto de investigación no se observó el mismo comportamiento, ya que los extrudidos tuvieron una menor capacidad antioxidante en comparación con la materia prima lo cual pudo deberse a la diferencia en las condiciones de extrusión y a la materia prima utilizada.

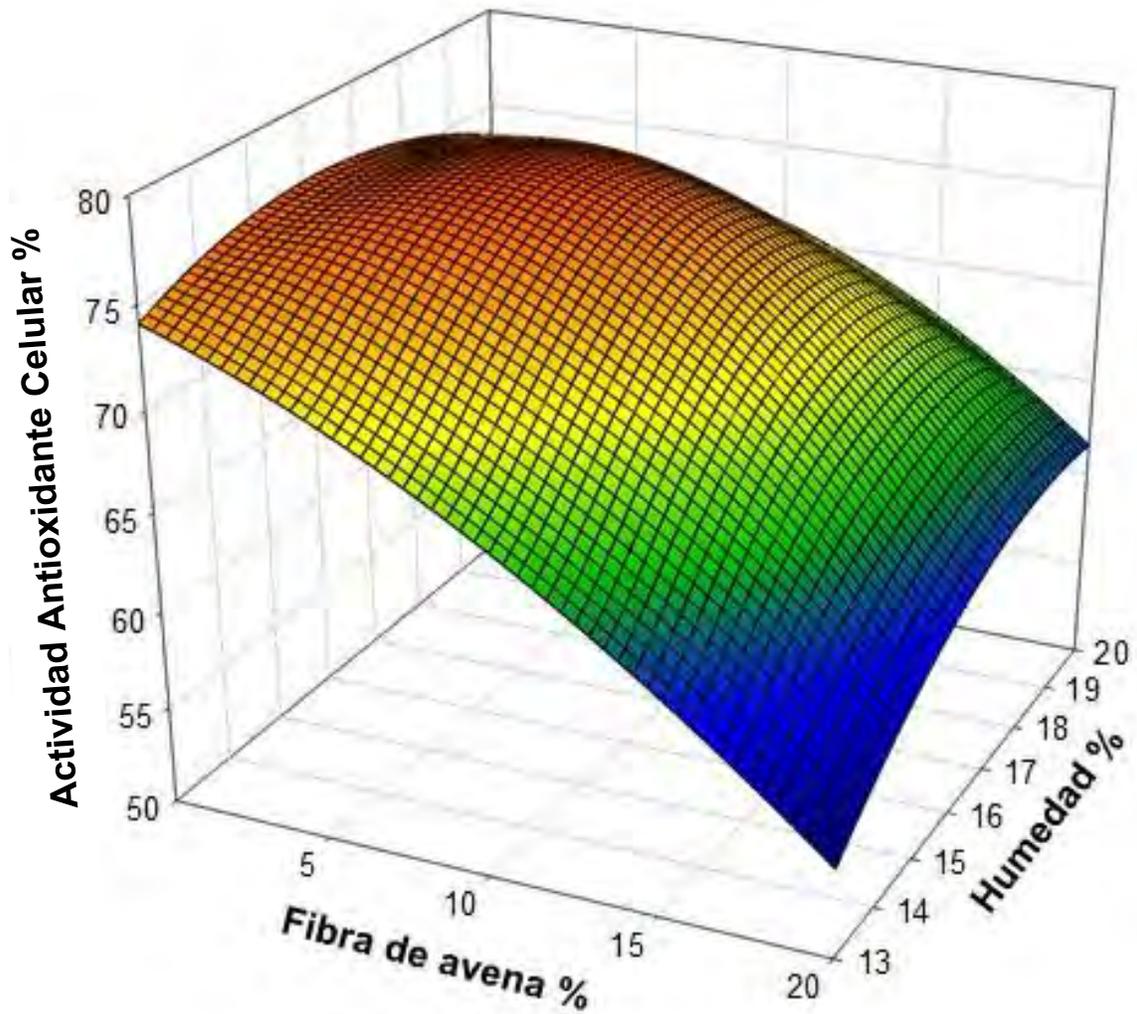


Figura 18. Efecto del contenido de fibra de avena y humedad sobre la actividad antioxidante celular de los distintos extrudidos obtenidos por extrusión.

6.5 Optimización del extrudido tipo cereal para desayuno a base de harina de *Oxalis tuberosa*

En la Tabla 10 se muestran los coeficientes de regresión para el modelo obtenido en esta investigación, donde se observa que tanto la humedad como el contenido de Avena influyeron sobre las variables medidas. Esto es debido a que, los valores que presentan un asterisco indican un efecto estadísticamente significativo sobre la mayoría de los parámetros evaluados. Además de que también se puede deducir que, los valores negativos de los coeficientes de regresión indican una disminución en la variable de respuesta. Por el contrario, un valor positivo indica un incremento en la variable de respuesta. Por otra parte, los valores de R^2 indican que los datos experimentales se ajustan al modelo obtenido, excepto para el ISA e IAA, debido a que los valores de R^2 son menores a 60, mientras que se sabe que un valor mayor o igual a 70 puede ser considerado como aceptable.

El diseño experimental para la optimización se llevó a cabo mediante el programa Minitab 18, utilizando los datos experimentales. Los principales criterios para la optimización fueron las características deseables para un cereal para desayuno a base de harina de *Oxalis tuberosa*. Las respuestas seleccionadas para realizar este procedimiento fueron: índice de expansión (IE), densidad aparente (DA), Dureza (DZA), Fibra dietética total (FDT), predicción del índice glicémico (pIG), índice de hidrólisis (IH), y Capacidad Antioxidante (AAC). Los principales criterios establecidos fueron para encontrar los mayores valores de IE, AAC, FDT, así como los menores valores para DZA, DA, (pIG) e IH. De acuerdo con las propiedades físicas seleccionadas, se propusieron los siguientes límites de la siguiente manera: relación de expansión 1.285-3.850; densidad aparente 0.16-0.17 g/cm³; dureza 122.82-1559.58 N; Además la cantidad de fibra dietética 20-24%; predicción del índice glucémico 76-77; índice de hidrólisis 45-47% y capacidad antioxidante 62-69%. La optimización dio como resultado que: para obtener un producto con mejores características fisicoquímicas se debe procesar la materia prima a una

humedad de 15.5% y con un contenido de fibra de avena de 16%, con estas condiciones de procesamiento será posible obtener un producto con un índice de expansión de 1.7, una densidad aparente de 0.17 g/cm³, una dureza de 150 N, un contenido de fibra dietética total de 22.8%, una predicción del índice glicémico de 76.9, índice de hidrólisis 46.5%, y una CAA 66%.

Tabla 9. Coeficientes de regresión del modelo para variables respuesta: índice de expansión (IE), densidad aparente (DA), índice de solubilidad en agua (ISA), índice de absorción de agua (IAA), dureza (DZA), índice de hidrólisis (IH), predicción del índice glucémico (pGI), fibra dietética total (FDT), capacidad antioxidante celular (CAC), Luminosidad (L*), rojo a verde (a*), amarillo a azul (b*).

Factores	IE	DA	ISA	IAA	DZA	IH	pIG	FDT	AAC	L*	a*	b*
Constante	1.7856	0.1741	41.07	4.147	133.31	49.998	79.125	19.73	74.87	42.268	5.480	7.236
A	-0.2598*	-0.0299*	-0.87	-0.114	-16.72*	-4.336*	-2.799*	6.015*	-7.86*	6.009*	-1.066*	0.858*
H	-0.3327*	0.1623*	-7.01*	0.235	122.36*	-1.334*	-1.297*	1.847	1.57	-10.239*	2.569*	1.995*
A²	-0.0062	0.1240*	-1.24	-0.613*	130.33*	-2.704*	-2.192*	-0.02	-8.97*	-9.700*	4.695*	6.086*
A*H	0.1656*	-0.0228*	1.42	0.340*	-33.28*	0.531*	-0.737*	1.733	1.92	5.859*	-2.386*	-3.062*
R cuadrada ajustada	93.33	99.70	58.66	54.50	98.64	95.43	86.49	69.60	70.58	97.71	97.35	95.95

IE=índice de expansión; DA=Densidad aparente; ISA=Índice de Solubilidad en Agua; IAA=Índice de Absorción de Agua; IH=Índice de Hidrólisis; pIG=predicción del índice glucémico; FDT=Fibra Dietética Total; AAC=Actividad Antioxidante Celular; L*=Luminosidad; a*=rojo a verde; b*=amarillo a azul; A = Avena; H = Humedad
*p < 0.05

VII. CONCLUSIONES

Se obtuvo un extrudido tipo cereal para desayuno utilizando como materia prima *Oxalis tuberosa* y fibra de avena.

El modelo estadístico utilizado en el análisis de los datos experimentales fue adecuado para la mayoría de las respuestas, excepto para ISA, IAA, FDT, y AAC.

El contenido de humedad tuvo un impacto significativo en el índice de expansión, densidad aparente, y en la luminosidad de los extrudidos. Por otro lado, se observó que un incremento en el contenido de fibra de avena afectó el ISA, IAA, a*, b*, dureza, FDT, pIG, AAC e índice de hidrólisis. Los resultados mostraron que con la adición de fibra de avena se logró aumentar el contenido de fibra dietaria del producto, lo cual tuvo un impacto negativo en el índice de solubilidad e índice de absorción de agua, sin embargo, la adición de fibra influyó de manera positiva en la predicción del índice glicémico y la actividad antioxidante de los extrudidos.

La inclusión de harina de *Oxalis tuberosa* en la elaboración de un extrudido “tipo cereal para desayuno” es una buena opción, ya que contiene gran capacidad antioxidante que podría tener un impacto positivo en la salud del consumidor, así como también la adición de fibra de avena en la formulación de los extrudidos podría aportar beneficios, ya que el contenido de fibra soluble podría aumentar la saciedad del consumidor, tener impacto en el índice glucémico, ayudar a reducir o prevenir hipercolesterolemia y enfermedades coronarias.

VIII. PERSPECTIVAS

Para estudios posteriores, se sugiere considerar una prueba sensorial del extrudido a base de harina de *Oxalis tuberosa* y fibra de avena, esto con el objetivo de ver la aceptabilidad del producto.

Realizar la validación del modelo de optimización mencionado en este proyecto de investigación.

Hacer una identificación de qué tipo de antioxidantes y en qué cantidad están presentes en la harina de *Oxalis tuberosa*.

Evaluar el contenido de β -glucanos de la fibra de avena antes y después del proceso de extrusión.

IX. BIBLIOGRAFIA

1. (AEFC), A. e. (2010). *Cereales de desayuno, nutrición y gastronomía*. Madrid: Evergáficas, S. L.
2. Akhtar, J., Malik, s., Alam, M., Student, M., & Allahabad, S. (2015). Extrusion technology used for novel Foods Production. *Interbational Journal of Engoneering Development and Research*, 1-7.
3. Anderson, R. A., Conway, H. F., & Peplinski, j. (1970). Gelatinization of corn grits by roll cooking, extrusion cooking and steaming. *Starch/Starkë*, 131-134.
4. Arribas, C., Cabellos Sánchez, B., Cuadrado, C., Guillamón, E., & Pedrosa, M. (2017). The impact of extrusion on the nutritional composition, dietary fiber and in vitro digestibility of gluten-free snacks based on rice, pea and carob flour blends. *Food and function*, 3654-3663.
5. Barry V. McCleary, N. S. (2015). Determination of total dietary fibre and available carbohydrates: A rapid integrated procedured that simulates in vivo digestion. *Satrch/Starkë*, 860-883.
6. Bisharat, G., Oikonomopoulou, V., Panagiotou, N., Krokida, M., & Maroulis, Z. (2013). Effect of extrusion conditions on the structural properties of corn extrudates enriched with dehydrate vegetables. *Food Research International*, 1-14.
7. Brennan, A. M., Monco, J. A., & Brennan, C. (2008). Effect of inclusion of soluble and insoluble fibres into extruded breakfast cereal products made with reverse screw configuration. *International Journal of Food Science and Technology*, 2278-2288.
8. Brennan, M., Derbyshire, E., Tiwari, B., & Brennan, C. (2013). Ready-to-eat snack products: the role of extrusion technology in developing consumer acceptable and nutritious snacks. *International Journal of Food Science&Technology*, 893-902.
9. Camacho-Hernández, I. L., Zazueta-Morales, J., Gallegos-Infante, J. A., Aguilar-Palazuelos, e., Rocha-Guzman, N. E., Navarro-Cortez, R. O., . . . Gómez-Aldapa, C. A. (2014). Effect of extrusion conditions on physicochemical characteristics and anthocyanin content of blue corn third-generation snacks. *CyTA-Journal of Food*, 320-330.
10. Charunuch, C., Limsangouan, N., Prasert, W., & Butruwan, P. (2011). Optimization of extrusion conditions for functional ready-to-eat breakfast cereal. *Food science Technology Research*, 415-422.

11. Chirinos, R., Betalleluz-Pallardel, I., Huamán, A., Arbizu, C., Pedreschi, R., & Campos, D. (2009). HPLC-DAD characterisation of phenolic compounds from Andean oca (*Oxalis tuberosa* Mol.) tubers and their contribution to the antioxidant capacity. *Food Chemistry*, 1243-1251.
12. Clextral. (06 de Junio de 2018). *Clextral*. Obtenido de Clextral: <http://www.clextral.com/es/tecnologias-lineas/tecnologias-y-procesos/extrusion-de-doble-tornillo-caracteristicas-y-beneficios/>
13. Collins, H., Burton, R., Topping, D., Liao, M.-L., Bacic, A., & Fincher, G. (2010). Variability in fine structures of noncellulosic cell wall polysaccharides from cereal grains: potential importance in human health and nutrition. *Cereal Chemistry*, 272-282.
14. Cruz, G., Ribotta, P., Ferrero, C., & Iturriga, L. (2016). PHYSICOCHEMICAL AND RHEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF ANDEAN TUBER STARCHES: POTATO (*Solanum tuberosum* ssp. *Andigenum*), OCA (*Oxalis tuberosa* Molina) AND PAPALISA (*Ullucus tuberosus* Caldas). *Research*, 1-32.
15. Delgado-Nieblas, C., Zazueta-Morales, J., Gallegos-Infante, J., Aguilar-Palazuelos, E., Camacho-Hernández, I. L., Ordórica-Falomir, C. A., . . . Carrillo-López, A. (2014). Elaboration of functional snack foods using raw materials rich in carotenoids and dietary fiber: effects of extrusion processing. *CyTA-Journal of Food*, 1-7.
16. Ding, Q.-B., Ainswoth, P., Tucker, G., & Marson, H. (2005). The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering*, 283-289.
17. Escalante-Aburto, A., Ramírez-Wong, B., Torres-Chávez, P. I., Lopez-Cervantes, J., Figueroa-Cárdenas, J., Barrón-Hoyos, J. M., . . . Gutiérrez-Dorado, R. (2014). Obtaining Ready-to-Eat blue corn expanded snacks with anthocyanins using an extrusion process and response surface methodology. *Molecules*, 21065-21084.
18. Ferreira, R. E., Chang, Y. K., & Steel, C. J. (2011). Influence of wheat bran addition and of thermoplastic extrusion process parameters on physical properties of corn-based expanded extruded snacks. *Alim. Nutr.*, 507-520.
19. Goñi, I., García-Alonso, A., & Saura-Calixto, F. (1997). A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. *Nutrition research*, 427-437.
20. Grundy, M., Edwards, C., Mackie, A., Gidley, M., Butterworth, P., & Ellis, P. (2016). Re-evaluation of the mechanism of dietary fibre and implications for macronutrient bioaccessibility, digestion and postprandial metabolism. *British Journal of Nutrition*, 816-833.

21. Guy, R., & Horne, A. (1988). *Food structure-Its Creation and Evaluation*. Butterworths, London: J. M. V Blanshard.
22. Harrigan, G., Stork, L., Riordan, S., Reynolds, T., Ridley, W., Massucci, J., . . . Pandravada, A. (2007). Impact of genetics and environment on nutritional and metabolite components of maize grain. *Journal of agricultural and food chemistry*, 6177-6185.
23. Hernández-Díaz, J. R., Quintero-Ramos, A., Barnard, J., & Balandrán-Quintana, R. R. (2007). Functional properties of extrudates prepared with blends of wheat flour/pinto bean meal with added wheat bran. *Food science technology international*, 301-308.
24. Holguín-Acuña, A. L., Carvajal-Millán, E., Santana-Rodríguez, V., Rascón-Chu, A., Márquez-Escalante, J., Ponce de León-Renova, N., & Gastelum-Franco, G. (2008). Maize bran/oat flour extruded breakfast cereal: Anovel source of complex polysaccharides and an antioxidant. *Food Chemistry*, 654-657.
25. Holm, J., Björck, I., Drews, A., & Asp, N. (1986). Arapid method for the analysis of starch. *Starch/Starkë*, 224-226.
26. J. Zazueta-Morales, F. M.-V.-F.-L. (2002). Effects of Calcium Hydroxide and Screw Speed on Physicochemical Characteristics of Extruded Blue Maize. *Food Engineering and Physical properties*, 3350-3358.
27. Jafari, M., Koocheki, A., & Milani, E. (2017). Effect of extrusion cooking on chemical structure, morphology, crystallinity and thermal properties of sorghum flour extrudates. *Journal of Cereal of Science*, 1-33.
28. Jaques-Fajardo, G., Prado-Ramírez, R., Arriola-Guevara, E., Pérez-Carrillo, E., Espinosa-Andrews, H., & Guatemala Morales, G. (2017). Physical and hydration properties of expanded extrudates from a blue corn, yellow pea and oat brand blend. *LWT-Food Science and Technology*, 1-31.
29. Jenkins, D., Kendall, C., McKeown-Eyssen, G., Josse, R., Silverberg, J., Booth, G., . . . Parker, T. (2015). Effect of a Low-Glycemic Index or a High-Cereal Fiber Diet on Type 2 Diabetes. *American Medical Association*, 2742-2753.
30. Kasprzak, M., Rzedzicki, Z., Wirkijowska, A., Zarzycki, P., Sobota, A., Sykut-Domariska, E., & Btaszcak, W. (2013). Effect of fibre-protein additions and process parameters on microstructure of corn extrudates. *Journal of Cereal Science*, 488-494.
31. Kellogg´s. (29 de Junio de 2018). *Kellogg´s Nutrition*. Obtenido de Kellogg´s Nutrition:
https://www.kelloggsnutrition.com/es_ES/knowledge/Kelloggs_y_la_Nutricion/Las_grandes_etapas_de_la_fabricacion_de_cereales.html

32. Leszek, M. (2011). *Extrusion-Cooking Techniques*. Lublin, Poland: WILEY-VCH.
33. Liu, Y., Hsieh, F., Heymann, H., & Huff, H. (2000). Effect of process conditions on the physical and sensory properties of extruded oat-corn puff. *Journal of Food Science*, 1253-1259.
34. Lo, T., Moreira, R., & Castell-Perez, M. (1998). Effect of operating conditions on melt rheological characteristics during twin-screw food extrusion. *Transactions of the ASAE*, 1721-1728.
35. Madeira Moreira da Silva, E., Ramírez-Ascheri, J. L., Wanderlei, C., Cristina, Y., & Berrios, J. d. (2014). Physical characteristics of extrudates from corn flour and dehulled carioca bean flour blend. *LWT-Food Science and Technology*, 1-7.
36. Martínez F. H. E, Y. C. (1999). Extrusion cooking of cassava starch with different fiber sources: effect of fibers on expansion and physicochemical properties. *Advanced Nutrition*, 271-278.
37. Mohammed Shafiq Alam, S. P. (2016). Optimization of the extrusion process for development of high fibre soybean-rice ready-to-eat snacks using carrot pomace and cauliflower trimmings. *Food Science and Technology*, 135-144.
38. Montaldo, A. (1996). *Bibliografía venezolana de raíces y tubérculos. Consejo de Desarrollo científico y Humanístico*. Venezuela, Caracas: Miguel ángel García e Hijos, S. R. L.
39. Nara S., A. M. (1978). Study on relative crystallinity of moist potato starch. *Starch/Starké*, 111-114.
40. Navarro-Cortez, R., Aguilar-Palazuelos, E., Zazueta-Morales, J. J., Castro-Rosas, J., Hernández-Ávila, J., Gómez-Aldapa, C. A., & Aguirre-Tostado, F. S. (2014). Microstructure of an extruded third-generation snack made from a whole blue corn and corn starch mixture. *International Journal of Food Processing Technology*, 10-17.
41. Offiah, V., & Kontogiorgos, V. &. (2018). Extrusion processing of raw food materials and by products: a review. *Journal Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-41.
42. Oliveira, L., Rosell, C., & Steel, C. (2015). Effect of the addition of whole-grain wheat flour and of extrusion process parameters on dietary fibre content, starch transformation and mechanical properties of a ready-to-eat breakfast cereal. *International Journal of Food Science and Technology*, 1504-1514.
43. Orrego, C., Salgado, N., & Giraldo, G. I. (2017). Influence of the extrusion operating conditions on the antioxidant, hardness, and color properties of extruded mango. *LWT-Food Science and Technology*, 209-218.

44. Rathod, R., & Annapure, U. (2016). Effect of extrusion process on antinutritional factors and protein and starch digestibility of lentil splits. *LWT-Food Science and Technology*, 114-123.
45. Rzedzicki, Z., & Blaszcak, W. (2005). Impact of microstructure in modelling physical properties of cereal extrudates. *International Agrophysics*, 175-186.
46. Rzedzicki, Z., & Blaszcak, W. (2005). Impact of microstructure in modelling physical properties of cereal extrudates. *International Agrophysics*, 175-186.
47. Saldívar, S. R. (2013). *Química, almacenamiento e industrialización de los cereales*. México, DF: AGT Editor.
48. Sánchez-Madrugal, M. Á., Meléndez-Pizarro, C., Martínez-Bustos, F., Ruiz-Gutierrez, M., Quintero-Ramos, A., Márquez-Meléndez, R., . . . Campos-Venegas, K. (2014). Structural, functional, thermal and rheological properties of nixtamalised and extruded blue maize (*Zea mays* L.) flour with different calcium sources. *International Journal of Food Science and Technology*, 578-586.
49. Santaruz, S., Koch, K., Svensson, E., Ruales, J., & Eliasson, A. (2002). Three underutilised sources of starch from the Andean region in Ecuador Part I. Physico-chemical characterisation. *Carbohydrate Polymers*, 63-70.
50. Sarmiento Rubiano, L. A. (2006). Aliments funcionales, una nueva alternativa de alimentación. *ORINOQUIA*, 16-23.
51. Shivendra Singh, S. G. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 916-929.
52. Singh, B., Rachina, Hussain, S. Z., & Sharma, S. (2014). Response surface analysis and process optimization of twin screw extrusion cooking of potato-based snacks. *Journal of Food processing and preservation*, 1-12.
53. Singh, S., Gamlath, S., & Wakeling, L. (2007). Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 916-929.
54. Spence, C. (2008). Effect of inclusion of soluble and insoluble fibres into extruded breakfast cereal products made with reverse screw configuration. *International of Food Science and Technology*, 2278-2288.
55. Spence, C. (s.f.). Breaksat.
56. Thymi, S., Krokida, M. K., Pappa, A., & Maroulis, Z. B. (2005). Structural properties of extruded corn starch. *Journal of food engineering*, 519-526.
57. Tiwari, A., & Hha, S. (2017). Extrusion cooking technology: principal mechanism and effect on direct expanded snacks-an overview. *International Journal of Food Studies*, 113-128.

58. Valenzuela-Lagarda, J. L., Gutiérrez-Dorado, R., Pacheco-Aguilar, R., Lugo-Sánchez, J. B., Reyes-Moreno, C., Mazorra-Manzano, M. A., & Muy-Rangel, M. D. (2016). Botanas expandidas a base de mezclas de harinas de calamar, maíz y papa: efecto de las variables del proceso sobre propiedades fisicoquímicas. *CyTA-Journal of Food*, 1-7.
59. Wang, Y.-Y., & Ryu, G.-H. (2013). Physical properties of extruded corn grits with corn fibre by CO₂ injection extrusion. *Journal of Food Engineering*, 14-20.
60. Wójciewicz, A., Mitrus, M., Orniszczuk, T., Móscicki, L., Krecisz, M., & Oniszczuk, A. (2015). Selected physical properties, texture and sensory characteristics of extruded breakfast cereals based on wholegrain wheat flour. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 301-308.
61. Wolf, K., & Hai, R. (2007). Cellular Antioxidant Activity (CAA) Assay for Assessing Antioxidants, Foods, and Dietary Supplements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 8896-8907.
62. Yägci, S., & Gögüs, F. (2008). Response surface methodology for evaluation of physical and functional properties of extruded snack foods developed from food-by-products. *Journal of Food Engineering*, 122-132.
63. Ye, J., Hu, X., Luo, S., Liu, W., Chen, J., Zeng, Z., & Liu, C. (2017). Properties of starch after extrusion: a review. *Starch/Stärke*, 507-520.
64. Zambrano-Zaragoza, M. L., Gutiérrez-Cortez, E., Jiménez-Vieyra, M. E., Gallardo-Navarro, Y., Cornejo-Villegas, M., & Quintanar-Guerrero, D. (2013). Effects of extrusion process in snacks of oats-nixtamalized corn pericarp mixtures on dietary fiber content and functional properties. *CyTA*, 1-8.
65. Zarzycki, P., Kasprzak, M., Rzedzicki, Z., Sobota, A., Wirkijowska, A., & Sykut-Domanska, E. (2015). Effect of blend moisture and extrusion temperature on physical properties of everlasting pea-wheat extrudates. *Journal Food Science and Technology*, 1-8.
66. Zhang, C., Zhang, H., Wang, L., & Qian, H. (2014). Physical, functional, and sensory characteristics of cereal extrudates. *International Journal of Food Properties*, 1921-1933.
67. Zhu, L.-J., Shukri, R., Mesa-Stonestreet, N. J., Alavi, S., Dogan, H., & Si, Y.-C. (2010). Mechanical and microstructural properties of soy protein-high amylose corn starch extrudates in relation to physicochemical changes of starch during extrusion. *Journal of Food Engineering*, 232-238.