



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA  
APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA

UNIDAD QUERÉTARO

POSGRADO EN TECNOLOGÍA AVANZADA

CAMBIOS MICROESTRUCTURALES GENERADOS EN EL  
ALMIDÓN DE SORGO EXPLOTADO (*SORGHUM BICOLOR*  
L. MOENCH) Y SU IMPACTO SOBRE SUS PROPIEDADES  
REOLÓGICAS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN TECNOLOGÍA  
AVANZADA

PRESENTA

M. T. A. ÁNGEL HUMBERTO CABRERA RAMÍREZ

DIRECTORES DE TESIS

DR. EDUARDO MORALES SÁNCHEZ  
DRA. MARCELA GAYTÁN MARTÍNEZ

QUERÉTARO, QRO. ENERO DE 2023



CICATA-IPN  
QUERÉTARO



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

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

Ciudad de México, a 9 de diciembre del 2022

El Colegio de Profesores de Posgrado de **CICATA Unidad Querétaro** en su Sesión Ordinaria No. 221209 celebrada el día 9 del mes diciembre del 2022, conoció la solicitud presentada por el alumno:

Apellido Paterno:	Cabrera	Apellido Materno:	Ramírez	Nombre (s):	Ángel Humberto
-------------------	---------	-------------------	---------	-------------	----------------

Número de registro: 

A	1	9	0	5	7	8
---	---	---	---	---	---	---

del Programa Académico de Posgrado: 

Doctorado en Tecnología Avanzada
----------------------------------

Referente al registro de su tema de tesis; acordando lo siguiente:

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

Cambios microestructurales generados en el almidón de sorgo explotado ( <i>Sorghum bicolor</i> L. Moench) y su impacto sobre sus propiedades reológicas
---

Objetivo general del trabajo de tesis:

Estudiar los cambios microestructurales generados en el almidón de sorgo explotado ( <i>Sorghum bicolor</i> L. Moench) y su impacto sobre sus propiedades reológicas.
---

2.- Se designa como Directores de Tesis a los profesores:

Director: 

Dr. Eduardo Morales Sánchez
-----------------------------

 2° Director: 

Dra. Marcela Gaytán Martínez
------------------------------

  
No aplica:

3.- El Trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesis será elaborado por el alumno en:

CICATA-Unidad Queretaro
-------------------------

que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.

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

Director de Tesis

Dr. Eduardo Morales Sánchez

Aspirante

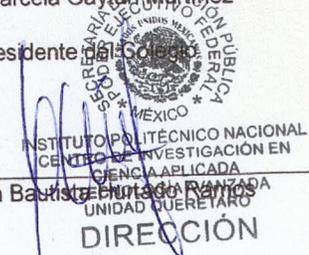
Angel Humberto Cabrera Ramirez

2° Director de Tesis

Dra. Marcela Gaytán Martínez

Presidente del Colegio

Dr. Juan Bautista Hurtado Rantosa  
UNIDAD QUERETÁRO  
DIRECCIÓN





# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Querétaro siendo las 13:00 horas del día 10 del mes de diciembre del 2022 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de CICATA-IPN UNIDAD QUERETARO para examinar la tesis titulada:

Cambios microestructurales generados en el almidón de sorgo explotado (*Sorghum bicolor* L. Moench) y su impacto sobre sus propiedades reológicas del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Cabrera	Apellido Materno:	Ramírez	Nombre (s):	Angel Humberto
-------------------	---------	-------------------	---------	-------------	----------------

Número de registro: A 1 9 0 5 7 8

Aspirante del Programa Académico de Posgrado: Doctorado en Tecnología Avanzada

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 19% de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo **SI**  **NO**  **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

### JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:

En el análisis de similitud del documento de tesis no se encontraron frases completas idénticas a otras fuentes. El porcentaje de similitud corresponde a palabras aisladas y/o frases de uso común en el área.

**\*\*Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR**  **SUSPENDER**  **NO APROBAR**  la tesis por **UNANIMIDAD**  o **MAYORÍA**  en virtud de los motivos siguientes:  
El trabajo desarrollado, así como la comprensión y discusión de la información obtenida se considera que cumplen con los requisitos para sustentar el examen de grado al cual aspira.

### COMISIÓN REVISORA DE TESIS

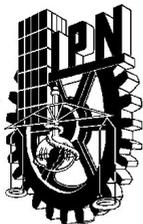
Eduardo Morales S.  
Dr. Eduardo Morales Sánchez

Marcela Gaytán  
Dra. Marcela Gaytán Martínez

Dr. Gonzalo Velázquez de la Cruz  
Dr. Juan Ramírez Hurtado Ramos  
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES  
DIRECCIÓN

Eva González Jasso  
Dra. Ma. Guadalupe del Carmen Méndez Montealvo

Aurea Karina Ramírez Jiménez  
Dra. Aurea Karina Ramírez Jiménez



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN

En la Ciudad de México el día 10 del mes de diciembre del año 2022, el que suscribe M.T.A. Angel Humberto Cabrera Ramírez alumno(a) del programa Doctorado en Tecnología Avanzada con número de registro A190578, adscrito(a) a CICATA-IPN Unidad Querétaro manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del Dr. Eduardo Morales Sánchez y cede los derechos del trabajo intitulado "Cambios microestructurales generados en el almidón de sorgo explotado (*Sorghum bicolor* L. Moench) y su impacto sobre sus propiedades reológicas", al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expresado del autor y/o director(es). Este puede ser obtenido escribiendo a las siguiente(s) dirección(es) de correo: [angel\\_humbert00@hotmail.com](mailto:angel_humbert00@hotmail.com) ; [emoraless@ipn.mx](mailto:emoraless@ipn.mx). Si el permiso se otorga, al usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

---

M.T.A Angel Humberto Cabrera  
Ramírez



## Dedicación

*Este logro está dedicado a toda mi familia, “mi gran motor para salir adelante”. Principalmente, a mis padres, Rosa y Roberto, quienes siempre me han apoyado incondicionalmente en las buenas y no tan buenas, alentándome a seguir adelante y cumplir mis sueños. Han sido pilar en mi vida, inculcándome valores y principios, que hoy rigen mi vida. Estas dos personas que me han mostrado que el amor de un padre no tiene límites, lo entregan todo sin pedir nada a cambio.*

*A mis hermanos, Rosa, Ana, Valentín y Omar: por estar siempre conmigo, por su cariño (expresado cada uno en su propio estilo), su apoyo, por los momentos de diversión, los momentos de tristeza. Pero sobre todo por siempre permanecer unidos en las buenas y en las malas.*

*A mis sobrinos, con quienes he podido experimentar un sentimiento equiparable a ser un padre: disfrutar sus logros, verlos crecer, pasar momentos de preocupación, de alegría y estar pendiente. Los quiero mucho y espero que siempre continuemos unidos.*

*Al Dr. Eduardo Morales Sánchez y La Dra. Marcela Gaytán Martínez, quienes han sido ejemplo a seguir en la investigación, forjándome como el investigador que ahora soy. Por recibirme con los brazos abiertos y ser parte de mi formación desde la licenciatura, maestría y ahora en el doctorado. Sobre todo, agradezco su confianza y amistad en estos 10 años, su apoyo incondicional en las buenas y en las malas. Mostrando que, son “padres académicos” y que como tal se preocupan y ven por sus alumnos (personal y académicamente).*

*“La fe en Dios nos permite ver lo invisible, creer en lo increíble y recibir lo imposible”*



## Agradecimientos

Al Instituto Politécnico Nacional (IPN), el cual a través del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología avanzada (CICATA) unidad Querétaro, me permitió cursar el Doctorado en Tecnología Avanzada. Así como facilitarme el uso de sus instalaciones para desarrollar parte de la investigación.

A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), por permitirme hacer uso de sus instalaciones para la caracterización de las muestras.

En especial a mis asesores, el Dr. Eduardo Morales Sánchez y la Dra. Marcela Gaytán Martínez, por permitirme ser su discípulo y mostrarme las mieles de la investigación. Por permitirme no ser solo un alumno, si no un miembro de su equipo de trabajo y colaborador. Agradezco su guía, dirección y el tiempo invertido en mi persona para mejorar mis habilidades de investigación (planteamiento de experimentos, análisis de datos, presentación de resultados y publicación).

A los miembros de mi Comité Tutorial, El Dr. Eduardo Morales Sánchez, Dra. Marcela Gaytán Martínez, Dr. Gonzalo Velázquez de la Cruz, Dra. Eva González Jasso y Dra. Aurea Karina Ramírez Jiménez, por sus valiosas aportaciones, sugerencias y el tiempo dedicado para permitir la culminación de este proyecto de investigación.

Instituto de Investigación en Ciencias de la Alimentación (CIAL), de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) (Madrid, España), por permitirme realizar una estancia de investigación y utilizar sus instalaciones para llevar a cabo parte de la experimentación de esta investigación. A la Dra. Ma. Mar Villamiel Guerra (directora CIAL) y la Dra. Antonia Montilla Corredera, por apoyarme, atender todas mis dudas y permitirme colaborar con ellas durante mi estancia en el CIAL. Al igual que a los miembros del laboratorio de química y funcionalidad de carbohidratos (Paula, Pablo, Diego, Ana, Manu, entre otros) por su apoyo y compañerismo durante esta estancia.

A mi comité revisor de Tesis, Dr. Eduardo Morales Sánchez, Dra. Marcela Gaytán Martínez, Dr. Gonzalo Velázquez de la Cruz, Dra. Eva González Jasso, Dra. Aurea Karina Ramírez Jiménez y Dra. Ma. Guadalupe Del Carmen Méndez Montealvo, por sus valiosas aportaciones y comentarios para el enriquecimiento de este trabajo de tesis.

Al Dr. Mario Enrique Rodríguez García (UNAM, Juriquilla) por su valioso apoyo, capacitación y consejos para la realización e interpretación de las pruebas de carácter físico. Así mismo, le agradezco sus consejos y comentarios encaminados a mejorar mi escritura de documentos científicos.

A la Dra. Ma. Guadalupe del Carmen Méndez Montealvo, por su apoyo, disposición y consejos para la realización de algunos experimentos de esta investigación.

A la M.C. Fernanda G. Castro Campos, por su valioso apoyo, por ser colaboradora y amiga a lo largo de estos años de doctorado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de posgrado otorgada para la realización de mis estudios de doctorado.



“Si quieres ir rápido ve solo, si quieres llegar lejos ve acompañado”

## Resumen

La modificación física es una técnica ampliamente utilizada para mejorar las características no deseadas de almidones nativos. Estas metodologías se han centrado principalmente en la gelatinización del almidón, siendo el tratamiento en autoclave, tratamientos hidrotérmicos y extrusión de los más utilizados. Sin embargo, en su mayoría, emplean una humedad alta (>20 %) y largos tiempos de procesamiento (minutos a días) o bien requieren de equipo altamente especializado. En ese sentido, se propone el proceso de explotado de cereales, que puede considerarse como un tratamiento de alta temperatura en cortos tiempos (del inglés “*high temperature in short times (HTST)*”), ya que el grano es sometido a alta temperatura (>200 °C) en cortos tiempos (<120 s), expandiendo rápidamente el endospermo y obteniendo un explotado (*poppping*), con la peculiaridad de utilizar humedades en el rango de 12 a 20 % y no requerir equipo especializado. Los explotados se han empleado únicamente para la elaboración de botanas, por lo que su estudio se ha centrado en la optimización de métodos para mejorar el rendimiento y calidad de explotado. Siendo el almidón el mayor componente de los granos, actualmente se desconoce el impacto del explotado sobre estos. Así mismo, no se ha investigado las implicaciones del explotado sobre las características fisicoquímicas, reológicas y tecno-funcionales del almidón o del grano. Por lo anterior, en este trabajo se estudiaron los cambios microestructurales generados en el almidón de sorgo explotado (*Sorghum bicolor* L. Moench) y su impacto sobre las propiedades reológicas. En la primera etapa se evaluaron las características fisicoquímicas, estructurales y nutracéuticas de variedades mexicanas de sorgo con diferentes colores de testa. En la etapa dos se estandarizó un método de explotado empleando aire caliente a 210 °C por 90 s. Se estudiaron los atributos de calidad del explotado. Así mismo, se realizó una correlación para encontrar las variables o características fisicoquímicas del grano crudo que determinan la calidad del explotado. Finalmente, en la etapa tres se evaluaron los cambios estructurales ocurridos en el almidón de sorgo explotado y su impacto sobre su comportamiento reológico.

Se encontró que un mayor grosor del pericarpio, alto contenido de endospermo córneo y una distribución bimodal (2 tamaños del gránulo de almidón) en el endospermo harinoso, fueron las características determinantes en la obtención de explotados de mayor volumen. Por otro lado, el proceso de explotado produjo una gelatinización en seco del almidón, evidenciado por una ausencia de la transición de gelatinización después del procesamiento. Adicionalmente, el patrón de difracción de rayos X cambió de Tipo-A a un Tipo-V, asociado principalmente a la formación de lamelas cristalinas desfasadas. Los resultados indican que el proceso de explotado dio lugar a una modificación física del almidón, obteniendo un almidón con un comportamiento reológico más estable, el cual mostró una viscosidad constante ante cambios de temperatura y cizalla. Así mismo, este almidón mostró un aumento del índice de consistencia (k), perdió su carácter pseudoplástico y mostró mayor resistencia a la deformación, respecto al nativo. Lo anterior, muestra al explotado como un proceso sencillo y rápido para la modificación del almidón, cuyas características fisicoquímicas y reológicas lo postulan como un ingrediente y/o aditivo potencial para su uso en la industria alimentaria. Sin embargo, investigaciones futuras deberán centrarse en evaluar el impacto de la incorporación de este ingrediente en diferentes matrices alimentarias sobre sus características tecno-funcionales, reológicas y vida de anaquel.



## Abstract

Physical modification is a widely used technique to improve undesired characteristics of native starches. Such methodologies have mainly focused on starch gelatinization, being the most widely used autoclaving, hydrothermal treatments, extrusion, among others. Nevertheless, most of them use high moisture and long processing times, also requiring highly specialized equipment. In that sense, the popping process is proposed, which can be considered as a high-temperature in short-times treatment (HTST) since the grain is subjected to high temperature (>200 °C) in short times (<120 s), rapidly expanding the endosperm and obtaining a popped grain, with the peculiarity of using less than 12% moisture and not requiring specialized equipment. The popped grains have been used only to produce snacks, so their study has focused on optimizing methods to improve grain yield and quality. Since starch is the major component of the grain, the impact of popping on it is currently unknown. Likewise, the implications of popping on the physicochemical, rheological, and techno-functional characteristics of starch or grain are unknown. Therefore, this work sought to study the microstructural changes generated in popped sorghum starch (*Sorghum Bicolor* L. Moench) and their impact on rheological properties. In stage one (Chapter 1), we sought to evaluate the physicochemical, structural, and nutraceutical characteristics of Mexican sorghum varieties with different testa colors. In stage two (Chapter 2), a popped method was standardized using hot air at 210 °C for 90s. The quality attributes of the popped grain were evaluated. Furthermore, a correlation analysis was made to find the variables or physicochemical characteristics of the raw grain that determine the quality of the popped product. In the third stage (Chapter 3), the structural changes in the popped sorghum starch and their impact on its rheological behavior were evaluated.

It was found that a thicker pericarp, high content of corneous endosperm, and a bimodal distribution (2 sizes of starch granules) of floury endosperm were the determining characteristics in obtaining popped products of higher volume. On the other hand, the popping process produced a dry gelatinization of starch, evidenced by an absence of gelatinization transition after processing. On the other hand, the X-ray diffraction pattern changed from A-type to a V-type, mainly associated with the formation of out-of-phase crystalline lamellae growth. Therefore, the popped process resulted in a physical modification of the starch, obtaining a starch with a more stable rheological behavior, showing a constant viscosity under temperature and shear changes. Likewise, this starch showed an increase in the consistency index (k), lost its pseudoplastic character, and showed increased resistance to deformation compared to the native starch. These results demonstrate that the popping process is a simple and fast process for starch modification, with physicochemical and rheological characteristics suggesting it as a potential ingredient and/or additive for its use in the food industry. However, future research should focus on evaluating the impact of the incorporation of this ingredient in different food matrices on its techno-functional, rheological, and shelf-life characteristics.



## Índice de contenido

SIP13-BIS	ii
SIP14-BIS	iii
Carta de autorización de uso de obra	iv
Dedicación	v
Agradecimientos	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Índice de figuras	xii
Índice de gráficas	xiii
Índice de tablas	xiii
Índice de ecuaciones	xiv
Capítulo 1 : Planteamiento de la investigación	1
1.1 Introducción	2
1.2 Justificación	5
1.3 Hipótesis	5
1.4 Objetivo general	6
1.5 Objetivos específicos	6
Capítulo 2 : Características fisicoquímicas, estructurales y nutracéuticas de variedades mexicanas de sorgo ( <i>Sorghum bicolor</i> L. Moench)	7
Resumen del capítulo	8
2.1 Introducción	9
2.1.1 Características nutricionales y funcionales del sorgo	11
2.1.1.1 Lípidos	12
2.1.1.2 Compuestos fenólicos	13
2.1.2 Almidón	16
2.1.3 Almidón resistente	19
2.2 Materiales y métodos	21
2.2.2 Material biológico	21
2.2.3 Métodos	21
2.2.3.1 Limpieza y remoción del tratamiento del grano	21
2.2.3.2 Caracterización física del grano	22
2.2.3.2.1 Peso de mil granos, dimensiones y esfericidad	22
2.2.3.2.2 Peso hectolítrico	22
2.2.3.2.3 Perfil de textura en grano	22
2.2.3.3 Caracterización proximal del grano	22
2.2.3.3.1 Fibra dietética total: fibra soluble e insoluble	23
2.2.3.3.1.1 Fibra insoluble	23
2.2.3.3.1.2 Fibra soluble	23
2.2.3.3.2 Almidón resistente	23
2.2.3.4 Caracterización del almidón nativo	24



2.2.3.4.1	Evaluación de la microestructura mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM)	24
2.2.3.4.2	Evaluación de las propiedades de pasta	24
2.2.3.4.3	Evaluación de las propiedades térmicas mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC)	25
2.2.3.4.4	Difracción de rayos X	25
2.2.3.4.5	Evaluación de los grupos funcionales mediante la espectroscopia de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)	25
2.2.4	Análisis estadístico	25
2.3	Resultados y discusiones	26
2.3.2	Caracterización física de las variedades	26
2.3.3	Caracterización proximal	28
2.3.4	Caracterización del perfil de viscosidad y propiedades térmicas	32
2.3.5	Evaluación de la microestructura	36
2.3.6	Análisis de grupos funcionales	41
2.3.6.1	Región 4000 a 2000 cm <sup>-1</sup>	43
2.3.6.2	Región 1900 a 1400 cm <sup>-1</sup>	44
2.3.6.3	Región 1450 a 600 cm <sup>-1</sup>	46
2.3.7	Difracción de rayos x	49
2.3.8	Relación entre las variables estudiadas	53
2.4	Conclusiones del capítulo	61
Capítulo 3 : Relación entre las características fisicoquímicas del sorgo crudo y la calidad del sorgo explotado		62
Resumen del capítulo		63
3.1	Introducción	64
3.2	Materiales y métodos	67
3.2.1	Material biológico	67
3.2.2	Métodos	67
3.2.2.1	Caracterización física del sorgo crudo	67
3.2.2.2	Evaluación de la microestructura del sorgo crudo	67
3.2.2.3	Determinación del contenido de endospermo corneo y harinoso en los sorgos crudos	67
3.2.2.4	Caracterización proximal del sorgo crudo	68
3.2.2.5	Obtención del sorgo explotado	69
3.2.2.5.1	Pretratamiento del grano	69
3.2.2.5.2	Proceso de explotado	69
3.2.2.6	Calidad del sorgo explotado	69
3.2.2.6.1	Volumen aparente y tamaño del explotado	69
3.2.2.6.2	Volumen de expansión	70
3.2.2.7	Análisis estadístico	70
3.3	Resultados y discusiones	71
3.3.1	Contenido de endospermo corneo y harinoso en los sorgos crudos	71
3.3.2	Propiedades del explotado de sorgo	73
3.3.3	Relación entre las propiedades del sorgo crudo y explotado	75
3.3.4	Análisis de componentes principales	81
3.4	Conclusiones del capítulo	84



Capítulo 4 : Cambios estructurales en el sorgo explotado y su impacto en el comportamiento reológico	85
Resumen del capítulo	86
4.1    Introducción	87
4.2    Materiales y métodos	88
4.2.1    Material biológico	88
4.2.2    Pretratamiento del grano y obtención del explotado	89
4.2.3    Características estructurales	89
4.2.3.1    Microestructura	89
4.2.3.2    Difracción de rayos-X	89
4.2.3.3    Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)	90
4.2.3.4    Propiedades térmicas	90
4.2.4    Comportamiento reológico	90
4.2.4.1    Curvas de flujo	90
4.2.4.2    Perfil de viscosidad	91
4.2.4.3    Propiedades viscoelásticas	91
4.2.5    Análisis estadístico	92
4.3.1    Cambios físicos en el sorgo explotado	92
4.3.1.1    Microestructura	92
4.3.1.2    Difracción de rayos-X y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	94
4.3.1.3    Propiedades térmicas	99
4.3.2    Comportamiento reológico	101
4.3.2.1    Perfil de viscosidad	101
4.3.2.2    Comportamiento de flujo	104
4.3.2.3    Propiedades viscoelásticas	106
4.3.3    Relación entre las propiedades estructurales y el comportamiento reológico del sorgo explotado	108
4.4    Conclusiones del capítulo	111
Capítulo 5 : Conclusiones generales y trabajo futuro	112
5.1    Conclusiones generales	113
5.2    Trabajo futuro	115
Anexos: productos generados	116
A.1    Artículos publicados SCI o JCR	116
A.1.1    Derivados del proyecto	116
A.1.2    Colaboración	116
A.2    Artículos de divulgación científica	117
A.3    Presentaciones orales en congresos internacionales	117
A.4    Pláticas en congresos y eventos de divulgación científica	118
A.5    Estancias de investigación	118
A.6    Participación en proyectos de investigación	118
A.7    Premios y distinciones	118



## Índice de figuras

Figura 2.1 Estructura del grano de sorgo .....	10
Figura 2.2 Ubicación de los glóbulos cerosos en el pericarpio del sorgo .....	10
Figura 2.3 Principales compuestos fenólicos en el sorgo; ácidos fenólicos simples (a, b), flavanonas (c), flavona (d), flavonoides (e, f), 3-deoxianticianidinas (g, h).....	14
Figura 2.4 Taninos condensados (a) y taninos hidrolizados (b) presentes en el sorgo .....	14
Figura 2.5 Estructura química de la amilopectina y la amilosa .....	17
Figura 2.6 Micrografía de los gránulos de almidón de sorgo .....	18
Figura 2.7 Organización y disposición de la amilosa y amilopectina en los gránulos de almidón. ....	18
Figura 2.8 Micrografías de los sorgos rojos crudos.....	36
Figura 2.9 Micrografías de los sorgos blancos crudos .....	37
Figura 2.10 Principales modos vibracionales de las moléculas.....	41
Figura 2.11 Espectro infrarrojo medio (4000-600 cm <sup>-1</sup> ) de las variedades de sorgo crudo .....	42
Figura 2.12 Región de 4000 a 2000 cm <sup>-1</sup> .....	43
Figura 2.13 Región IR de 1900 a 1400 cm <sup>-1</sup> .....	45
Figura 2.14 Espectro infrarrojo de la región 1450-600 cm <sup>-1</sup> .....	47
Figura 2.15 Difractogramas de los: a) Sorgos rojos; b) Sorgos blancos .....	49
Figura 2.16 Disposición de la amilosa y el agua en función del polimorfismo tipo A y B en la cristalinidad .....	50
Figura 2.17 Metodología de integración de Brückner para la obtención de la cristalinidad aparente. ....	51
Figura 2.18 Modelo de predicción del contenido de amilosa aparente respecto a la cristalinidad por DRX .....	52
Figura 2.19 Coeficientes de correlación entre la variedad, el color y las propiedades físicas, de pasta, térmicas, compuestos fenólicos y proximal.. ..	54
Figura 2.20 Coeficientes de correlación entre las propiedades físicas del grano y las propiedades de pasta, térmicas, y proximal.....	55
Figura 2.21 Coeficientes de correlación entre los atributos proximales del grano y las propiedades de pasta y térmicas. ....	58
Figura 2.22 Coeficientes de correlación entre las propiedades de pasta y las propiedades térmicas.. ....	60
Figura 3.1 Segmentación de imágenes para la obtención de las fracciones de endospermo harinoso y corneo de las variedades de sorgo estudiadas.....	71
Figura 2.2 Matriz de correlación entre las características proximales del sorgo crudo y los atributos del sorgo explotado.....	75
Figura 2.3 Matriz de correlación entre las propiedades físicas del sorgo crudo y los atributos del sorgo explotado.....	77
Figura 2.4 a) Esquema del comportamiento de la distribución del tamaño de los gránulos (monomodal y bimodal) en el endospermo harinoso, y su relación con el tamaño del sorgo reventado. b) Microestructura del explotado en función del tipo de distribución (monomodal y bimodal).....	79
Figura 2.5 Matriz de correlación entre las características de calidad y los atributos del explotado.. ....	80
Figura 2.5 Análisis de Componentes Principales (PCA) agrupados por su capacidad de producir sorgo explotado.....	82
Figura 4.1 Microestructura de los granos de sorgo crudo y explotado con diferente contenido de humedad inicial (11, 15 y 20 %). GA: gránulo de almidón; Mp: matriz de proteína; Cp: cuerpo proteico. ....	93



Figura 4.2 a) Patrón de difracción de rayos X de las harinas de sorgo crudo y explotado con diferente contenido de humedad inicial (11, 15 y 20%). b) segunda derivada del patrón de difracción de rayos X del sorgo explotado. ....95

Figura 4.3 a) Cristal ortorrómbico de almidón de sorgo crudo y (b) crecimiento de lamelas cristalinas en el almidón de sorgo explotado. ....97

Figura 4.4 Espectro infrarrojo del sorgo crudo y explotado con diferentes contenidos de humedad inicial (11, 15 y 20%). l: modo de vibración; s: estiramiento simétrico; as: estiramiento antisimétrico; d: deformación; b: flexión.....98

Figura 4.5 Perfil de viscosidad del sorgo crudo y explotado con diferentes HI.....102

Figura 4.6 Comportamiento de las propiedades viscoelásticas de los sorgos crudos y explotados. ....106

Figura 4.7 Comportamiento de las propiedades viscoelásticas de los sorgos crudos y explotados. Colores diferentes representan la fuerza, la dirección y el nivel de significancia de la correlación.....109

## Índice de gráficas

Gráfica 2.1 Distribución del tamaño del gránulo de almidón en los sorgos rojos crudos .....39

Gráfica 2.2 Distribución del tamaño del gránulo de almidón en los sorgos rojos crudos .....40

## Índice de tablas

Tabla 2.1 Caracterización nutricional de sorgo blanco y rojo.....12

Tabla 2.2 Efectos benéficos de lípidos presentes en el sorgo .....13

Tabla 2.3 Estudios realizados en compuestos fenólicos contenidos en sorgo evaluado como agente antiinflamatorio y anticancerígeno.....15

Tabla 2.4 Propiedades hipoglucémicas asociadas a compuestos fenólicos en sorgo.....16

Tabla 2.5 Características de la amilosa y amilopectina en almidón de sorgo.....17

Tabla 2.6 Variedades de sorgo empleadas en este estudio .....21

Tabla 2.7 Caracterización física del grano .....27

Tabla 2.8 Caracterización proximal de los sorgos crudos .....28

Tabla 2.9 Contenido de fibra dietaria total (soluble e insoluble) y almidón resistente en los sorgos crudos .....31

Tabla 2.10 Propiedades de pasta de las harinas obtenidas de los sorgos crudos .....33

Tabla 2.11 Propiedades térmicas de las harinas obtenidas a partir de los sorgos crudos.....35

Tabla 2.12 Características del gránulo de almidón en los granos de sorgo crudos .....39

Tabla 2.13 Grupos funcionales asociados a las bandas identificadas del espectro infrarrojo región 4000-2000 cm<sup>-1</sup> .....44

Tabla 2.14 Bandas encontradas en la región 1900 a 1400 cm<sup>-1</sup>.....46

Tabla 2.15 Bandas encontradas en la región 1450-600 cm<sup>-1</sup> .....48

Tabla 2.16 Cristalinidad aparente del almidón de las variedades de sorgo por el método de integración de Brückner .....51

Tabla 2.17 Contenido de amilosa y amilopectina aparentes obtenidos del modelo de predicción respecto a la cristalinidad de los almidones en las variedades empleadas en este estudio .....53

Tabla 3.1 Contenido de endospermo harinoso, corneo y la relación corneo/harinoso en las variedades de sorgo crudo.....72

Tabla 3.2 Parámetros de calidad de la explotado de sorgo.....74



Tabla 4.1 Propiedades térmicas del sorgo crudo y explotado .....99  
Tabla 4.2 Comportamiento de flujo del sorgo crudo y explotado con diferente humedad inicial (HI). 105

## Índice de ecuaciones

Ecuación 3.1 Contenido de endospermo. ....68  
Ecuación 3.2 Relación entre el contenido de endospermo corneo y harinoso. ....68  
Ecuación 3.3 Cálculo de los gramos de agua necesarios para ajustar a la humedad deseada en el grano. 69  
Ecuación 3.4 Cálculo del volumen de expansión. ....70  
Ecuación 4.1 Ley de la potencia.....91



---

## Capítulo 1 : Planteamiento de la investigación

---



## 1.1 Introducción

El sorgo es el quinto cereal más importante a nivel mundial, siendo México el quinto productor (USDA, 2019). Particularmente, en México cerca del 96 % del sorgo está destinado a la alimentación del ganado, mientras que, el 4 % restante se emplea mayoritariamente en la industria de biocombustibles y en menor medida en la alimentación humana (FAOSTAT, 2018). Sin embargo, las propiedades nutricionales y funcionales de este cereal lo posicionan como un buen candidato para su inclusión en la dieta humana. Presenta un contenido de carbohidratos del 80 %, 13 % de proteína, 2.5 % de lípidos y 1.5 % de cenizas, aunque la composición puede variar en función de la variedad. El componente mayoritario de la fracción de carbohidratos es el almidón (50-80 %), seguido de la fibra dietética (hasta 20 %), almidón resistente (<10 %) y la presencia de  $\beta$ -glucanos. Sumado a esto, le acompañan la presencia de un grupo muy variado de fitoquímicos, los compuestos fenólicos, los cuales han mostrado tener diversos efectos benéficos para la salud principalmente por sus propiedades antioxidantes, hipoglucemiantes (Kimy Park, 2012), anticancerígenos (Suganyadevi et al., 2013), regular el metabolismo de lípidos (Martinez et al., 2009), entre otros. Sin embargo, el sorgo también cuenta con la presencia de compuestos anti nutricionales como taninos condensados, ácido fítico, inhibidores enzimáticos y compuestos cianogénicos, los cuales se ha demostrado que con el procesamiento térmico logran reducirse a niveles seguros para su consumo (Gaytán-Martínez et al., 2017; Luzardo-Ocampo et al., 2020).

Por lo anterior, se han evaluado métodos para el procesamiento del sorgo como la nixtamalización, elaboración de productos de panadería y bebidas, así como botanas como explotados. En ese sentido, el explotado se ha empleado para procesar el sorgo en la India y algunas regiones de Asia (Mishra et al., 2014). Este proceso se considera como un tratamiento de alta temperatura en cortos tiempos (HTST), con la peculiaridad de utilizar humedades inferiores al 20 %. El explotado consiste en someter el grano a



altas temperaturas (180 a 300 °C) en un tiempo corto (90 a 120 s). Esto aumenta la presión de vapor al interior del grano, el cual, tras la ruptura del pericarpio, expande rápidamente el endospermo (Cabrerá-Ramírez et al., 2020).

El explotado transforma la matriz inicial en una nueva matriz compuesta por paneles delgados organizados en estructuras poligonales de una forma similar a un panal de abejas. Estas paredes delgadas son derivadas de la fusión del almidón y las macromoléculas presentes en el granos, como resultado de la presión y temperatura alcanzados en el procesamiento (Castro-Campos et al., 2021). A pesar de que la humedad es baja, se ha reportado que el explotado produce una gelatinización parcial del almidón. Así mismo, reduce la cristalinidad, los azúcares reductores libres y el contenido de amilosa soluble (Dharmaraj et al., 2014). Estos cambios impactan sobre las propiedades fisicoquímicas del almidón.

Desde un punto de vista reológico, las pastas de almidón se describen como una suspensión de partículas hinchadas dispersas en un medio macromolecular por lo que la capacidad de hinchamiento y solubilidad del almidón afectarán directamente sus propiedades reológicas, comportándose de manera diferente en función del tratamiento aplicado (Cabrerá-Ramírez et al., 2021). En consecuencia, cambian sus características tecno-funcionales y su posible aplicación industrial. Sin embargo, el efecto del procesamiento de una matriz compleja como el sorgo en condiciones de alta temperatura y baja humedad como el explotado, es un campo poco estudiado. Además, los cambios estructurales generados en el explotado impactan sobre su comportamiento reológico, propiedades tecno-funcionales y sus usos industriales, ha sido un área aun no explorada, inclusive en explotados populares como el maíz “palomitas de maíz o popcorn”. Por lo anterior, este trabajo tuvo como objetivo evaluar los cambios estructurales del sorgo explotado y su efecto sobre el comportamiento reológico.

La tesis se estructura en cinco capítulos. El Capítulo 1 se muestra el planteamiento de la investigación: justificación, hipótesis y objetivos. Mientras que, el Capítulo 2 se centra en el cumplimiento del primer objetivo, por lo que se evalúan las propiedades fisicoquímicas, estructurales y nutracéuticas de ocho variedades mexicanas de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), con diferentes colores de testa (rojo y blanco),



centrándose en mostrar las características que diferencian a estas variedades las cuales van más allá del color de la testa.

En el Capítulo 3 se evalúa la relación entre las características fisicoquímicas del sorgo crudo y la calidad del sorgo explotado, alineado al cumplimiento del segundo y tercer objetivo. En este capítulo se muestra el rol que juegan cada una de las características fisicoquímicas y estructurales del sorgo crudo durante el proceso de explotado, mostrando una correlación positiva entre el contenido de endospermo córneo, el tipo de distribución del tamaño del gránulo del almidón, grosor del pericarpio y la calidad del explotado (volumen de expansión y rendimiento).

En el Capítulo 4 se muestran los cambios estructurales ocurridos en el sorgo explotado y su impacto sobre el comportamiento reológico, dando lugar al cumplimiento del cuarto y quinto objetivo. Se muestra como el proceso de explotado, a pesar de tener una humedad del 11%, es capaz de producir una gelatinización total del almidón. Así mismo, durante el explotado se produce una restructuración del almidón por efecto de la presión y temperatura. Estos cambios estructurales modifican las propiedades fisicoquímicas, térmicas y reológicas del sorgo, dando lugar a la obtención de un material con un perfil de viscosidad constante ante cambios de temperatura, resistente a la cizalla y capaz de mantener su estructura después de aplicar varios ciclos de deformación.

Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones generales de la tesis, así como las perspectivas a futuro de la investigación.



## 1.2 Justificación

El sorgo es el quinto cereal más cultivado a nivel mundial, siendo México el quinto mayor productor. Este cereal, a pesar de ser una fuente importante de nutrientes y compuestos bioactivos, se ha destinado mayoritariamente a consumo de ganado (96 %). Sin embargo, en algunas regiones de Asia como la India, este cereal es utilizado para la obtención de botanas explotadas, homólogas a las palomitas de maíz. En ese sentido, el proceso de explotados consiste en someter el grano a altas temperaturas (<180 °C) en cortos tiempos (90 a 120 s) y humedades entre el 11 y el 20 %, por lo que podría ser catalogado como un tratamiento de alta temperatura en cortos tiempos (HTST). Los tratamientos HTST se han empleado ampliamente para la modificación de almidones para la obtención de características deseables en la industria alimentaria. Sin embargo, en el caso de los explotados, únicamente se les han destinado como un alimento o botana, por lo que sus usos alternos no están explorados. Por lo que, a pesar de que los explotados son botanas altamente consumidas a nivel mundial, el estudio del impacto del proceso de explotado sobre los componentes bioquímicos como proteínas, carbohidratos y lípidos no se ha estudiado en profundidad. En particular, se desconocen los cambios que genera el proceso de explotado sobre la estructura del almidón y sus posibles implicaciones en sus características fisicoquímicas, reológicas y tecnofuncionales y con ello un posible uso alternativo como ingrediente/aditivo en la industria alimentaria. Por lo que, el estudio de los cambios microestructurales surgidos en el almidón de sorgo explotado y su impacto en su comportamiento reológico se vuelve relevante brindando así usos alternativos a los explotados, lo que daría valor agregado al sorgo.

## 1.3 Hipótesis

El proceso de expandido de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) dará lugar a la gelatinización en seco del almidón provocando cambios en la microestructura del almidón y modificando significativamente sus propiedades fisicoquímicas y reológicas.



## 1.4 Objetivo general

Estudiar los cambios microestructurales generados en el almidón de sorgo explotado (*Sorghum bicolor* L. Moench) y su impacto sobre sus propiedades reológicas.

## 1.5 Objetivos específicos

1. Determinar las características fisicoquímicas, estructurales y bromatológicas que permitan la diferenciación de sorgos de diferentes variedades (*Sorghum bicolor* L. Moench).
2. Estandarizar un método que permita obtener explotados empleando una cámara de aire caliente, evaluando el número de granos explotados, volumen de expansión y tamaño del grano explotado en las diferentes variedades de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench).
3. Encontrar las propiedades fisicoquímicas, estructurales y bromatológicas del sorgo crudo que influyan sobre los atributos del grano explotado (número de granos explotados, índice de expansión y tamaño del explotado) y definir la variedad que presente las mejores características para el explotado.
4. Evaluar las propiedades microestructurales y reológicas de las harinas de sorgo crudo y explotado en la variedad seleccionada, correlacionando los cambios microestructurales ocurridos y su impacto en su comportamiento reológico.



---

Capítulo 2 : Características  
fisicoquímicas, estructurales y  
nutracéuticas de variedades  
mexicanas de sorgo (*Sorghum bicolor*  
L. Moench)

---



## Resumen del capítulo

Este Capítulo se centra en el cumplimiento del primer objetivo, por lo que se centra en encontrar las características fisicoquímicas, estructurales y bromatológicas que permitan la diferenciación de ocho variedades mexicanas de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), con diferentes colores de testa (rojo y blanco), centrándose en mostrar las características que diferencian a estas variedades las cuales van más allá del color de la testa. Características como el tamaño de gránulos de almidón y el tipo de distribución de tamaño de gránulo de almidón mostró correlacionarse con la entalpía de gelatinización  $\Delta H$  y con la DT. Mientras que, las propiedades de pasta mostraron una tendencia a disminuir en las variedades con alto contenido de fibra. Así mismo, se observó esta misma tendencia para las variedades con una mayor proporción de gránulos de almidón grandes, mayor contenido de AR y proteína.

Finalmente, las características fisicoquímicas y proximales de las variedades de sorgo permiten catalogarlas como de primera calidad y aptas para su consumo, de acuerdo con la NMX-FF-037-1994 y el CODEX *Alimentarius*. Se destacan las variedades blanca Paloma y roja 81g67 como candidatas con las mejores características físicas de dureza, peso hectolítrico y aspectos nutricionales y nutracéuticos. postulándose como las mejores candidatas para la obtención de explotados.



## 2.1 Introducción

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es una especie originaria del continente africano en las regiones de Sudán y Etiopía (Raquel et al., 2018). Es considerado un cereal valioso y competitivo mundialmente, ocupando el quinto puesto después del trigo, maíz, arroz y cebada (Althwab et al., 2015). Esta importancia es resultado de las características agronómicas del cultivo, tales como su capacidad para crecer en diversos tipos de suelos agrícolas, inclusive en regiones con ambientes secos, áridos o con cambios de temperatura drásticos (Althwab et al., 2015).

Se distinguen múltiples variedades de sorgo, sin embargo, Chuck-Hernández et al. (2011) lo clasifican en tres categorías: Sorgos graníferos, destinado para el consumo del ganado, humanos y la obtención de forrajes. Sorgos dulces, se emplean para la extracción de azúcar, elaboración de jarabes, extracción de etanol y producción de forraje. Sorgos de alta biomasa, son ricos en biomasa lignocelulósica y se destinan principalmente a la producción de biocombustibles. Este estudio se enfoca en el grupo de los sorgos graníferos, los cuales se subdividen según la coloración de la cariósida (blanco, perla, rojo, marrón y negros), por el grosor del pericarpio, por la presencia o ausencia de testa pigmentada (con o sin taninos), o bien en función del tipo de endospermo (normal, ceroso o heteroceroso) y su coloración (blanco o amarillo) (Chuck-Hernández et al., 2011).

El grano de sorgo, semilla o técnicamente conocida como cariósida, puede variar en sus atributos físicos (forma, color, tamaño y dureza) en función de la variedad (Bean et al., 2019). Habitualmente las variedades de sorgo presentan una cara aplanada en el grano en el que se distinguen tres partes principales: el pericarpio (3-6%), endospermo (84 - 90%) y el germen o embrión (5 - 10%) (Figura 2.1), cabe destacar que los porcentajes cambian en función de la variedad (Bean et al., 2019).

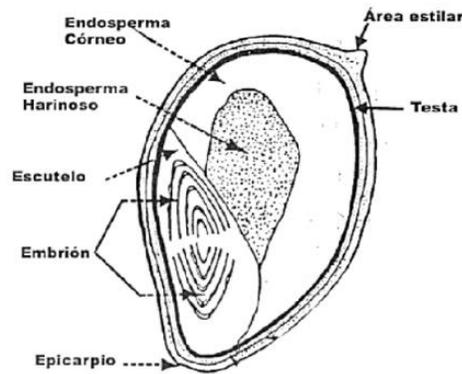


Figura 2.1 Estructura del grano de sorgo

**Fuente:** adaptado de Domanski et al. (1997).

El pericarpio es la parte exterior del grano que sirve como barrera física y está compuesta por dos o tres capas celulares. Cabe destacar que el sorgo es el único cereal que contiene algunos gránulos de almidón dispersos en el pericarpio. El grosor del pericarpio es muy variable y está en función de la cantidad de almidón presente en el mesocarpio; por otro lado, el sorgo presenta un recubrimiento de glóbulos cerosos ubicados al exterior del pericarpio en una capa de cutina (Figura 2.2) (Bean et al., 2019).

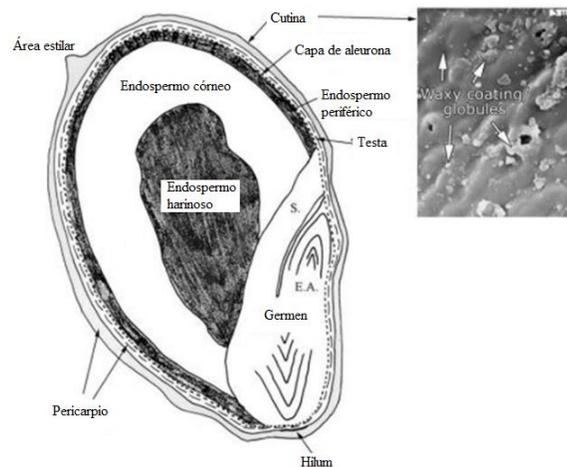


Figura 2.2 Ubicación de los glóbulos cerosos en el pericarpio del sorgo

**Fuente:** adaptado de Bean et al. (2016)

El pericarpio se divide en tres fracciones: epicarpio, mesocarpio y endocarpio, como se puede apreciar en la Figura 1.1b (Cabrera-Ramírez, 2015). Al exterior se encuentra el epicarpio, el cual está compuesto por una pared celular gruesa y alargada;



posteriormente se ubica el mesocarpio, con un conjunto de células con espesor variable; finalmente se tiene el endocarpio quien está constituido por células tubulares y transversales, las cuales son el principal punto de fractura del pericarpio durante su procesamiento (Cabrera-Ramírez, 2015).

El endospermo está constituido por cuatro partes principales: el endospermo harinoso, el endospermo córneo, endospermo periférico y la capa de aleurona (Bean et al., 2019). Como se puede apreciar en la Figura 1.2, el endospermo harinoso se ubica al centro del grano, popularmente al hablar del endospermo se refieren a esta fracción; es el componente morfológico mayoritario en todos los cereales y es principal componente nutricional para animales (incluyendo el hombre) (Evers y Millar, 2002).

La capa de células aleurona tiene una estructura que se asemeja a bloques, con paredes celulares gruesas y largas, núcleos prominentes, las cuales constituyen una o más capas sobre el endospermo harinoso partiendo del embrión (Figura 1.2). Esta capa contiene relativamente altas concentraciones de proteínas, lípidos y minerales, así como ácido ferúlico (Evers y Millar, 2002).

El embrión o germen se ubica al lado contrario al área estilar (Figura 1.2). Desde un punto de vista de supervivencia, es el componente más importante en el grano, ya que este puede asegurar el surgimiento de una nueva generación de plantas. El embrión tiene la mayor concentración de proteínas, vitaminas, lípidos y humedad de todo el grano (Evers y Millar, 2002).

### 2.1.1 Características nutricionales y funcionales del sorgo

El sorgo granífero es un alimento básico consumido por aproximadamente 500 millones de personas en 30 países subdesarrollados (Zhao y Ambrose, 2017). Los países desarrollados o en desarrollo emplean este cereal como alimento para el ganado (Wu et al., 2017). Recientemente, estos países han considerado seriamente la inclusión del sorgo en la dieta humana, debido a diversas características nutricionales (Tabla 2.1) o funcionales, entre las que destacan su contenido de proteína 9-10%, bajo contenido de



lípidos 2.7-3%, compuestos fenólicos y fibra dietética 17.2 %, entre otras (Gaytán-Martínez et al., 2017).

Tabla 2.1 Caracterización nutricional de sorgo blanco y rojo

Componente	Sorgo blanco	Sorgo rojo
Proteína (g/100 g)	10.3 ± 0.9	10.8 ± 0.8
Lípidos como extracto etéreo (g/ 100 g)	3.0 ± 0.2	3.0 ± 0.1
Cenizas (g/100 g)	1.4 ± 0.2	1.5 ± 0.2
Ácido fítico (mg/100 g)	903.2 ± 76.4	1072.8 ± 123.8

Fuente: Llopart y Drago, (2016), Gaytán-Martínez et al. (2017)

Estudios realizados entre el 2007 y el 2013 demuestran que, independientemente de la variedad, el sorgo presenta valores máximos de 5 ppm de gluten, quedando por debajo del valor reportado como seguro para celíacos (20 ppm), por lo que este cereal resulta ser una buena opción para personas con este padecimiento (Ciacci et al., 2007; Koehler y Wieser, 2013; Pontieri et al., 2013).

### 2.1.1.1 Lípidos

El contenido de lípidos se encuentra distribuido en los componentes estructurales del grano de la siguiente manera: germen 76.2 %, endospermo 13.2 % y pericarpio 10.6 % (Althwab et al., 2015). Está constituido por ceras y aceites (relación 2:1 - 3:1) y el 90 % de la fracción de aceite está compuesto por ácido linoleico, oleico y palmítico. Comparado con el maíz, el sorgo posee un mayor contenido de ácido oleico, esteárico y menor porcentaje de ácido linoleico, mirístico y palmitoleico, lo que lo hace un aceite menos saturado (Althwab et al., 2015). Se ha demostrado que los extractos lipídicos del grano de sorgo (ELS) tienen efectos benéficos sobre la salud, los cuales se muestran en la Tabla 2.2.



Tabla 2.2 Efectos benéficos de lípidos presentes en el sorgo

Compuesto	Efecto	Estudio
Extractos lipídicos de sorgo (ELS)	Redujo los niveles de colesterol no HDL en hámsters machos sirios FB, con reducciones de 18, 36 y 69 % en hámsters suplementados con 0.5, 1 y 5 % de ELS, respectivamente	Carr et al. (2005)
Fracción lipídica de sorgo extraíble con hexano (FLSH)	Mostró una reducción del 30.31% en colesterol no HDL en plasma y un 46.13 % en el nivel de colesterol esterificado en el hígado, al suministrar 5 % de FLSH en la dieta a hámsteres machos sirios FB.	Hoi et al. (2009)
Extractos lipídicos de sorgo (ELS)	Mostró que la adición de ELS en la dieta mejoró la homeostasis del colesterol y que ésta se encontraba fuertemente relacionada con las alteraciones en la microbiota intestinal un modelo de hipercolesterolemia en hámster.	Martínez et al. (2009)

### 2.1.1.2 Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos (CF) son eficaces antioxidantes debido a su capacidad de captura o inhibición de radicales libres, haciendo frente sobre algunas enfermedades crónico-degenerativas como el cáncer, diabetes mellitus tipo 2 y enfermedades cardiovasculares (Wu et al., 2017). Los compuestos fenólicos presentes en el sorgo principalmente son ácidos fenólicos simples (ácido ferúlico y p-cumárico), flavanonas, flavonas, flavonoides (luteolina y apigenina) (Dykes et al., 2009) y 3-deoxiantocianidinas (5-metoxiluteolinidina y 7-metoxiapigenidina) (Figura 2.3), así como compuestos poli fenólicos (taninos condensados e hidrolizados, Figura 2.4) (Wu et al., 2017).

Los CF presentes en diversos alimentos poseen propiedades hipoglucemiantes como resultado de diversos mecanismos, entre los cuales están su capacidad de eliminación de radicales libres y su capacidad para la activación o inhibición de algunas enzimas, reduciendo así el estrés oxidativo e indirectamente disminuir los niveles de glucosa en sangre y prevenir la hiperinsulinemia (Hamden et al., 2009).

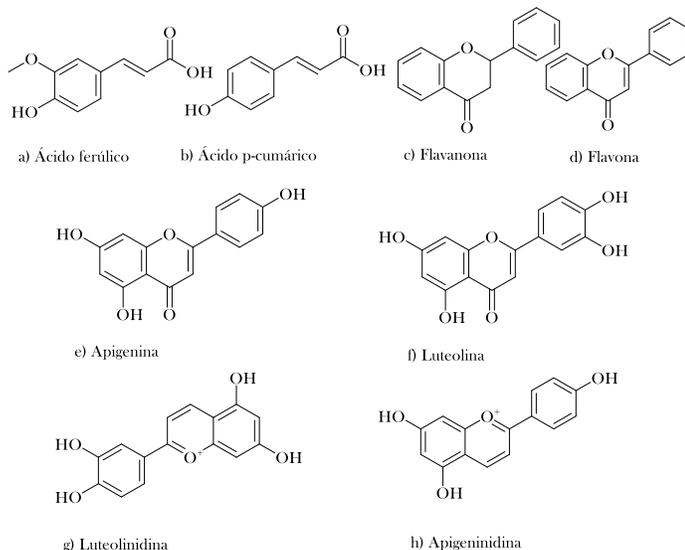


Figura 2.3 Principales compuestos fenólicos en el sorgo; ácidos fenólicos simples (a, b), flavanonas (c), flavona (d), flavonoides (e, f), 3-deoxianticianidinas (g, h)

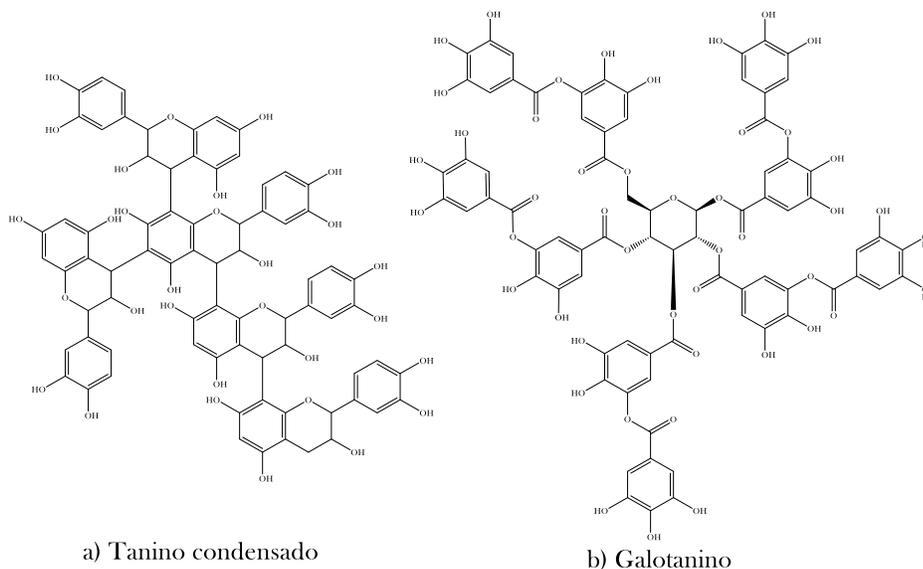


Figura 2.4 Taninos condensados (a) y taninos hidrolizados (b) presentes en el sorgo

Las variedades de sorgo negro y marrón presentan alta capacidad antioxidante, mostrando niveles mayores a los encontrados en arándanos, fresas y uvas mediante evaluación por el método de Capacidad de Absorción de Radicales de Oxígeno (“ORAC” por sus siglas en inglés) (Althwab et al., 2015).



Diversos estudios muestran que los CF presentes en el sorgo activan enzimas antioxidantes endógenas y enzimas detoxificantes como quinona oxidoreductasa y glutatión reductasa, presentando efectos antiinflamatorios y anticancerígenos (Tabla 2.3). Esta última es atribuida principalmente a la presencia de 3-DXA. Se sabe que el sorgo rojo y negro son las únicas fuentes naturales de este compuesto (Althwab et al., 2015; Awika, 2011).

Tabla 2.3 Estudios realizados en compuestos fenólicos contenidos en sorgo evaluado como agente antiinflamatorio y anticancerígeno

Compuesto	Efecto	Estudio
Apigenina	Supresión de la producción de COX-2 por la inhibición de la NF-κB en macrófagos activados por lipopolisacáridos (LPS).	Burdette, (2007)
Ácido ferúlico	Inhibición de la producción de TNF-α.	
Ácido gálico y derivados del ácido ferúlico	Disminución de la actividad de la enzima COX-2 en macrófagos activados por LPS.	
3-DXA (apigenidina y luteolinidina)	Inhibición del crecimiento de células cancerígenas en líneas celulares de leucemia HL-60 y hepatoma HepG2.	Shih et al. (2007)
	Promoción de la producción de quinona oxidoreductasa en las células de hepatoma en ratón, relacionándose con la actividad quimiopreventiva al mejorar las enzimas detoxificantes de la Fase II.	Yang, L., Browning, Jimmy D., Awika, (2009)
	Reducción del 15.91 % en la proliferación de células cáncer de mama humano (MCF7) tratadas con 3-DXA. Promovió la apoptosis por la activación del gen p57 y la regulación del gen Bcl-2	Suganyadevi et al. (2013)
Extractos fenólicos del salvado de sorgo negro	Reducción en la expresión de las citocinas proinflamatorias IL-1β y TNF-α, en un 30% y 87%, respectivamente, al usar extractos diluidos 1:100.	Burdette et al. (2010)
Fraciones acuosas y no acuosas de sorgo bicolor (SBL) africano con altos niveles de antocianinas.	Reducción de los niveles de ROS en dosis altas y una migración celular reducida al exponerse al quimiotáctico inflamatorio leucotrieno B4.	Benson et al. (2013)
Extractos fenólicos de granos de sorgo gelatinoso dorado (ESG)	Mostró que el edema activado inflamatorio se inhibió después de la administración de ESG, mediante la inhibición de los mediadores inflamatorios COX-2 e iNOS.	Shim et al. (2013)
Taninos (proantocianidina)	Inhibió la actividad del melanocito y redujo la formación de células de melanomas en el colon.	Althwab et al. (2015)



<b>Extractos de cascarilla de sorgo (ECS) tratada por extrusión 180°C con 24 % de humedad.</b>	Se encontró que tanto ECS extrudida y no extrudida reducían la producción de óxido nítrico (ON) en macrófagos, con un EC <sub>50</sub> de 5.23 mg/mL y 6.23 mg/mL, respectivamente.	Salazar Lopez et al. (2016)
<b>Flavonoides de sorgo en combinación con flavonoides de frijol blanco</b>	Mostró una fuerte respuesta antiinflamatoria sinérgica en los colonocitos no malignos estimulados por LPS, probablemente al actuar como mecanismos interdependientes	Agah et al. (2017)

En la Tabla 2.4 se presenta una recopilación de los estudios realizados en sorgo sobre el efecto hipoglucémico de los CF.

Tabla 2.4 Propiedades hipoglucémicas asociadas a compuestos fenólicos en sorgo

Compuesto	Efecto	Estudio
<b>Extractos fenólicos (EFS)</b>	Disminuyó la glucosa sérica y aumentó los niveles de insulina sérica en ratas diabéticas después de la administración de 250 mg/kg peso corporal de EFS suspendidos en goma arábiga con solución salina por vía oral a través de tubos orogástricos.	Chung et al. (2011)
<b>Flavonoides y 3-DXA</b>	Inhibió la acción de la $\alpha$ -amilasa en un 91.1 %.	Hargrove et al. (2011)
<b>Extractos fenólicos (EFS) rico en taninos</b>	La administración oral de EFS redujo el nivel de glucosa en sangre por la inhibición hepática de la gluconeogénesis mediante la supresión de la expresión tanto de PEPCK como p38 y aumentó en la expresión AMPK en ratas diabéticas.	Kim y Park, (2012)
<b>Taninos</b>	Reducción del 27.7 % en el índice glucémico estimado en papillas adicionadas con EFS respecto a las elaboradas íntegramente de almidón de maíz.	Lemlioglu-Austin et al. (2012)
<b>Extractos fenólicos (EFS)</b>	Se demostró que los EFS poseen un efecto aparentemente antidiabético y efectos terapéuticos a través de la sobre expresión de PPAR- $\gamma$ en ratones con dieta alta en grasa.	Park et al. (2012)

### 2.1.2 Almidón

El almidón es el componente mayoritario del sorgo, representando aproximadamente el 80 % del grano entero y se constituye principalmente por amilosa (20 - 30%) y amilopectina (70 - 80 %) (Zhu, 2014). En la Figura 2.5 se muestran las estructuras características de estos polímeros.

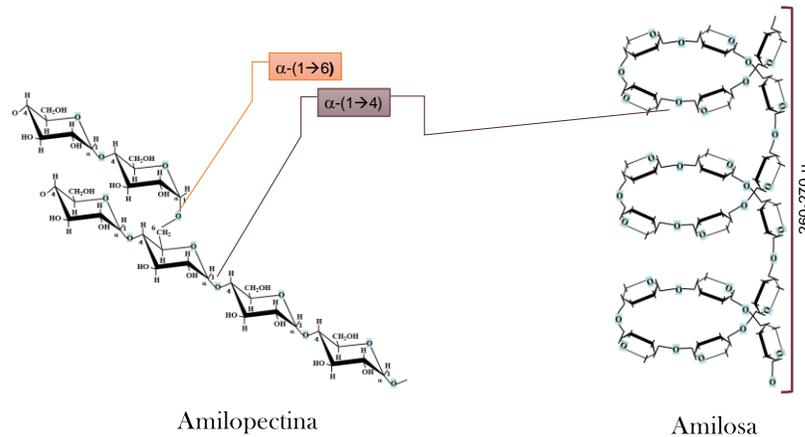


Figura 2.5 Estructura química de la amilopectina y la amilosa

Fuente: adaptado de [Zhu \(2014\)](#).

La amilosa y la amilopectina difieren en sus características, las cuales se resumen en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Características de la amilosa y amilopectina en almidón de sorgo

Característica	Amilopectina	Amilosa
Tipo de estructura	Cadenas lineales con uniones $\alpha$ (1-4) de D-glucosa, con ramificaciones $\alpha$ (1 $\rightarrow$ 6) (6 - 5%)	Lineal, conformada por D-glucopiranosas elongadas por uniones $\alpha$ (1 $\rightarrow$ 4), con mínimas ramificaciones $\alpha$ (1-6).
Grado de polimerización (DP)	8900 - 12600	1150 - 1390
Afinidad con el yodo	0.06 a 0.19 (color rojo)	1.3 a 1.5 (color azul)
Peso molecular (Da)	$2.9 \times 10^8$ a $3.2 \times 10^8$	$6.4 \times 10^6$ a $11 \times 10^6$
Longitud de cadena	20 - 21 D-glucosa por cada sección (DP).	260 a 270 u

Fuente: ([Martínez et al., 2016](#); [Zhu, 2014](#))

La amilosa y la amilopectina se encuentran encapsuladas en cuerpos semi esféricos denominados gránulos y son el principal constituyente de la estructura del almidón (Figura 2.6) ([Kaufman et al., 2017](#)). Los gránulos pequeños (<10  $\mu$ m) se ubican en el endospermo corneo y los grandes (>10  $\mu$ m) en el endospermo harinoso. Su forma es esférica y poligonal con algunas formaciones dentadas y poros en la superficie ([Zhu, 2014](#)). Las cadenas de amilopectina exteriores interaccionan con las moléculas de agua formando una estructura de doble hélice cristalizada mayoritariamente; las estructuras



cristalinas se originan por el empaquetamiento de la amilopectina en conjuntos hexagonales organizados en espirales helicoidales (Zhu, 2014).

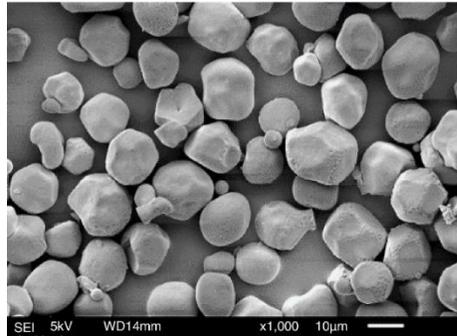


Figura 2.6 Micrografía de los gránulos de almidón de sorgo

Fuente: Silva *et al.* (2018)

Mayoritariamente el gránulo se encuentra compuesto por  $\alpha$ -1,4 glucanos ligeramente ramificado con enlaces  $\alpha$ -1,6 ubicados de manera paralela favoreciendo la formación de una doble hélice. Estos acomodos generan un orden específico, dando lugar a regiones conocidas como láminas amorfas (regiones de ramificación) y láminas semi-cristalinas (cadenas estrictamente lineales); la interacción de estas dos regiones forma anillos de crecimiento altamente ordenados y poco solubles, como se puede apreciar en la Figura 2.7 (O'Neill y Field, 2015).

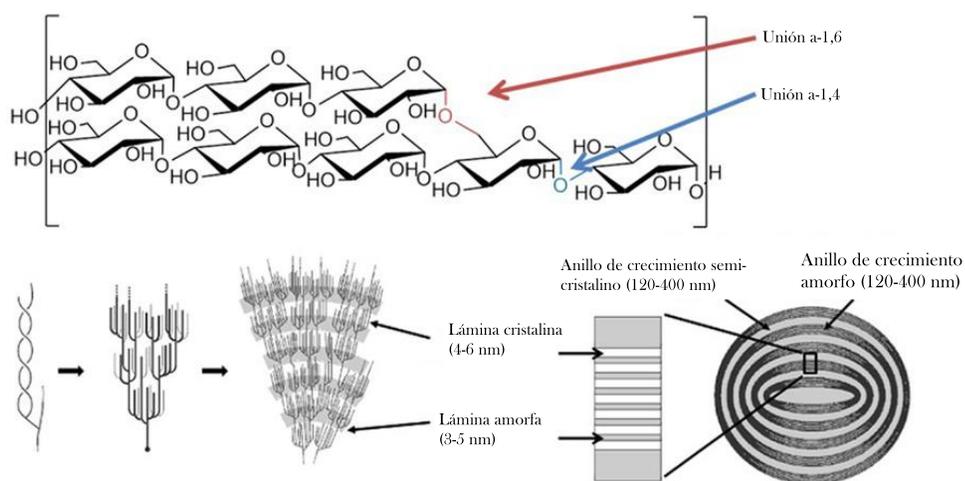


Figura 2.7 Organización y disposición de la amilosa y amilopectina en los gránulos de almidón. Fuente: imagen modificada de Coultate (2002).



Los cristales de almidón presentan tres estructuras dependiendo de la fuente: Tipo A: estructura estrecha y compacta con moléculas de agua entre cada estructura helicoidal (característico de los cereales), Tipo B: es más abierto y con mayor abundancia de agua intramolecular (cavidades centrales), rodeada por seis dobles hélices (característico de la papa, amilo-maíz, caña y almidón retrogradado) y Tipo C: una mezcla de A y B (característico de las legumbres) (Carballo Cuevas, 2017). El sorgo presenta un porcentaje de cristalinidad del 22 a 28.9 % (dependiendo del método empleado), con arreglos tipo A fácilmente identificados por difracción de rayos X de ángulo amplio (Zhu, 2014).

### 2.1.3 Almidón resistente

El almidón resistente (AR) es la fracción del almidón que tiene la capacidad de resistir la digestión enzimática en el intestino delgado (Rao et al., 2017) y es fermentada por la microbiota intestinal en el colon (Althwab et al., 2015). El AR es considerado como una sustancia saludable para las bacterias que habitan en el intestino grueso, como *bifidobacterias* y *lactobacillus*.

De acuerdo con lo reportado por Rao et al. (2017) y Raigond et al. (2015), el almidón resistente (AR) puede clasificarse en cinco tipos:

- **AR tipo 1:** presenta barreras físicas que impiden que las enzimas accedan y digieran el almidón, forma parte de las paredes celulares de los granos y presenta una estabilidad térmica.
- **AR tipo 2:** es digerido parcialmente por los complejos enzimáticos, como resultado de la estructura granular del almidón.
- **AR tipo 3:** es resultado de la retrogradación del almidón tras un proceso de calentamiento y enfriamiento del almidón, por acción de la reorganización de la amilosa a una forma cristalina no digerible.
- **AR tipo 4:** son almidones modificados químicamente empleando procesos de eterización, esterificación o formación de enlaces cruzados con otros compuestos químicos con el fin de disminuir su digestibilidad.



- **AR tipo 5:** es resultado de la formación de complejos de amilosa durante el procesamiento de los alimentos y puede ser obtenido bajo condiciones controladas.

Teixeira *et al.* (2016) reportaron valores de hasta 65 g AR/100 g harina base seca, en función de la variedad. Como se puede apreciar, el sorgo puede considerarse como una fuente valiosa de almidón resistente, por lo que se esperaría que su consumo pueda potenciar la microbiota intestinal benéfica. Sin embargo, se necesitan estudios clínicos en humanos para confirmar esta hipótesis (Althwab *et al.*, 2015). Shen *et al.* (2015) reportaron un incremento en la síntesis y secreción de leptina y adiponectina en ratas obesas alimentadas con AR de sorgo. El estudio mostró un aumento en el número de *Lactobacillus* y *Bifidobacteria*, y una disminución en *E. coli* en comparación con el grupo control. El grupo que consumió AR mostró una disminución en los triacilglicéridos en sangre, lo cual podría evitar complicaciones asociadas con la obesidad. Este estudio muestra al AR de sorgo como un alimento que contribuye a la mejorar el trastorno del metabolismo lipídico, modular la microbiota, y con un uso potencial para la prevención y el tratamiento de la obesidad.

Como se puede apreciar, las características fisicoquímicas, nutricionales y funcionales del sorgo son muy diversas y son dependientes de la variedad, época de cultivo y región en la que este es cultivado. Por lo anterior, en este capítulo se evaluaron las características fisicoquímicas, estructurales y nutracéuticas de variedades mexicanas de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), enfocado al cumplimiento del primer objetivo específico.



## 2.2 Materiales y métodos

### 2.2.2 Material biológico

Se emplearon 8 variedades mexicanas de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) cosechadas en 2019, las cuales se muestran en la Tabla 2.6, así como las principales características de estas.

Tabla 2.6 Variedades de sorgo empleadas en este estudio

Variedad	Color de testa	Clasificación	Proveedor
81g67	Rojo	Alto en taninos	DuPont Pioneer
82g93	Rojo	Bajo en taninos	DuPont Pioneer
82g34	Rojo	Bajo en taninos	DuPont Pioneer
8133	Rojo	Bajo en taninos	DuPont Pioneer
85p20	Rojo	Libre de taninos	DuPont Pioneer
82w21	Blanco	Bajo en taninos	DuPont Pioneer
Paloma	Blanco	Libre de taninos	INIFAP (Tamaulipas)
Primavera	Blanco	Libre de taninos	Pénjamo, Gto.

### 2.2.3 Métodos

#### 2.2.3.1 Limpieza y remoción del tratamiento del grano

Los sorgos se limpiaron con ayuda de una malla metálica con una abertura 2000  $\mu\text{m}$  (malla 10), con la finalidad de eliminar sorgo dañado, basura y cualquier tipo de contaminación física. Se realizó una selección manual separando granos en mal estado (podridos o manchados), granos dañados (brotados, calcinados, con carbón, helados, ardidados, fermentados, etc.), presencias de materias extrañas y sorgos no graníferos (Cabrera-Ramírez, 2015). Los sorgos se dejaron 24 h al sol directo, protegidos con una malla, posteriormente se aplicaron 3 lavados con solución de hipoclorito de sodio al 1 % para remover el remanente del tratamiento. Finalmente se deshidrataron por 24 h a 45 °C.



## 2.2.3.2 Caracterización física del grano

### 2.2.3.2.1 Peso de mil granos, dimensiones y esfericidad

Para el peso de mil granos (PMG) se pesaron 100 granos y se multiplicaron por 10, esta medición se realizó por triplicado, ajustando en base seca. Con ayuda de un vernier se determinó el largo, ancho y grosor en 10 granos de cada variedad por triplicado, expresando los resultados en mm (Cabrera-Ramírez, 2015). Para la evaluación de la esfericidad del grano se siguió la metodología empleada por Ordoñez et al. (2012) con algunas modificaciones para expresarla en porcentaje.

### 2.2.3.2.2 Peso hectolítrico

Se utilizó un recipiente cilíndrico con capacidad de 50 mL, donde se colocaron los granos hasta que el espacio interior quedó ocupado en su totalidad por el sorgo, se rasó el recipiente y se pesaron los granos contenidos en éste. Se calculó la relación de kg de sorgo por hL en base seca, realizándose la prueba por triplicado (método 84-10, AACC, 2000).

### 2.2.3.2.3 Perfil de textura en grano

Para realizar el análisis de textura en los sorgos se utilizó un texturómetro marca Lloyd modelo TAPlus, se empleó una sonda cilíndrica (10 mm diámetro) con las siguientes condiciones: a una velocidad de cabezal de 2 mm/s, con una precarga de 0.5 N. Se colocó el grano de sorgo, el cual fue perforado con la sonda bajo las condiciones descritas, reportando como dureza la fuerza máxima al quiebre (N).

## 2.2.3.3 Caracterización proximal del grano

Cada una de las caracterizaciones se llevó a cabo siguiendo las metodologías de la AOAC (2002) en base seca. La humedad se determinó usando el método 925.09B, la proteína por medio del método de Kjeldahl (método 32.1.22), para el extracto etéreo se usó el método 30-10; para la cuantificación de cenizas el método 942.05. Los carbohidratos se calcularon por diferencias.



### 2.2.3.3.1 Fibra dietética total: fibra soluble e insoluble

Para la determinación de fibra soluble e insoluble se empleó la técnica descrita por Shiga et al. (2003).

#### 2.2.3.3.1.1 Fibra insoluble

En un matraz Erlenmeyer de 250 mL (protegido de la luz), se agregó 1 g de muestra molida (previamente desgrasada), 50 mL de buffer de fosfato 0.08 mM a pH 6 y 100  $\mu$ L de  $\alpha$ -amilasa concentrada (A3306 Sigma Aldrich). Consecutivamente se incubó a 94 °C por 30 min en baño María, con agitación continua. Posteriormente se atemperó y ajustó el pH a 7.5. Se adicionaron 100  $\mu$ L de proteasa (5 mg/mL), incubándose a 60 °C por 30 min con agitación continua. Nuevamente se atemperó y se ajustó el pH a 4, para adicionar 300  $\mu$ L de amiloglucosidasa e incubar 30 min a 60 °C con agitación continua. Después de efectuada la incubación se filtró con papel Whatman No. 4 (peso constante), se realizaron dos lavados con 15 mL de agua destilada a 60 °C y con 15 mL de etanol al 80%; el líquido residual del filtrado se conservó. El papel filtro se dejó secar a 60 °C por 24 h, registrándose el peso obtenido. La diferencia entre el peso del papel filtro se adjudicó como la fracción de fibra insoluble.

#### 2.2.3.3.1.2 Fibra soluble

Al líquido residual obtenido en la fibra insoluble se le adicionó un volumen igual de etanol al 80 % y se dejó reposar por 24 h a 4°C. Transcurrido el tiempo se filtró en papel Whatman No. 42 previamente pesado, realizado dos lavados con 15 mL de etanol al 80 % y 2 con 15 mL de acetona. Posteriormente, se dejó secar el papel filtro durante 24 h a 60 °C, registrando el peso final. La diferencia de pesos se interpretó como la fracción de fibra soluble.

### 2.2.3.3.2 Almidón resistente

Para la determinación de almidón resistente se siguió la técnica certificada por la AOAC, (2002) (método 2002.02) y AACC (2001) (método 32-40.01), mediante el kit enzimático K-RSTAR adquirido de Megazyme International Irlanda, siguiendo las instrucciones proporcionadas. Brevemente, la hidrólisis del almidón no resistente



(ANR) se llevó a cabo por la acción simultánea de  $\alpha$ -amilasa pancreática (10 mg/mL) y amiloglucosidasa (3 U/mL) incubadas por 16 h a 37 °C con agitación constante. Posteriormente, el ANR fue separado por centrifugación (3000 rpm, 10min), el pellet obtenido se purificó con etanol (50 %, 99 %) y se solubilizó con 2 mol/L de KOH. La concentración del AR se determinó a 510 nm y la concentración se expresó como mg/100mg de harina de sorgo en base seca.

#### 2.2.3.4 Caracterización del almidón nativo

##### 2.2.3.4.1 Evaluación de la microestructura mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM)

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca Phenom Pro (Phenom World BV, The Netherlands) acondicionado para trabajar en módulo de bajo vacío, con el haz de electrones ajustado a 5 kV. Las imágenes se adquirieron a 300, 500 y 1500x con un detector BSD. Los granos se fracturaron en dos partes y se adecuaron para que las muestras estuvieran con la misma altura, para colocarse en una cinta de carbón conductora de doble cara y posteriormente ser colocadas en una placa de aluminio para su lectura. Con ayuda del software de análisis de imágenes ImageJ 1.52<sup>a</sup> se realizó la medición del tamaño de gránulo de 30 mediciones por triplicado en cada variedad para determinar el tipo de distribución, el tamaño medio por modal y la proporción de estos.

##### 2.2.3.4.2 Evaluación de las propiedades de pasta

Se utilizó el método descrito por Ménera-López et al. (2013) con algunas modificaciones. Se utilizó el reómetro (Anton Paar Physica Modelo MCR-101, Austria). Se colocaron 3 g (base seca) de muestra (molida y tamizada 250  $\mu$ m) con 18 mL de agua destilada. Se usó una rampa de temperatura de 50 a 92 °C, se mantuvo por 5 min a la temperatura de 92 °C y se enfrió a 50 °C, empleando una velocidad de calentamiento-enfriamiento de 5.6 °C/min. Durante el método se mantuvo constante la agitación a 196 rpm.



#### 2.2.3.4.3 Evaluación de las propiedades térmicas mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Se llevó a cabo utilizando un calorímetro diferencial de barrido (DSC Stare system Mettler Toledo), con una rampa de calentamiento de 30 a 135 °C y una velocidad de calentamiento de 10 °C/ min. Se colocaron 3 mg  $\pm$  0.1 de muestra en crisoles de aluminio estándar de 40  $\mu$ L, se agregaron 7 $\mu$ L de agua y la cápsula se selló y se realizó la medición (Bustos Vázquez, et al., 2010).

#### 2.2.3.4.4 Difracción de rayos X

El almidón fue empaquetado en crisoles de vidrio rectangulares, los cuales se expusieron a un haz de rayos X generado por un difractor de rayos X (marca Rigaku modelo Ultima IV, Texas-EE. UU.) con un detector D/tex ultra, operado a 35 kV y 15 mA, con radiación filtrada de  $\text{CuK}\alpha_1$  ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ). El rango de exploración para  $2\theta$  se ajustó a 6-45 ° para cubrir todos los picos de difracción significativos de los cristales de muestra con una velocidad de exploración de 3°/min y un tamaño de paso de 0.02° (Cervantes-Ramírez et al., 2020).

#### 2.2.3.4.5 Evaluación de los grupos funcionales mediante la espectroscopia de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR)

Se siguió la metodología descrita por Cervantes-Ramírez et al. (2020), el espectro se obtuvo usando espectrómetro Perkin Elmer IR (modelo Spectrum Two, Waltham-EE. UU.) con ATR (*Attenuated Total Reflectance*), con resolución de 32 escaneos a 2  $\text{cm}^{-1}$ . El espectro se colectó entre rango de frecuencia de 4000-600  $\text{cm}^{-1}$ .

### 2.2.4 Análisis estadístico

Se realizó un ANOVA con comparaciones de medias por la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ) en el software estadístico Minitab 18. Para determinar las relaciones entre las variables estudiadas se realizó una prueba de correlación de Pearson.



## 2.3 Resultados y discusiones

### 2.3.2 Caracterización física de las variedades

Se realizó la caracterización física de las ocho variedades de sorgo, la cual se muestra en la Tabla 2.7. No se observaron diferencias significativas entre variedades respecto al peso hectolítrico, obteniéndose un rango que va de los 79 a los 89 kg/hL, quedando considerándose como sorgos de primera acorde a la [NMX-FF-037-1994, \(1994\)](#). Los resultados obtenidos se encuentran cercanos a los 79.36 kg/hL reportados por [Llopart y Drago \(2016\)](#) y por encima de lo reportado por [Chavan et al. \(2016\)](#), cuyos valores van de 68.6 a 79.4 kg/hL. El peso hectolítrico o densidad aparente es un parámetro de calidad que permite determinar el valor del grano en el mercado, ya que influye sobre el rendimiento de harina ([Butrón et al., 2015](#)).

Las variedades no mostraron diferencias estadísticas respecto al peso de mil granos, presentando un valor promedio de  $32.84 \pm 2.79$  g. Otro indicador importante de la calidad del grano, pero menos reportado es el peso de mil granos (PMG), el cual es un indicativo del llenado del grano y de su rendimiento durante la obtención de harina. Los resultados obtenidos son superiores a los reportados por [Cabrera-Ramírez, \(2015\)](#) para sorgo rojo y blanco, con un rango de 23 al 28 g para PMG.

Un parámetro importante para la calidad del grano y su destino en la industria es la dureza, este parámetro indica indirectamente la relación del endospermo harinoso y el vítreo ([Narváez González et al., 2007](#)). Las variedades mostraron diferencias significativas en la dureza, siendo la variedad blanca 82w21 la más dura con  $84.4 \pm 5.3$  N y la variedad roja 32g34 la más suave con  $60.5 \pm 5.4$  N. Es importante mencionar que una baja dureza puede indicar una mayor proporción de endospermo harinoso y la presencia de gránulos de mayor tamaño ([Narváez González et al., 2007](#)).

[García-Lara et al. \(2004\)](#) muestran que existe una correlación positiva entre la dureza del grano y la presencia de ácidos fenólicos, específicamente los ácidos diferúlicos (5,5'-DiFA, 8-O-4'-DiFA, 8,5'-DiFA y los ácidos diferúlicos totales). Esta relación puede ser explicada por un lado a la capacidad de estos compuestos para formar



enlaces cruzados con algunos compuestos presentes en las paredes celulares del gránulo; por otro lado, de manera simultánea estos compuestos y sus oligómeros son capaces de formar uniones éster-eter con polisacáridos no almidonados como los arabinosilanos y la lignina, respectivamente (Chiremba et al., 2012).

Tabla 2.7 Caracterización física del grano

Variedad	Peso hectolítrico (kg/hL)*	Peso de mil granos (g)*	Dureza (N)	Largo (mm)	Alto (mm)	Ancho (mm)	Esfericidad (%)
<b>Sorgos rojos</b>							
81g67	84.6 ± 0.01 <sup>a</sup>	33.5 ± 1.7 <sup>ab</sup>	73.2 ± 1.0 <sup>abc</sup>	4.1 ± 0.3 <sup>a</sup>	3.1 ± 0.1 <sup>cd</sup>	2.3 ± 0.1 <sup>a</sup>	74 ± 2 <sup>a</sup>
82g93	88.1 ± 3.7 <sup>a</sup>	33.2 ± 1.4 <sup>ab</sup>	83.1 ± 8.8 <sup>ab</sup>	4.5 ± 0.5 <sup>a</sup>	3.8 ± 0.2 <sup>ab</sup>	2.3 ± 0.3 <sup>a</sup>	76 ± 5 <sup>a</sup>
82g34	87.6 ± 0.1 <sup>a</sup>	31.6 ± 1.1 <sup>ab</sup>	60.5 ± 5.4 <sup>c</sup>	4.1 ± 0.1 <sup>a</sup>	2.8 ± 0.3 <sup>d</sup>	2.2 ± 0.3 <sup>a</sup>	72 ± 5 <sup>a</sup>
8133	84.9 ± 5.8 <sup>a</sup>	36.5 ± 3.8 <sup>a</sup>	68.2 ± 5.7 <sup>bc</sup>	4.2 ± 0.8 <sup>a</sup>	3.6 ± 0.4 <sup>abc</sup>	2.8 ± 0.7 <sup>a</sup>	85 ± 17 <sup>a</sup>
85p20	86.3 ± 2.3 <sup>a</sup>	36.8 ± 1.6 <sup>a</sup>	70.9 ± 7.8 <sup>abc</sup>	4.8 ± 0.6 <sup>a</sup>	4.1 ± 0.2 <sup>a</sup>	2.5 ± 0.0 <sup>a</sup>	77 ± 6 <sup>a</sup>
<b>Sorgos blancos</b>							
82w21	79.8 ± 3.2 <sup>a</sup>	32.0 ± 1.6 <sup>ab</sup>	84.4 ± 5.3 <sup>a</sup>	4.4 ± 0.5 <sup>a</sup>	3.4 ± 0.1 <sup>bcd</sup>	2.2 ± 0.3 <sup>a</sup>	73 ± 8 <sup>a</sup>
Paloma	88.7 ± 3.5 <sup>a</sup>	29.0 ± 2.6 <sup>b</sup>	66.4 ± 2.4 <sup>c</sup>	4.1 ± 0.1 <sup>a</sup>	3.7 ± 0.2 <sup>abc</sup>	2.2 ± 0.2 <sup>a</sup>	79 ± 2 <sup>a</sup>
Primavera	82.4 ± 3.2 <sup>a</sup>	30.1 ± 1.1 <sup>b</sup>	68.2 ± 5.4 <sup>abc</sup>	3.9 ± 0.1 <sup>a</sup>	3.6 ± 0.2 <sup>abc</sup>	2.1 ± 0.2 <sup>a</sup>	79 ± 5 <sup>a</sup>

Se muestra la media ± desviación estándar de tres mediciones independientes. Letras diferentes por columna indican diferencias estadísticas entre variedades. \*: base seca.

Para las dimensiones del grano, no se observaron diferencias en el largo y ancho de las variedades (Tabla 2.7), con una media de 4.3 ± 0.3 mm y 2.3 ± 0.2 mm, respectivamente. Por otro lado, la altura de los granos mostró ser diferente entre las variedades, siendo los granos más altos los de la variedad 85p20 con una media de 4.1 ± 0.2 mm, mientras que los de menor altura fueron los de la variedad roja 32g34 con una media de 2.8 ± 0.3 mm.

Inherentemente, las características físicas del grano determinarán las propiedades de expansión de los sorgos ya que el alto, ancho y grueso se han reportado estar correlacionados negativamente con el volumen de expandido (Mishra et al., 2014; Pordesimo et al., 1990); en el mismo sentido, altos volúmenes de expansión se han atribuido a granos de tamaño medio a pequeño. Cabe destacar que las características físicas del grano como el tamaño, forma y densidad afectan directamente el volumen de expansión (Mishra et al., 2014). Por otro lado, la esfericidad de los granos no fue



significativamente diferente entre variedades, quedando en un rango entre 72 y 85 %. [Pordesimo et al. \(1990\)](#) reportaron que, en el caso de maíz, granos con esfericidad superiores al 70 % presentaron las mejores características de explotado. Tomando esta premisa se esperaría tener buenas características de explotado en los sorgos empleados en este estudio, ya que todos superan este porcentaje. El peso hectolítrico y la esfericidad del grano son factores que se han correlacionado positivamente con el volumen de expansión en el caso del maíz, de tal manera que entre más esférico y mayor peso hectolítrico posea el grano mayor será el volumen de expansión de éste ([Pordesimo et al., 1990](#)).

### 2.3.3 Caracterización proximal

En la Tabla 2.8 se muestran los resultados de la caracterización proximal de las variedades de sorgo cruda.

Tabla 2.8 Caracterización proximal de los sorgos crudos

Variedad	Humedad (%)	Ceniza (%) <sup>*</sup>	Lípidos (%) <sup>*</sup>	Proteína (%) <sup>*</sup>	Carbohidratos (%) <sup>*</sup>
<b>Sorgos rojos</b>					
81g67	7.1 ± 0.46 <sup>b</sup>	1.24 ± 1.00 <sup>c</sup>	6.17 ± 0.03 <sup>a</sup>	10.30 ± 0.20 <sup>bc</sup>	75.20 ± 0.47 <sup>bc</sup>
82g93	6.9 ± 0.09 <sup>bc</sup>	1.50 ± 0.04 <sup>bc</sup>	5.33 ± 0.27 <sup>ab</sup>	11.28 ± 0.54 <sup>abc</sup>	74.98 ± 0.60 <sup>c</sup>
82g34	7.0 ± 0.09 <sup>b</sup>	1.67 ± 0.13 <sup>bc</sup>	1.71 ± 0.07 <sup>d</sup>	10.54 ± 0.22 <sup>bc</sup>	79.07 ± 0.33 <sup>a</sup>
8133	6.8 ± 0.03 <sup>bc</sup>	1.70 ± 0.17 <sup>bc</sup>	1.62 ± 0.34 <sup>d</sup>	12.48 ± 1.54 <sup>a</sup>	77.46 ± 1.54 <sup>ab</sup>
85p20	6.7 ± 0.09 <sup>bc</sup>	1.74 ± 0.12 <sup>bc</sup>	3.32 ± 0.14 <sup>c</sup>	9.82 ± 0.07 <sup>c</sup>	78.40 ± 0.29 <sup>a</sup>
<b>Sorgos blancos</b>					
82w21	6.4 ± 0.32 <sup>c</sup>	1.51 ± 0.06 <sup>bc</sup>	4.13 ± 1.21 <sup>bc</sup>	11.15 ± 0.10 <sup>abc</sup>	76.85 ± 1.41 <sup>abc</sup>
Paloma	11.7 ± 0.05 <sup>a</sup>	3.06 ± 0.41 <sup>a</sup>	1.48 ± 0.09 <sup>d</sup>	11.85 ± 0.01 <sup>ab</sup>	71.87 ± 0.41 <sup>d</sup>
Primavera	11.2 ± 0.09 <sup>a</sup>	2.56 ± 0.06 <sup>ab</sup>	4.96 ± 0.27 <sup>ab</sup>	10.00 ± 0.01 <sup>4c</sup>	71.33 ± 0.42 <sup>d</sup>

Se muestra la media ± DE de tres experimentos independientes. Letras diferentes por columna indican diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) en el parámetro evaluado. <sup>\*</sup>base seca.

Las variedades de sorgo blanco “Paloma” y “Primavera” presentaron el mayor porcentaje de humedad con  $11.73 \pm 0.05$  % y  $11.15 \pm 0.09$  %, respectivamente, mientras que las otras variedades presentaron un rango de humedad del 6.4 al 7.1 %. De acuerdo con el [CODEX, \(1995\)](#), los valores de humedad en cereales para el consumo no debe superar el 15.5 %, mientras que la [NMX-FF-037-1994](#) establece un 14 % de humedad



máximo para el sorgo, por lo que los sorgos empleados en este estudio se encuentran por debajo del porcentaje de humedad, lo que indica que una baja posibilidad de crecimiento de hongos por lo que se podrán conservar en buenas condiciones por un periodo más prolongado. Los datos se encuentran dentro de los rangos de humedad reportados para sorgos (10 - 15 %) por [Da Silva y Taylor, \(2004\)](#), [Gaytán-Martínez et al. \(2017\)](#) y [Nirmal et al. \(2017\)](#). [Gökmen, \(2004\)](#) mostró que la humedad tiene una correlación curvilínea con el volumen de expandido en maíz, de tal manera que con un 14 % de humedad en el grano se obtendrían los mejores rendimientos, lo cual está en concordancia con los rangos de 12 - 15 % de humedad reportados como óptimos para el expandido en diversos cereales ([Bianchini y Beléia, 2010](#); [Mir et al., 2016](#); [Srdić et al., 2015](#)).

Para el contenido de cenizas la variedad que mostró el menor contenido fue el sorgo rojo 81g67 con una media de  $1.24 \pm 1$  %, mientras que la variedad paloma presentó el mayor contenido con  $3.06 \pm 0.41$  %, los valores se encuentran cercanos a los rangos reportados que van del 1.88 al 2.28 % ([Da Silva y Taylor, 2004](#); [Ratnavathi y Komala, 2016](#)). [Llopart y Drago \(2016\)](#) reportaron los mayores contenidos de cenizas en el sorgo blanco, lo cual está en concordancia con los datos obtenidos en este trabajo.

La variedad con el mayor contenido de lípidos fue 81g67 con  $6.17 \pm 0.03$  % mientras que la variedad paloma presentó el menor contenido con  $1.48 \pm 0.09$  %. Los rangos reportados en el contenido de lípidos para el sorgo van del 1.5 al 4.73 % encontrándose dentro de los rangos reportados, con excepción de la variedad 81g67 la cual se encuentra cerca del 2 % por encima ([Da Silva y Taylor, 2004](#); [Espinosa-Ramírez y Serna-Saldívar, 2016](#); [Gaytán-Martínez et al., 2017](#)). Después de la evaluación de diversos híbridos de maíz palomero, [Park et al. \(2000\)](#) mostró que el contenido de lípidos en éstos se encontraba del 3 al 4 % .

El contenido de lípidos en el sorgo se encuentra distribuido en los componentes estructurales del grano principalmente en el germen 76.2 %, endospermo 13.2 % y pericarpio 10.6 % ([Althwab et al., 2015](#)). El perfil de lípidos del sorgo está constituido por ceras y aceites (relación 2:1 - 3:1) donde el 90 % de la fracción de aceite está



compuesto por ácido linoleico, oleico y palmítico. Comparado con el maíz, el sorgo posee un mayor contenido de ácido oleico, esteárico y menor porcentaje de ácido linoleico, mirístico y palmitoleico, lo que lo hace un aceite menos saturado (Althwab et al., 2015). Este parámetro resulta de interés, ya que puede ser uno de los precursores de la formación de almidón resistente tipo 5 mediante el procesamiento térmico (Putseys et al., 2010).

Los sorgos presentaron un contenido de proteína que osciló del 9.82 al 12.48 %, siendo la variedad 85p20 la que presentó el menor contenido con una media de  $9.82 \pm 0.07$  %. Por el contrario, la variedad 8133 mostró el mayor contenido, con una media de  $12.48 \pm 1.54$  %. Se ha reportado que la relación del contenido de proteína en el endospermo harinoso y el endospermo vítreo puede afectar la capacidad de expandido del grano en el caso del maíz, específicamente se correlaciona positivamente el volumen de expansión con el contenido de  $\alpha$ -zeína y el contenido de glutelinas (Borras et al., 2006). Se ha reportado que diversas variedades de maíz palomero poseen contenidos de proteína entre 8 y 10 % (Park et al., 2000; Sweley et al., 2013).

Para el contenido de carbohidratos, la variedad primavera mostró el valor más bajo con  $71.33 \pm 0.42$  % mientras que la variedad de sorgo rojo 32g34 presentó el mayor contenido del conjunto con  $79.07 \pm 0.33$  %. Estos datos se encuentran en concordancia con los rangos reportados en la literatura (del 68 al 80 %) para variedades de sorgo tanto blancas como rojas (Espinosa-Ramírez y Serna-Saldívar, 2016; Nirmal et al., 2017; Ratnavathi y Komala, 2016). El contenido de carbohidratos resulta ser un indicador para la obtención de un buen expandido, ya que la expansión es resultado de la abrupta liberación del endospermo tras la ruptura del pericarpio por la alta presión (Mishra et al., 2014). En el caso de maíz palomero se han reportado contenidos de carbohidratos que van desde el 61 hasta 67 % (Park et al., 2000; Sweley et al., 2013).



Tabla 2.9 Contenido de fibra dietaria total (soluble e insoluble) y almidón resistente en los sorgos crudos

Variedad	Fibra total (%)*	Fibra insoluble (%)*	Fibra soluble (%)*	Almidón resistente (mg/100 mg de almidón)*
<b>Sorgos rojos</b>				
81g67	13.81 ± 0.17 <sup>de</sup>	12.56 ± 0.18 <sup>e</sup>	1.25 ± 0.35 <sup>c</sup>	0.21 ± 0.01 <sup>d</sup>
82g93	12.88 ± 0.72 <sup>e</sup>	12.07 ± 0.69 <sup>e</sup>	0.81 ± 0.02 <sup>c</sup>	3.53 ± 0.03 <sup>b</sup>
82g34	16.94 ± 0.49 <sup>c</sup>	15.41 ± 0.45 <sup>c</sup>	1.52 ± 0.04 <sup>abc</sup>	0.54 ± 0.15 <sup>d</sup>
8133	15.23 ± 0.97 <sup>cd</sup>	14.04 ± 0.54 <sup>d</sup>	1.19 ± 0.43 <sup>c</sup>	2.74 ± 0.06 <sup>c</sup>
85p20	9.18 ± 0.37 <sup>f</sup>	8.04 ± 0.15 <sup>f</sup>	1.14 ± 0.22 <sup>c</sup>	2.67 ± 0.14 <sup>c</sup>
<b>Sorgos blancos</b>				
82w21	13.16 ± 0.94 <sup>e</sup>	11.78 ± 0.71 <sup>e</sup>	1.38 ± 0.23 <sup>bc</sup>	6.63 ± 0.12 <sup>a</sup>
Paloma	21.00 ± 0.04 <sup>a</sup>	18.83 ± 0.12 <sup>a</sup>	2.17 ± 0.15 <sup>a</sup>	2.37 ± 0.01 <sup>c</sup>
Primavera	18.79 ± 0.49 <sup>b</sup>	16.79 ± 0.19 <sup>b</sup>	2.00 ± 0.30 <sup>ab</sup>	3.33 ± 0.19 <sup>b</sup>

Se muestra la media ± DE de tres experimentos independientes. Letras diferentes por columna indican diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) en el parámetro evaluado. \* base seca.

Como se puede observar en la Tabla 2.9, el sorgo 85p20 presentó el menor contenido de fibra total con  $9.18 \pm 0.37$  %, mientras que la variedad paloma resultó poseer el mayor contenido, con  $21 \pm 0.04$  %. Mientras que para el contenido de fibra insoluble se observó la misma tendencia con  $8.04 \pm 0.15$  % y  $18.83 \pm 0.12$  % para el sorgo rojo 85p20 y el sorgo blanco Paloma, respectivamente. Por otro lado, el sorgo 82g93 presentó el menor contenido de fibra insoluble con  $0.81 \pm 0.02$  %, mientras que el sorgo Paloma se destacó por tener el mayor contenido de fibra soluble con  $2.17 \pm 0.15$  %. Los datos obtenidos en este estudio se encuentran muy cercanos a los reportados por Gaytán-Martínez et al. (2017), quienes encontraron valores del 16 al 17.7 % de fibra total. El contenido de fibra presente en la dieta es de vital importancia para el mantenimiento funcionamiento ideal del sistema gastrointestinal, recomendándose un consumo de 25-35 g/día, puesto que a la fibra dietaria se asocian diversos beneficios tales como la retención de aceites y agua, regulación del tránsito intestinal, reducción del estreñimiento, aumento de la frecuencia y cantidad de heces, generación de sensación de saciedad, entre otras (Matos-Chamorro y Chambilla-Mamani, 2010).



Por otro lado, se cuantificó el contenido de almidón resistente en los sorgos crudos, el cual puede ser asociado en mayor medida al AR1 y AR2. En ese sentido, se puede observar que la variedad de sorgo blanco 82w21 mostró el mayor contenido de AR de todo el conjunto con una media de  $6.63 \pm 0.12$  mg/100 mg de almidón, mientras que los sorgos rojos 32g34 y 81g67 presentaron los valores más bajos con  $0.54 \pm 0.15$  y  $0.21 \pm 0.01$  mg/100 mg de almidón, respectivamente. Khan et al. (2013) reportaron contenidos de almidón resistente de 2.95 y 2.21 mg/100 mg de almidón para sorgo rojo y blanco, respectivamente. Por otro lado Lemlioglu-Austin et al. (2012) reportaron valores cercanos a 6.92 mg/100 mg de harina para sorgo rojo alto en taninos, mientras que Mkandawire et al. (2015) reportan valores de 8.52 mg/100 mg de harina para sorgo blanco. En un estudio comparativo de 49 variedades (diferentes colores de testa y orígenes) encontró que el contenido de almidón resistente osciló de 0.31 a 65.66 mg/100 mg de harina, donde los sorgos rojos y marrones tendían a mostrar los mayores contenidos (Teixeira et al., 2016), mostrando la tendencia contraria a los datos obtenidos en este estudio.

Los datos sugieren que la variedad de sorgo blanco Paloma presenta un mayor contenido de fibra dietaria total, acercándose a la proporción de fibra soluble/insoluble recomendadas para la ingesta diaria (1/3, soluble/insoluble). Así mismo, mostró un contenido de almidón resistente del 2.37 %, lo cual implicaría una menor disponibilidad de glucosa y menor índice glucémico después de su consumo. A pesar de que la variedad blanca 82w21 destacó con el mayor contenido de AR con un 6.63 %, el contenido de fibra dietaria total fue uno de los más bajos del conjunto, reduciendo significativamente la probabilidad de tener efectos benéficos asociados a la fibra después de su consumo.

### 2.3.4 Caracterización del perfil de viscosidad y propiedades térmicas

En la Tabla 2.10 se muestran los resultados del perfil de viscosidad en las harinas obtenidas de las diferentes variedades de sorgo (base seca). Se observa que la variedad blanca 82w21 presentó la mayor temperatura de pasta con 71.47 °C, mientras que la menor temperatura se encontró en la variedad primavera con 68.4 °C. Autores reportan temperaturas de pasta para diversos sorgo cercanas a los 71 °C (Marston et al., 2015,



2016), lo que concuerda con los valores encontrados en nuestro estudio. Los cambios en las temperaturas de pasta pueden estar asociados a la relación de amilosa y amilopectina, así como a la longitud de la cadena y los arreglos de estas dentro del gránulo. Se ha reportado que a mayores contenidos de amilopectina los almidones muestran temperaturas de pasta más bajas, donde se observó que el hinchamiento de los almidones comenzaba principalmente en la región amorfa (Hoyos-Leyva et al., 2017). Aunado a esto, los componentes presentes en la matriz del grano como proteínas, lípidos, y fibras pueden afectar significativamente las propiedades de pasta.

Tabla 2.10 Propiedades de pasta de las harinas obtenidas de los sorgos crudos

Variedad	T <sub>p</sub> (°C)	V <sub>Inicial</sub> (cP)	V <sub>Máxima</sub> (cP)	V <sub>Mínima</sub> (cP)	V <sub>Ruptura</sub> (cP)	V <sub>Final</sub> (cP)	V <sub>R</sub> (cP)
<b>Sorgos rojos</b>							
81g67	69.0 ± 0.3 <sup>de</sup>	13.8 ± 3.7 <sup>a</sup>	4761 ± 110 <sup>b</sup>	1682 ± 48 <sup>de</sup>	3080 ± 62 <sup>a</sup>	5394 ± 125 <sup>d</sup>	3713 ± 77 <sup>de</sup>
82g93	71.4 ± 0.7 <sup>ab</sup>	9.6 ± 0.2 <sup>b</sup>	4460 ± 198 <sup>bc</sup>	2213 ± 100 <sup>ab</sup>	2247 ± 98 <sup>bc</sup>	7134 ± 178 <sup>a</sup>	4920 ± 78 <sup>a</sup>
32g34	70.5 ± 0.4 <sup>bc</sup>	9.5 ± 0.3 <sup>b</sup>	4445 ± 1 <sup>bc</sup>	2471 ± 414 <sup>a</sup>	1974 ± 415 <sup>c</sup>	6615 ± 18 <sup>b</sup>	4144 ± 432 <sup>cd</sup>
8133	69.1 ± 0.2 <sup>de</sup>	9.4 ± 0.6 <sup>b</sup>	4639 ± 42 <sup>bc</sup>	1872 ± 5 <sup>bcd</sup>	2767 ± 46 <sup>ab</sup>	5854 ± 104 <sup>c</sup>	3982 ± 109 <sup>cde</sup>
85p20	69.8 ± 0.2 <sup>cd</sup>	9.1 ± 0.1 <sup>b</sup>	5254 ± 15 <sup>a</sup>	2138 ± 77 <sup>abc</sup>	3117 ± 92 <sup>a</sup>	6908 ± 28 <sup>a</sup>	4770 ± 49 <sup>ab</sup>
<b>Sorgos blancos</b>							
82w21	71.5 ± 0.1 <sup>a</sup>	8.8 ± 0.2 <sup>b</sup>	4345 ± 68 <sup>c</sup>	1982 ± 0.9 <sup>bcd</sup>	2363 ± 68 <sup>bc</sup>	6348 ± 81 <sup>b</sup>	4365 ± 82 <sup>bc</sup>
Paloma	70.0 ± 0.1 <sup>c</sup>	9.7 ± 0.4 <sup>b</sup>	2529 ± 176 <sup>d</sup>	1384 ± 46 <sup>e</sup>	1146 ± 222 <sup>d</sup>	4186 ± 50 <sup>e</sup>	2802 ± 96 <sup>f</sup>
Primavera	68.4 ± 0.3 <sup>e</sup>	9.4 ± 0.01 <sup>b</sup>	4796 ± 251 <sup>b</sup>	1741 ± 49 <sup>cde</sup>	3056 ± 203 <sup>a</sup>	5271 ± 94 <sup>d</sup>	3531 ± 45 <sup>e</sup>

Se muestra la media ± la desviación estándar de tres mediciones independientes (peso seco). Letras diferentes por columna indican diferencia estadística entre variedades en el mismo parámetro por la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). T<sub>p</sub>: Temperatura de pasting; V: Viscosidad; V<sub>R</sub>: viscosidad de retrogradación; V<sub>Ruptura</sub> = V<sub>Máxima</sub> - V<sub>Mínima</sub>; V<sub>Retrogradación</sub> = V<sub>Final</sub> - V<sub>Mínima</sub>; cP: centipoise.

Respecto a la viscosidad inicial, la variedad roja 81g67 presentó la mayor viscosidad con 13.8 ± 3.7 cP, mientras que el resto no mostró diferencias estadísticas entre ellos con una media de 9.2 ± 0.52 cP. Para la viscosidad máxima, la variedad roja 85p20 presentó la mayor viscosidad con 5254 ± 15 cP, mientras que la variedad blanca Paloma tuvo la menor viscosidad con 2529 ± 176 cP. Algunos autores reportan diversos valores en la viscosidad máxima de los sorgos crudos en función de la variedad, mostrando rangos que van desde 2809 hasta 5185 cP (Marston et al., 2015, 2016; Palavecino et al., 2016), donde nuestros datos se ubican dentro de estos rangos. Palavecino et al. (2016) reportaron una correlación positiva entre el contenido de



amilosa y la viscosidad máxima, donde a mayor contenido de amilosa mayor fue la viscosidad máxima, como resultado de la lixiviación de esta después del hinchamiento del gránulo de almidón. Sin embargo, se debe considerar que en el caso de las harinas estudiadas se trata de un sistema heterogéneo en que la presencia de fibra dietética y proteínas podría estar influenciando la viscosidad encontrada en las harinas.

Los valores de viscosidad mínima oscilaron entre 1384 y 2471 cP, siendo las variedades 32g34 y Paloma la mayor y la más baja, respectivamente. [Marston et al. \(2016, 2015\)](#) reportaron valores de viscosidad mínima en sorgos que van desde los 1860 a 2285 cP. La variedad roja 82g93 mostró la mayor viscosidad final con  $7134 \pm 178$  cP, mientras que la variedad blanca paloma presentó la menor con  $4186 \pm 50$  cP. [Marston et al. \(2016, 2015\)](#) y [Palavecino et al. \(2016\)](#) reportaron valores de viscosidad final que van de 3030 a 6034 cP, quedando la mayoría de las variedades estudiadas dentro de este rango, salvo la variedad 82g93 la cual está por encima de lo reportado.

En este estudio, la variedad roja 81g67 mostró la mayor viscosidad de ruptura  $3080 \pm 62$  cP, mientras que la variedad blanca Paloma presentó la menor viscosidad de ruptura con  $1146 \pm 222$  cP. Se han reportado valores de viscosidad de ruptura que van desde 1169 hasta 3171 cP en diferentes variedades de sorgos ([Marston et al., 2015, 2016](#); [Palavecino et al., 2016](#)). La viscosidad de ruptura “*Breakdown viscosity*” es la diferencia entre la viscosidad máxima y la mínima, este parámetro se asocia principalmente la estabilidad de la pasta ante condiciones de cizalla, donde valores bajos reflejan una pasta con una mayor estabilidad ([Srichuwong et al., 2017](#)). Por lo que, la harina de sorgo blanco variedad Paloma mostró una pasta con mayor estabilidad ante condiciones de cizalla.

En la Tabla 2.12 se presentan las propiedades térmicas de las harinas obtenidas a partir de los sorgos crudos. Para los sorgos rojos la gelatinización se encontró entre 64 y 78.5 °C con energías de gelatinización entre 8.09 y 10.35 Jg<sup>-1</sup>, siendo las variedades 81g67 y 82g34 las que mostraron la mayor energía de gelatinización. En el caso de los sorgos blancos, la temperatura de gelatinización osciló entre los 64 y 77 °C, con energías de gelatinización de entre 4 y 8.97 Jg<sup>-1</sup>, destacando a la variedad primavera como la que



presentó la menor energía. [Srichuwong et al. \(2017\)](#) reportaron valores de gelatinización de los 60 a 81 °C con una energía de gelatinización de 11.0 a 11.2 Jg<sup>-1</sup> para almidones extraídos de sorgos rojos y blancos. Se ha reportado una relación entre la energía de gelatinización con la heterogeneidad del tamaño del gránulo de almidón, donde gránulos mayores tienden a requerir más energía para que se lleve a cabo la gelatinización ([Hoyos-Leyva et al., 2017](#)).

Tabla 2.11 Propiedades térmicas de las harinas obtenidas a partir de los sorgos crudos

Variedad	T <sub>inicial</sub> (°C)	T <sub>pico</sub> (°C)	T <sub>final</sub> (°C)	ΔH (Jg <sup>-1</sup> )
<b>Sorgos rojos</b>				
81g67	67.17 ± 0.47 <sup>b</sup>	71.46 ± 0.51 <sup>ab</sup>	77.17 ± 0.60 <sup>ab</sup>	10.16 ± 0.08 <sup>b</sup>
82g93	68.29 ± 0.48 <sup>ab</sup>	72.63 ± 1.03 <sup>a</sup>	78.13 ± 0.50 <sup>ab</sup>	9.88 ± 0.06 <sup>c</sup>
82g34	68.63 ± 0.49 <sup>a</sup>	72.45 ± 0.56 <sup>a</sup>	78.03 ± 0.55 <sup>ab</sup>	10.35 ± 0.07 <sup>a</sup>
8133	64.71 ± 0.46 <sup>c</sup>	71.97 ± 0.46 <sup>ab</sup>	78.53 ± 0.56 <sup>a</sup>	9.07 ± 0.08 <sup>d</sup>
85p20	67.34 ± 0.48 <sup>ab</sup>	71.82 ± 0.61 <sup>ab</sup>	76.96 ± 0.54 <sup>b</sup>	8.09 ± 0.06 <sup>c</sup>
<b>Sorgos blancos</b>				
82w21	67.65 ± 0.48 <sup>ab</sup>	72.15 ± 0.51 <sup>ab</sup>	77.89 ± 0.55 <sup>ab</sup>	8.97 ± 0.06 <sup>d</sup>
Paloma	65.47 ± 0.46 <sup>c</sup>	70.64 ± 0.49 <sup>bc</sup>	77.62 ± 0.55 <sup>ab</sup>	6.47 ± 0.05 <sup>f</sup>
Primavera	64.72 ± 0.55 <sup>c</sup>	69.15 ± 0.50 <sup>c</sup>	74.15 ± 0.52 <sup>c</sup>	4.18 ± 0.03 <sup>e</sup>
<b>2da transición</b>				
81g67	125.6 ± 0.88	126.3 ± 0.89	129.7 ± 0.91	0.047 ± 0.004

Se muestra la media ± DE de tres experimentos independiente. Letras diferentes indican diferencia estadística entre variedades por el método de Tukey ( $p < 0.05$ ). T: temperatura; ΔH: entalpía de gelatinización.

La variedad 81g67 mostró una segunda transición entre los 125 y 129 °C con una energía de disociación de 0.047 Jg<sup>-1</sup>, esta transición puede estar asociada a la presencia de almidón resistente tipo 5 ([Kong et al., 2019](#)), esta variedad presentó el mayor contenido de lípidos (6.17 ± 0.03).

Durante el procesamiento los almidones sufren cambios en su capacidad de interactuar con el agua, su viscosidad y su capacidad de gelatinización, por lo que resulta de vital importancia el entender las propiedades de la materia prima y poder explicar así los cambios ocurridos en los almidones nativos después de su procesamiento térmico ([Cornejo-Ramírez et al., 2018](#)). Por otro lado, el estudio de las propiedades de pasta y



térmicas de los cereales o almidones extraídos de estos, ayuda a determinar el uso final en la industria (Hoyos-Leyva et al., 2017).

En general, se pudo apreciar que la variedad de sorgo Paloma mostró una mayor estabilidad (menor viscosidad de ruptura y retrogradación); así mismo, su entalpía de gelatinización fue la más baja del conjunto, solo después de la variedad Primavera. Por lo que, a pesar de compartir múltiples características con los sorgos, debe existir otro atributo físico que diferencié a esta variedad del resto.

### 2.3.5 Evaluación de la microestructura

En la Figuras 2.8 (Sorgos rojos) y 2.9 (Sorgos blancos), se muestran las micrografías de las variedades de sorgo crudo. La morfología predominante en los gránulos del almidón fue del tipo esférico y poligonal, lo que está en concordancia con lo reportado por Zhu (2014).

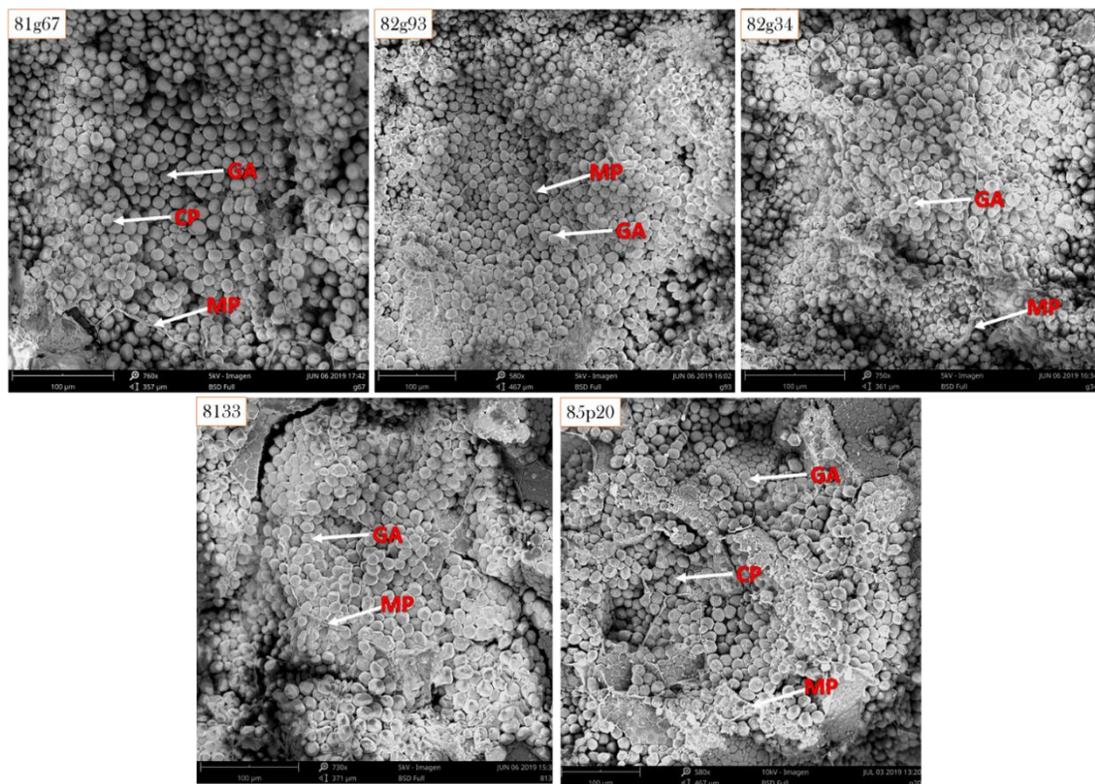


Figura 2.8 Micrografías de los sorgos rojos crudos  
MP: matriz proteica; GA: gránulos de almidón; CP: cuerpos proteicos.



En la Figura 2.8 se muestran las micrografías de los sorgos rojos crudos. La variedad 82g67 presentó una estructura poco compacta, con distribución trimodal (Gráfica 2.1), con tamaños de gránulos de  $6.70 \pm 1.73 \mu\text{m}$ ,  $11.31 \pm 0.93 \mu\text{m}$ , y  $14.92 \pm 1.45 \mu\text{m}$ , con una proporción de 17, 20 y 63 %, respectivamente (Tabla 2.12). La variedad 82g93 mostró una disposición granular compacta, con alta presencia de la matriz proteica y poca homogeneidad en el tamaño de los gránulos, con una distribución granular de tipo bimodal (Gráfica 2.1), con tamaños de gránulo de  $12.12 \pm 0.81 \mu\text{m}$  y  $15.06 \pm 0.96 \mu\text{m}$ , con una proporción de 47:53 (Tabla 2.12). En la variedad 82g34 se observó una alta presencia de matriz proteica, con una matriz granular un poco compacta y distribución granular bimodal (Gráfica 2.1), con tamaños de gránulos de  $11.93 \pm 2.14 \mu\text{m}$  y  $16.44 \pm 0.7 \mu\text{m}$ , en una relación 77:23 (Tabla 2.12). Por otro lado, la variedad 8133 mostró una matriz compacta y organizada, con una distribución bimodal (Gráfica 2.1), con gránulos de  $13.89 \pm 1.89 \mu\text{m}$  y  $16.89 \pm 0.68 \mu\text{m}$ , con relación 83:17 % (Tabla 2.12). La variedad 85p20 mostró una matriz más empacada, con poco espacio intragranular y una distribución bimodal (Gráfica 2.1), con tamaño del gránulo de  $16.58 \pm 1.72 \mu\text{m}$  y  $21.22 \pm 0.6 \mu\text{m}$ , con una proporción de 80:20% (Tabla 2.12).

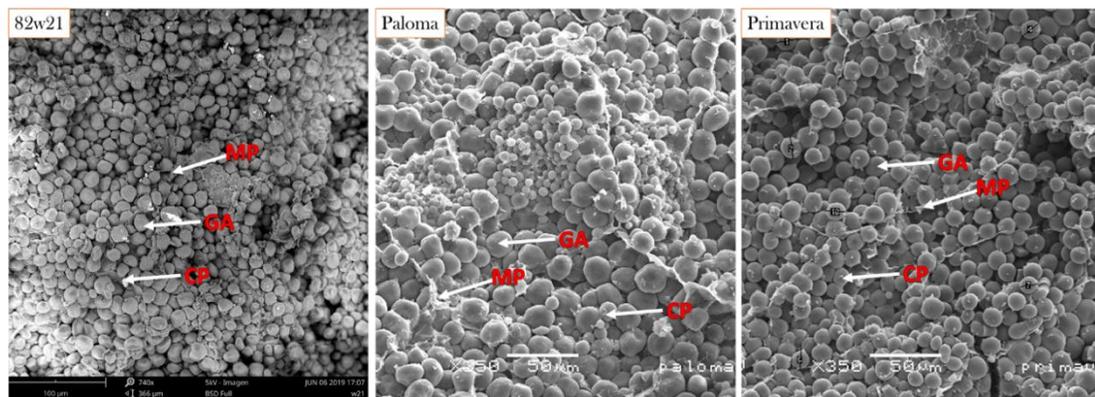


Figura 2.9 Micrografías de los sorgos blancos crudos  
MP: matriz proteica; GA: gránulos de almidón; CP: cuerpos proteicos.

Respecto a las variedades blancas (Figura 2.9), la 82w21 mostró un tamaño de gránulo pequeño con distribución bimodal y tamaños de  $14.30 \pm 1.47 \mu\text{m}$  y  $17.53 \pm 1.16 \mu\text{m}$ , con una relación 57:43 % (Tabla 2.12). Por otro lado, la variedad Paloma mostró una matriz granular menos compacta de tipo bimodal con gránulos de  $7.4 \pm 1.56 \mu\text{m}$  y



21.03  $\pm$  1.82  $\mu$ m, con una relación 27:73 % (Tabla 2.12). Finalmente, la variedad primavera mostró una matriz granular más homogénea, poco compacta con una distribución del tipo monomodal con un tamaño medio de 13.85  $\pm$  1.59  $\mu$ m con una proporción del 100 % (Tabla 2.12). Palavecino et al. (2019) reportaron un tamaño del gránulo de almidón de 16  $\mu$ m para sorgo blanco; de igual manera Zhu (2014) en su recopilación menciona que el tamaño del gránulo de almidón se ha reportado en un rango que va de 4 a 35  $\mu$ m en función de la variedad, siendo clasificado como gránulos pequeños aquellos menores de 10  $\mu$ m y grandes los que sean mayores a 10  $\mu$ m, por lo que la mayoría de los gránulos de las variedades estudiadas pueden ser considerados grandes a excepción de los primeros modales en las variedades 81g67 (6.70  $\mu$ m) y Paloma (7  $\mu$ m).

Se ha observado que en maíz palomero, los gránulos de almidón están altamente empaquetados, con poco espacio intergranular y rodeados por una amplia matriz proteica (Vázquez-Carrillo et al., 2019). Por otro lado, se ha demostrado que existe una correlación negativa entre el tamaño del gránulo de almidón y la dureza del grano, donde variedades con gránulos grandes presentaron menores valores de dureza; sin embargo, es necesario demostrar que en el caso del sorgo se mantenga esta relación (Gaytán-Martínez et al., 2006).

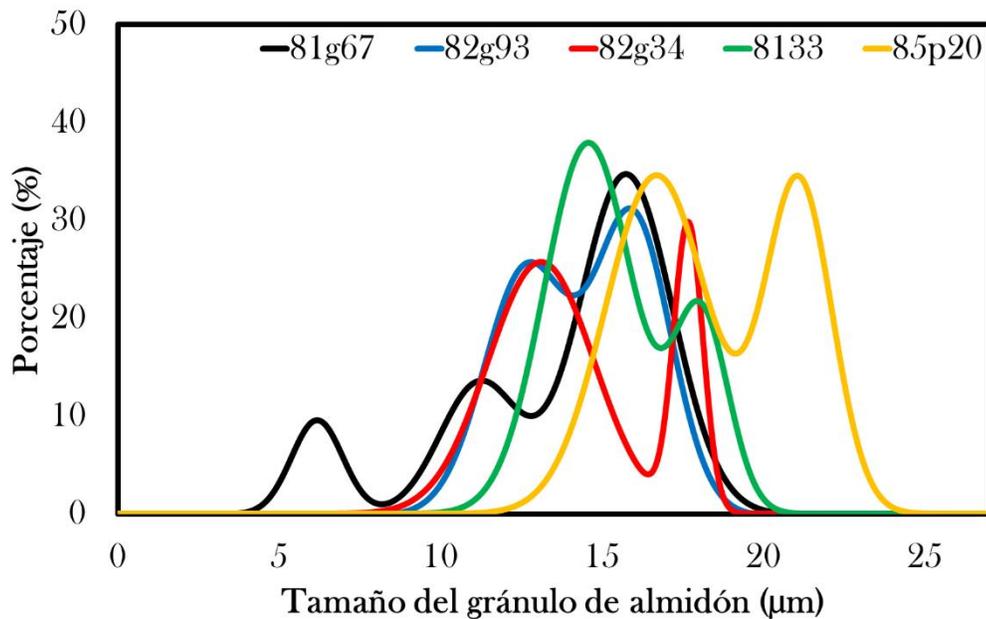
La Tabla 2.12 muestra las características de los gránulos de almidón (tamaño, distribución y proporción), mientras que en el Gráfica 1.1 y Gráfica 1.2 se muestran los perfiles de distribución del tamaño del gránulo de almidón en los granos de sorgos rojos y blanco, respectivamente.



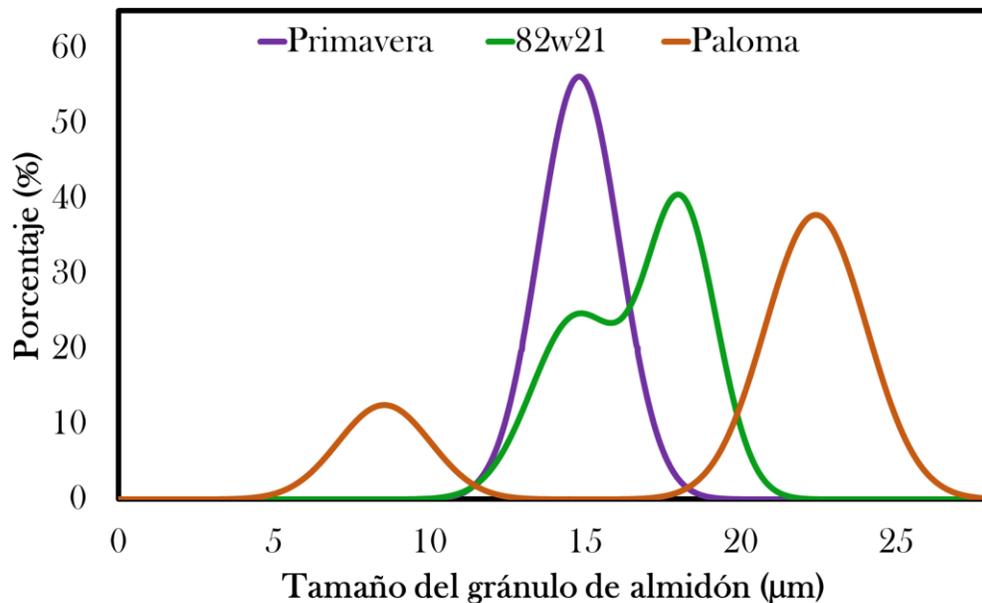
Tabla 2.12 Características del gránulo de almidón en los granos de sorgo crudos

Variiedad	Tamaño del gránulo de almidón ( $\mu\text{m}$ )	Tipo de distribución	Proporción (%)
81g67	a) $6.70 \pm 1.73^f$ b) $11.31 \pm 0.93^{de}$ c) $14.92 \pm 1.45^{bcd}$	Trimodal	17:20:63
82g93	a) $12.12 \pm 0.81^{cd}$ b) $15.06 \pm 0.96^{bcd}$	Bimodal	47:53
32g34	a) $11.93 \pm 2.14^d$ b) $16.44 \pm 0.70^{abc}$	Bimodal	77:23
8133	a) $13.89 \pm 1.89^{bcd}$ b) $16.89 \pm 0.68^{ab}$	Bimodal	83:17
85p20	a) $16.58 \pm 1.72^{abc}$ b) $21.22 \pm 0.6^a$	Bimodal	80:20
82w21	a) $14.30 \pm 1.47^{bcd}$ b) $17.53 \pm 1.16^{ab}$	Bimodal	57:43
Paloma	a) $7.43 \pm 1.56^{ef}$ b) $21.03 \pm 1.82^a$	Bimodal	27:73
Primavera	a) $13.85 \pm 1.59^{bcd}$	Monomodal	100

Se muestra la media  $\pm$  DE de 30 mediciones independientes. Letras diferentes indican diferencia estadística entre variedades por el método de Tukey ( $p < 0.05$ ).



Gráfica 2.1 Distribución del tamaño del gránulo de almidón en los sorgos rojos crudos



Gráfica 2.2 Distribución del tamaño del gránulo de almidón en los sorgos rojos crudos

Como se puede apreciar en la Tabla 2.12, los sorgos presentaron tres distribuciones principales en el tamaño de los gránulos de almidón, siendo la distribución bimodal (dos tamaños de gránulos) la más abundante, mientras que la distribución monomodal (un tamaño de gránulos) y trimodal (tres tamaños de gránulos) solo se presentaron en variedad Primavera y 81g67, respectivamente

El análisis de microestructura mostró que las variedades de sorgo estudiadas presentaron características muy semejantes, siendo la disposición de proteína (matriz y cuerpos proteicos) y el tipo de distribución del tamaño de gránulo de almidón los atributos que los diferencian. En ese sentido, se pudo apreciar que la variedad Paloma fue la que mostró una mayor disposición de matriz proteica envolviendo a los gránulos de almidón, los cuales presentaron una distribución bimodal constituida por gránulos de 7.43 y 21 µm en una proporción de 27:73 %. Mientras que el resto, a pesar de mostrar distribución bimodal y trimodal (81g67), se observó una mayor proporción de gránulos pequeños respecto a los grandes.



### 2.3.6 Análisis de grupos funcionales

La espectroscopía de infrarrojo es una técnica que permite conocer la interacción de la materia con la radiación infrarrojo, produciendo una excitación y vibración de los enlaces. Teniendo un enfoque en los grupos funcionales, solo se toma en cuenta los movimientos o vibraciones de los átomos más grandes (mayor amplitud), despreciando a los de menor amplitud (Ma y Allen, 2004). Partiendo de lo anterior, las vibraciones moleculares pueden ser divididas en dos grupos principales: el primero son las vibraciones de estiramiento “*stretching*”, la cual indica un cambio en la longitud de los enlaces durante la vibración también conocida como vibraciones de valencia; la segunda son las vibraciones de deformación, las cuales se dividen en tijereteo “*scissoring*”, aleteo o meneado “*wagging*”, balanceo “*rocking*” y retorcimiento “*Twisting*” (Ma y Allen, 2004). Partiendo de esta información, en la Figura 2.10 se plasma de una manera más ilustrativa los modos vibracionales de las moléculas.

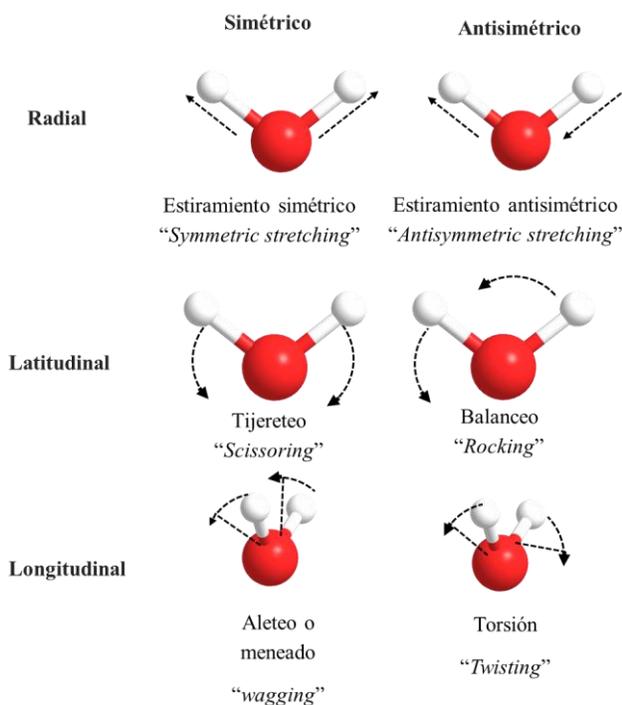


Figura 2.10 Principales modos vibracionales de las moléculas



Los espectros de infrarrojo medio ( $4000-600\text{ cm}^{-1}$ ) obtenidos por espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier se muestran en la Figura 2.11. Cabe destacar que en esta etapa del estudio solo será la exploración de las bandas características en las diferentes variedades de sorgo crudo.

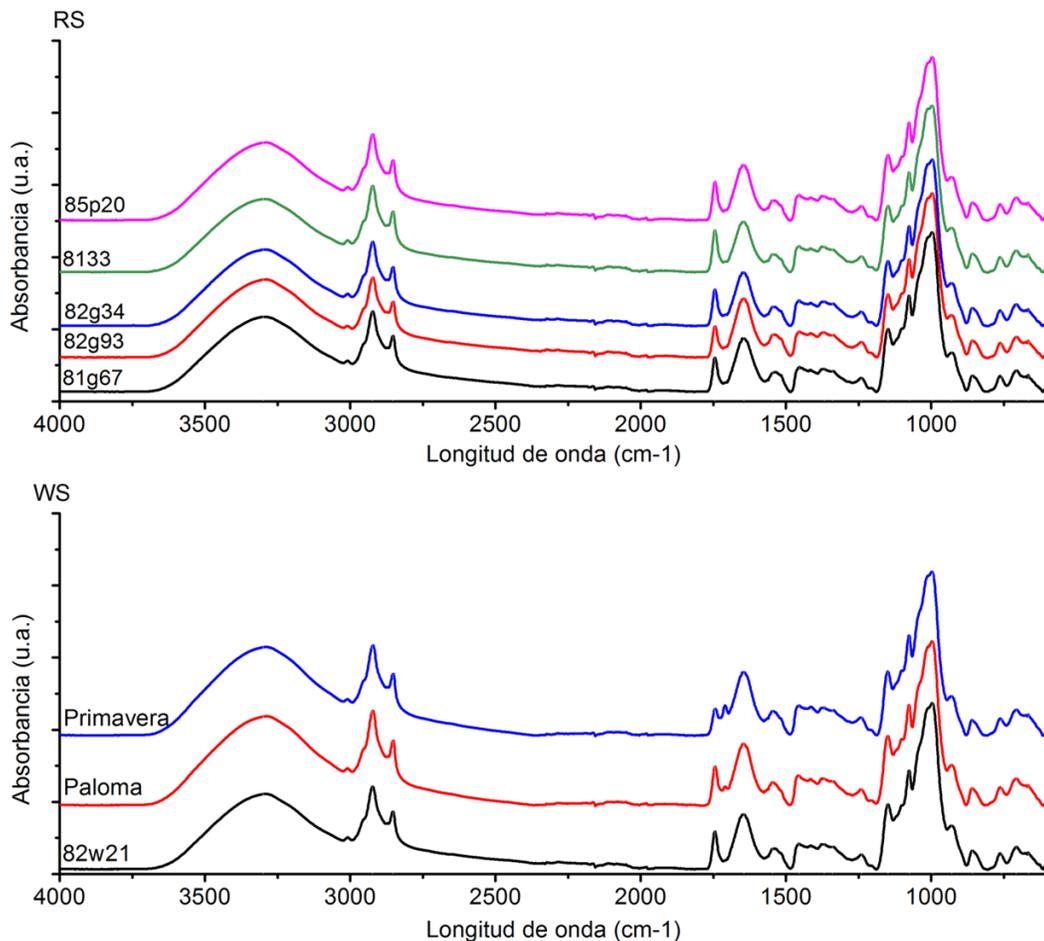


Figura 2.11 Espectro infrarrojo medio ( $4000-600\text{ cm}^{-1}$ ) de las variedades de sorgo crudo

RS: sorgo rojo; WS: sorgo blanco.



### 2.3.6.1 Región 4000 a 2000 $\text{cm}^{-1}$

Esta región comprende principalmente vibraciones de estiramiento “*stretching*” de los átomos tanto en forma simétrica como antisimétrica (Ma y Allen, 2004). La Figura 2.12 muestra el espectro IR de las variedades de sorgo, así como las bandas encontradas en esta región, mientras que la Tabla 2.13 muestra los grupos funcionales asociados a las bandas encontradas en las muestras.

Independientemente a la variedad, las muestras exhibieron una banda a los 3300  $\text{cm}^{-1}$  (a), los cuales son asociadas principalmente a las vibraciones de los grupos hidroxilos dispuestos en las cadenas poliméricas y en las moléculas del agua presentes en la muestras (Hoyos-Leyva et al., 2017). Por otro lado, los grupos NH de las aminas secundarias presentan vibraciones de estiramiento simétrico en esta región del espectro, por lo que la intensidad de la banda “a” puede ser la suma de vibraciones de los grupos hidroxilos y los grupos aminos presentes en la muestra (Ma y Allen, 2004).

Las bandas b y c muestran el estiramiento antisimétrico y simétrico de los grupos  $\text{CH}_2$  y  $\text{CH}_3$ , respectivamente, dispuestos a lo largo de las diversas cadenas tanto del almidón como de lípidos, etc. (Warren et al., 2016).

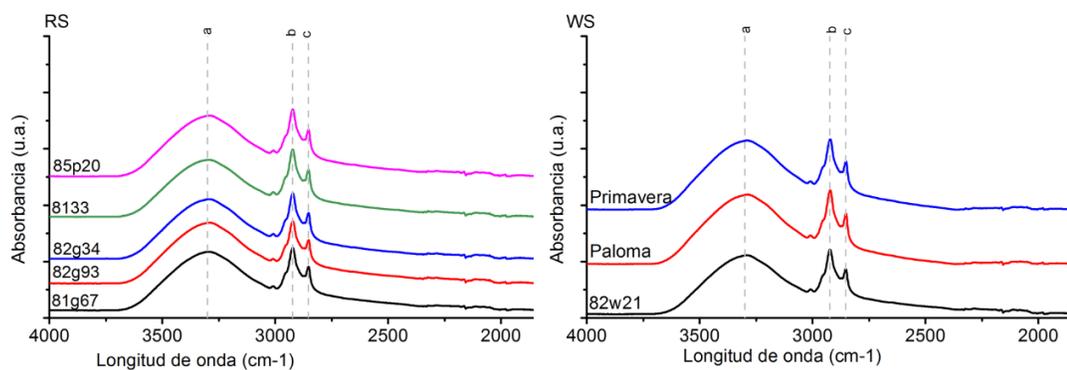


Figura 2.12 Región de 4000 a 2000  $\text{cm}^{-1}$

RS: sorgo rojo; WS: sorgo blanco.



Tabla 2.13 Grupos funcionales asociados a las bandas identificadas del espectro infrarrojo región 4000-2000  $\text{cm}^{-1}$

Clave de la banda	Longitud de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Grupo	Modo vibracional	Estructura sugerida
a	3300	OH	Estiramiento	
			Estiramiento de hidrógeno unido	
		NH	Estiramiento simétrico	
b	2923	CH <sub>2</sub>	Estiramiento antisimétrico	
		CH <sub>3</sub>	Estiramiento simétrico	
c	2853	CH <sub>2</sub>	Estiramiento simétrico	

Elementos resaltados en azul representan el posible grupo vibracional. R: cualquier elemento excepto H \*cualquier adjunto.

### 2.3.6.2 Región 1900 a 1400 $\text{cm}^{-1}$

Dentro de esta región se presentan los picos de una amplia gama de grupos funcionales con dobles enlaces, teniendo particular incidencia en los grupos C=O. Esta región es de interés particular para los investigadores de moléculas biológicas, ya que los picos o frecuencias en esta región pueden ser modificados en función algunas conjugaciones, tamaños de anillos, puentes de hidrógeno, efectos estéricos y electrónicos (Ma y Allen, 2004).

En la Figura 2.13 se muestran las bandas encontradas la región del espectro comprendida de 1900 a 1400  $\text{cm}^{-1}$ , mientras que en la Tabla 2.14 se muestran grupos funcionales asociados a estas bandas.

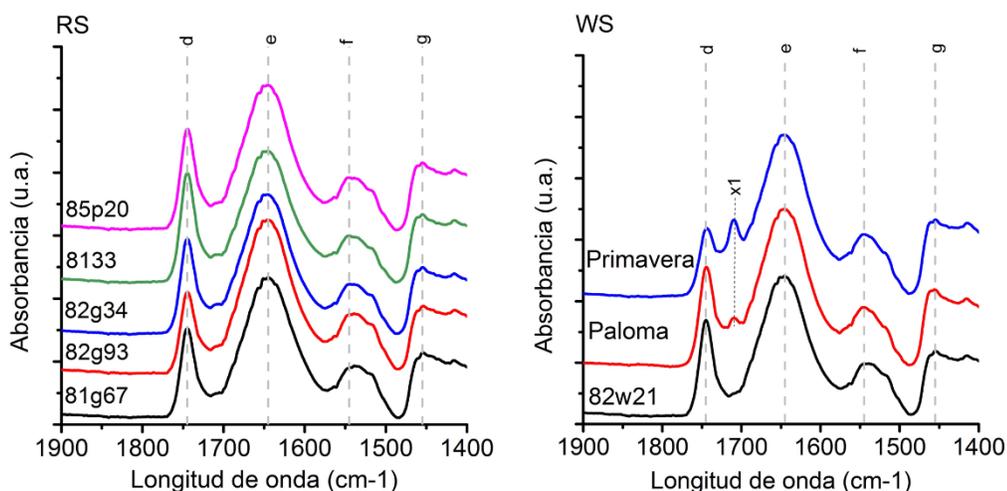


Figura 2.13 Región IR de 1900 a 1400  $\text{cm}^{-1}$   
RS: sorgo rojo; WS: sorgo blanco.

Las bandas de 1670-1620  $\text{cm}^{-1}$  representan la región de la amida I, mientras que entre 1550 y 1500  $\text{cm}^{-1}$  se ubica la región de la amida II. El modo vibracional de la amida I es primordialmente de la extensión o estiramiento del enlace C=O acoplado con la contribución de los enlaces CN en extensión, tijereteo del grupo C-CN y las flexiones en el plano del enlace NH (tijereteo y balanceo) (Duodu et al., 2001). Por otro lado, a los 1455  $\text{cm}^{-1}$  se encontró la banda característica del estiramiento de los anillos de los grupos cíclicos presentes en la muestra, ya sea de las glucosas, anillos aromáticos, anillos de compuestos fenólicos, entre otros. Cabe destacar que las variedades Paloma y primavera mostraron un pico (x1) a 1710  $\text{cm}^{-1}$ , el cual indica un estiramiento del C=O presente en ácidos carboxílicos saturados, probablemente asociados a la presencia de ácidos grasos saturados (Ma y Allen, 2004; Sokrates, 2001). Se ha reportado que el ácido graso saturado mayoritario en el sorgo blanco es el ácido palmítico representando del 12 hasta ~14 % de los lípidos totales del grano (Afify et al., 2012; Hassan et al., 2017).



Tabla 2.14 Bandas encontradas en la región 1900 a 1400  $\text{cm}^{-1}$

Clave de la banda	Longitud de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Grupo	Modo vibracional	Estructura sugerida	Notas
d	1745	C=O	Estiramiento		Ester saturado
x1	1710	C=O	Estiramiento		Ácido carboxílico saturado
e	1645	C=O	Estiramiento		Amida I
		C=O	Estiramiento		Amida III
f	1545	NH	Combinación		Amida combinación de estiramiento C-N y flexión N-H
g	1455	NH	Doblamiento		
		CH <sub>3</sub>	Doblamiento antisimétrico		
		Anillo	Estiramiento		

Elementos resaltados en azul representan el posible grupo vibracional. R: cualquier elemento excepto H. \*cualquier adjunto.

### 2.3.6.3 Región 1450 a 600 $\text{cm}^{-1}$

Esta región es habitualmente llamada como huella digital (1400-900  $\text{cm}^{-1}$ ), múltiples grupos con enlaces simples muestran picos en esta región. Por otro lado, en la región de 900 a 400  $\text{cm}^{-1}$  se muestran las bandas características de los grupos aromáticos resultado de las deformaciones fuera del plano (aleteo y torsión) de algunos grupos C-H, usencia de bandas en esta región usualmente indican ausencia de anillos aromáticos en la muestra (Ma y Allen, 2004). En la Figura 2.14 se presentan las bandas encontradas en la región del espectro infrarrojo comprendido entre los 1450 a los 600  $\text{cm}^{-1}$ , mientras



que en la Tabla 2.15 se muestra la identificación de los grupos funcionales asociados a estas bandas.

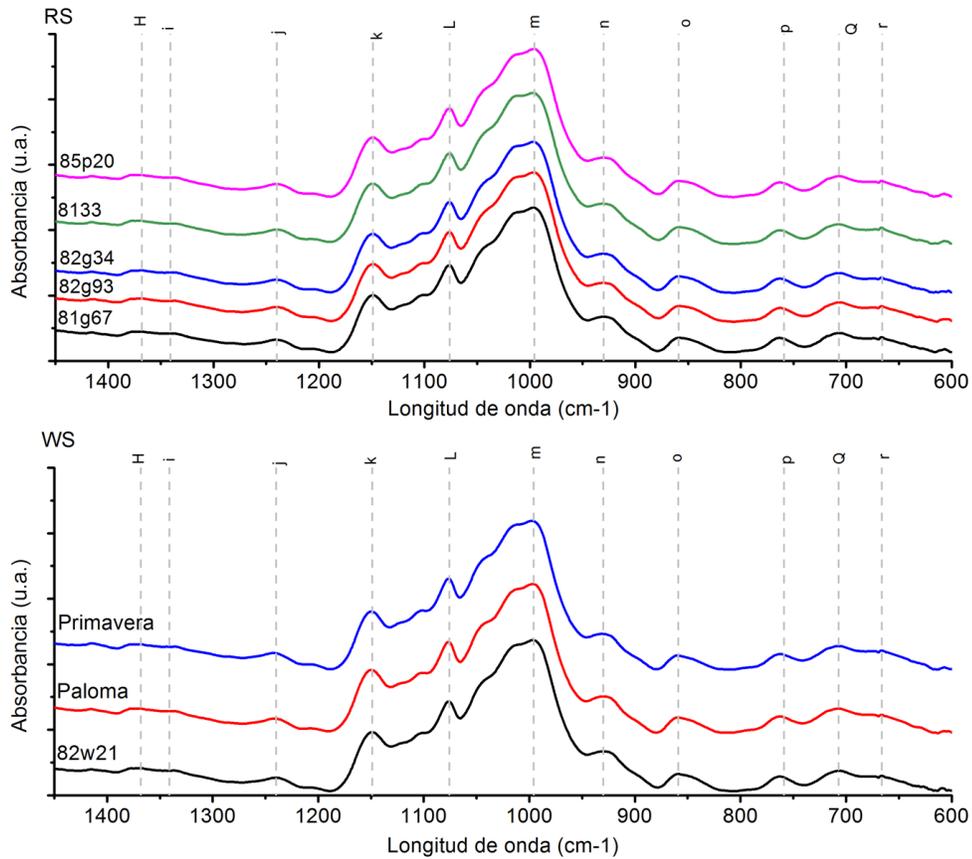


Figura 2.14 Espectro infrarrojo de la región 1450-600  $\text{cm}^{-1}$   
RS: sorgo rojo; WS: sorgo blanco



Tabla 2.15 Bandas encontradas en la región 1450-600  $\text{cm}^{-1}$

Clave de la banda	Longitud de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Grupo	Modo vibracional	Estructura sugerida	Notas
H	1368	CH	Deformación		Asociado al esqueleto de la cadena de carbonos en grupos aromáticos
i	1341	NH	Combinación		Amida III, combinación de estiramiento C-N y flexión N-H curva en H en el plano
j	1240	CH	Doblamiento		Asociado al esqueleto de la cadena de carbonos en grupos aromáticos
		NH	Combinación		Amida III, combinación de estiramiento C-N y flexión N-H
k	1149	C-O-C	Estiramiento		
		C=O	Estiramiento		
L	1076	CH	Doblamiento		Curva en H en el plano
m	996	CH	Doblamiento		Curva en H en el plano
n	930	CH	Deformación		1 H adyacente deformación fuera del plano
o	859	CH	Deformación		3 deformaciones adyacentes H fuera del plano
		CH	Deformación		6 deformaciones adyacentes H fuera del plano
p	759	P=S	Estiramiento		
		CH	Deformación		2 deformaciones adyacentes H fuera del plano
Q	707	Anillo	Doblamiento torsión		Flexión de anillo fuera del plano
		CO	Doblamiento		

Elementos resaltados en azul representan el posible grupo vibracional. A: cualquier elemento excepto H. \* cualquier adjunto.

Independientemente a la variedad de sorgo, se exhibe una banda a los 1368  $\text{cm}^{-1}$ , 1240  $\text{cm}^{-1}$ , 1076  $\text{cm}^{-1}$ , 996  $\text{cm}^{-1}$ , 930  $\text{cm}^{-1}$ , 859  $\text{cm}^{-1}$  y 707  $\text{cm}^{-1}$ , las cuales corresponden a vibraciones de doblamiento en torsión y aleteo fuera del plano en los grupos C-H dispuestos en los anillos aromáticos presentes en las muestras. Del mismo modo, las



vibraciones de torsión en los anillos aromáticos se observaron a  $707\text{ cm}^{-1}$ . Finalmente, se observaron algunas bandas características del grupo amida II a  $1240\text{ cm}^{-1}$  con vibraciones combinadas de estiramiento en el enlace C-N y flexión de los grupos N-H.

Las bandas a los  $1047\text{ cm}^{-1}$  y  $1022\text{ cm}^{-1}$  se han relacionado con el grado de orden en el almidón, mientras que la banda a los  $1047\text{ cm}^{-1}$  indica el ordenamiento de las estructuras, donde la banda de  $1022\text{ cm}^{-1}$  aumenta por las regiones amorfas del almidón, mientras que las bandas de  $1000\text{ cm}^{-1}$  y  $1047\text{ cm}^{-1}$  parecen definirse y aumentar respecto al incremento de las regiones amorfas o cristalinas en la muestras, respectivamente (Warren et al., 2016).

En forma general, las características vibracionales de los sorgos estudiados mostraron ser muy similares, no encontrándose diferencia estadística entre estas ( $p < 0.05$ ). Sin embargo, las variedades blancas Paloma y Primavera mostraron la presencia de una banda diferente a  $1710\text{ cm}^{-1}$ , asociada principalmente al estiramiento del grupo C=O de un ácido carboxílico saturado.

### 2.3.7 Difracción de rayos x

En la Figura 2.15 se muestran los difractogramas obtenidos por difracción de rayos X de las diferentes variedades de sorgo crudo empleadas en este estudio.

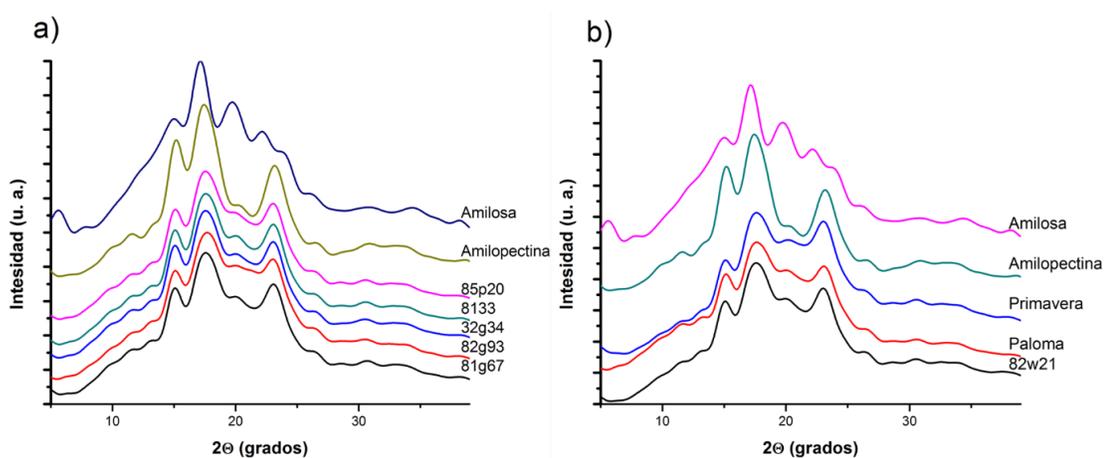


Figura 2.15 Difractogramas de los: a) Sorgos rojos; b) Sorgos blancos



Todas las variedades mostraron un patrón de difracción de rayos tipo A, en cual es característico de los cereales (Silva et al., 2019). Se ha reportado que la amilosa se encuentra dispuesta en forma helicoidal agrupada en estructuras hexagonales relativamente compactas con poca agua estructural, siendo circunvaladas por moléculas de agua como se plasma en la Figura 2.16 (Tester et al. 2004). Cabe destacar que tanto la amilosa como la amilopectina son capaces de formar estructuras cristalinas, sin embargo, en almidones nativos la amilopectina es el principal constituyente de la estructura cristalina. Es importante destacar que la cristalinidad del almidón se ve influenciada por otros factores tales como la concentración del almidón, longitud de las cadenas, la temperatura, sales y presencia de moléculas orgánicas (Blazek, 2008).

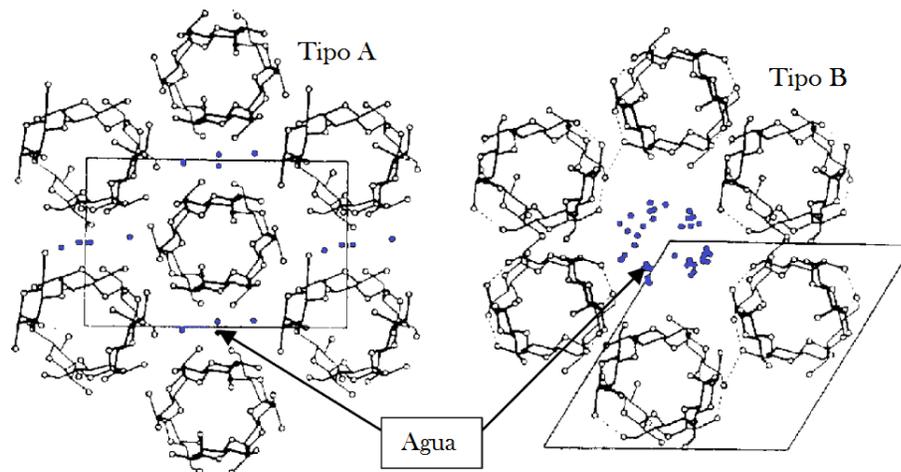
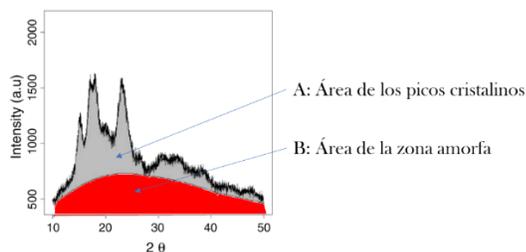


Figura 2.16 Disposición de la amilosa y el agua en función del polimorfismo tipo A y B en la cristalinidad

Adaptado de Tester et al. (2004).

Es importante destacar que el patrón de difracción de rayos X es dependiente en gran medida de la longitud de la cadena de la amilopectina, donde las cadenas cortas entre 14 a 20 monómeros se asocian aun polimorfismo tipo A, mientras que cadenas mayores a 22 monómeros favorecen el polimorfismo tipo B (Blazek, 2008).



$$\text{Cristalinidad aparente (\%)} = \frac{A}{(B + A)} * 100$$

Figura 2.17 Metodología de integración de Brückner para la obtención de la cristalinidad aparente.

Mediante el uso de la metodología de integración de Brückner (Figura 2.17) se realizó el cálculo de la cristalinidad aparente del almidón de los sorgos empleados en este estudio, los cuales se muestran en la Tabla 2.16.

Tabla 2.16 Cristalinidad aparente del almidón de las variedades de sorgo por el método de integración de Brückner

Variedad	Cristalinidad aparente (%)
<b>Sorgos rojos</b>	
81g67	25.45 ± 1.86 <sup>Aa</sup>
82g93	23.34 ± 0.55 <sup>ABab</sup>
32g34	24.80 ± 0.55 <sup>ABab</sup>
85p20	22.04 ± 0.73 <sup>Bb</sup>
8133	22.54 ± 1.85 <sup>ABab</sup>
<b>Sorgos blancos</b>	
82w21	23.63 ± 0.68 <sup>Aab</sup>
Paloma	23.55 ± 0.27 <sup>Aab</sup>
Primavera	23.66 ± 0.43 <sup>Aab</sup>

Se muestra la media ± la desviación estándar de tres mediciones independientes. Diferente letra mayúscula indica diferencia estadística por variedades del mismo color de sorgo, mientras que las letras minúsculas evidencian una diferencia estadística mediante la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

Silva et al. (2019) reportaron una cristalinidad relativa del 26.07 % en almidón de sorgo siguiendo la metodología de Brückner. Por otro lado, se han reportado rangos de cristalinidad en diferentes variedades de sorgos los cuales van del 22 al 29.6 % (Zhu,



2014). Los datos obtenidos en este estudio se encuentran dentro de los rangos de cristalinidad reportados para el sorgo. Con los datos recabados por [Tester et al. \(2004\)](#) sobre el contenido de amilosa y la cristalinidad aparente por DRX, se realizó un modelo de regresión polinómico de grado 3 para poder predecir el contenido de amilosa aparente en función de la cristalinidad por DRX, el cual se muestra en la Figura 2.18.

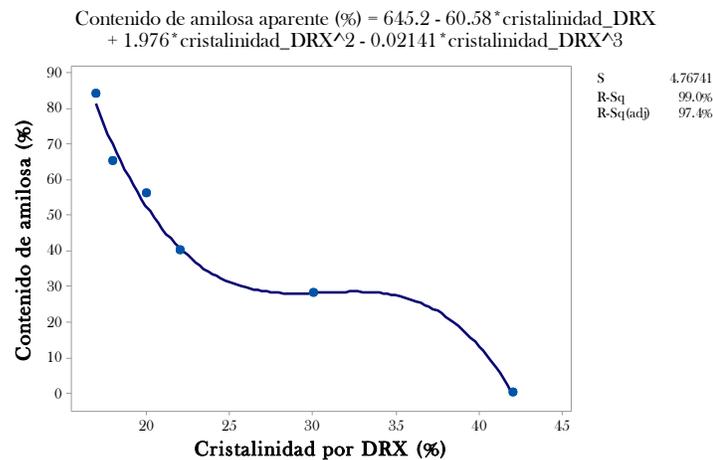


Figura 2.18 Modelo de predicción del contenido de amilosa aparente respecto a la cristalinidad por DRX

En la Tabla 2.17 se muestran las relaciones de amilosa y amilopectina calculadas en función de la cristalinidad de los sorgos crudos. Las variedades blancas presentaron un contenido de amilosa del 32 al 42 % y las blancas del  $\sim 36$  %, [Zhu \(2014\)](#) reporta una recopilación de valores que oscilan de 11 a 58 % de amilosa en función de la variedad sorgo y el método empleado para la determinación.



Tabla 2.17 Contenido de amilosa y amilopectina aparentes obtenidos del modelo de predicción respecto a la cristalinidad de los almidones en las variedades empleadas en este estudio

Variedad	Contenido de amilosa aparente (%)	Contenido de amilopectina aparente (%)
<b>Sorgos rojos</b>		
81g67	32.5 ± 3.4 <sup>Aa</sup>	67.5 ± 3.4 <sup>Aa</sup>
82g93	36.8 ± 1.9 <sup>Aa</sup>	63.2 ± 1.9 <sup>Aa</sup>
32g34	32.9 ± 1.1 <sup>Aa</sup>	67.1 ± 1.1 <sup>Aa</sup>
85p20	41.9 ± 3.2 <sup>Aa</sup>	58.1 ± 3.2 <sup>Aa</sup>
8133	40.8 ± 8.0 <sup>Aa</sup>	59.2 ± 8.0 <sup>Aa</sup>
<b>Sorgos blancos</b>		
82w21	35.9 ± 2.1 <sup>Aa</sup>	64.1 ± 2.1 <sup>Aa</sup>
Paloma	36.0 ± 0.8 <sup>Aa</sup>	64.0 ± 0.8 <sup>Aa</sup>
Primavera	35.7 ± 1.3 <sup>Aa</sup>	64.3 ± 1.3 <sup>Aa</sup>

Se muestra la media ± la desviación estándar de tres mediciones independientes. Diferente letra mayúscula indica diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) por variedades del mismo color de sorgo. Mientras que, letras minúsculas evidencian una diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) entre todas las variedades.

Las variedades de sorgo estudiadas mostraron el mismo patrón de difracción tipo-A perteneciente a una estructura cristalina ortorrómbica, con una cristalinidad relativa entre 22 y 25.45 %. Así mismo, se observó la tendencia a mostrar un mayor contenido de amilopectina aparente (>58.2 %). Sin embargo, este contenido de amilosa:amilopectina deberá de ser evaluado con una técnica apropiada para corroborar los valores obtenidos.

### 2.3.8 Relación entre las variables estudiadas

Con el fin de conocer las correlaciones existentes entre cada uno de los parámetros evaluados en la caracterización de las variedades de sorgo, se realizó un análisis de correlación de Pearson. En la Figura 2.19 se muestran las correlaciones de Pearson entre cada uno de los parámetros evaluados, los cuales han sido seccionados por propiedades para su mejor explicación.

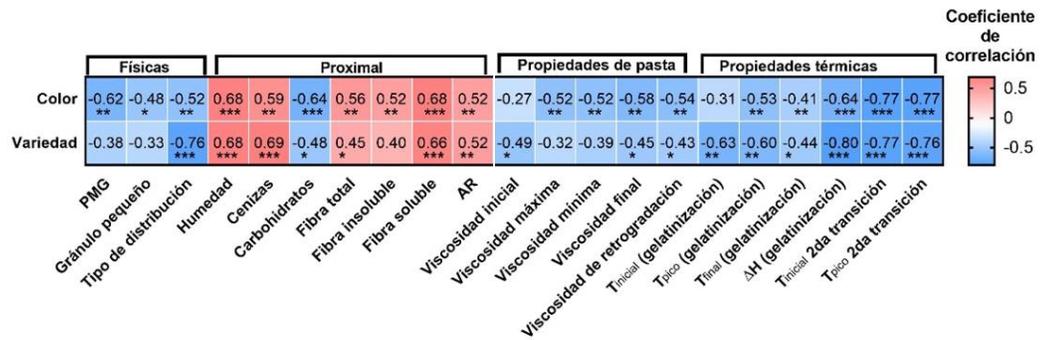


Figura 2.19 Coeficientes de correlación entre la variedad, el color y las propiedades físicas, de pasta, térmicas, compuestos fenólicos y proximal. \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ .

Como se puede apreciar en la Figura 2.19, el color del grano mostró un efecto negativo sobre las propiedades fisicoquímicas del grano, considerándose el color rojo como 1 y blanco como 2. Para las variedades se consideró una escala ordinal del uno al ocho con el siguiente orden 81g67 < 82g93 < 32g34 < 85p20 < 8133 < 82w21 < Paloma < Primavera.

Las variedades rojas presentaron el mayor peso de mil granos ( $r = -0.62$ ,  $p < 0.01$ ), los tamaños de gránulos más pequeños ( $r = -0.62$ ,  $p < 0.01$ ), así como un tipo de distribución bimodal ( $r = -0.52$ ,  $p < 0.01$ ). La variedad se correlacionó con el tipo de distribución ( $r = -0.76$ ,  $p < 0.001$ ), donde las variedades blancas 82w21 a primavera mostraron tener una distribución tendiente a monomodal.

Respecto a la caracterización proximal (Figura 2.19), las variedades blancas mostraron tener el mayor contenido de humedad ( $r = 0.68$ ,  $p < 0.001$ ), cenizas ( $r = 0.59$ ,  $p < 0.01$ ), carbohidratos ( $r = -0.64$ ,  $p < 0.001$ ), fibra total e insoluble ( $r = 0.56$ ,  $p < 0.01$ ), fibra soluble ( $r = 0.68$ ,  $p < 0.001$ ) y almidón resistente ( $r = 0.52$ ,  $p < 0.01$ ).

Las propiedades de pasta como la viscosidad inicial ( $r = -0.49$ ,  $p < 0.05$ ), máxima ( $r = -0.52$ ,  $p < 0.01$ ), mínima ( $r = -0.52$ ,  $p < 0.01$ ), final y retrogradación ( $r = -0.58$ ,  $p < 0.01$ ) fueron más altas en las variedades rojas, observándose el mismo comportamiento con las propiedades térmicas (Figura 2.19).

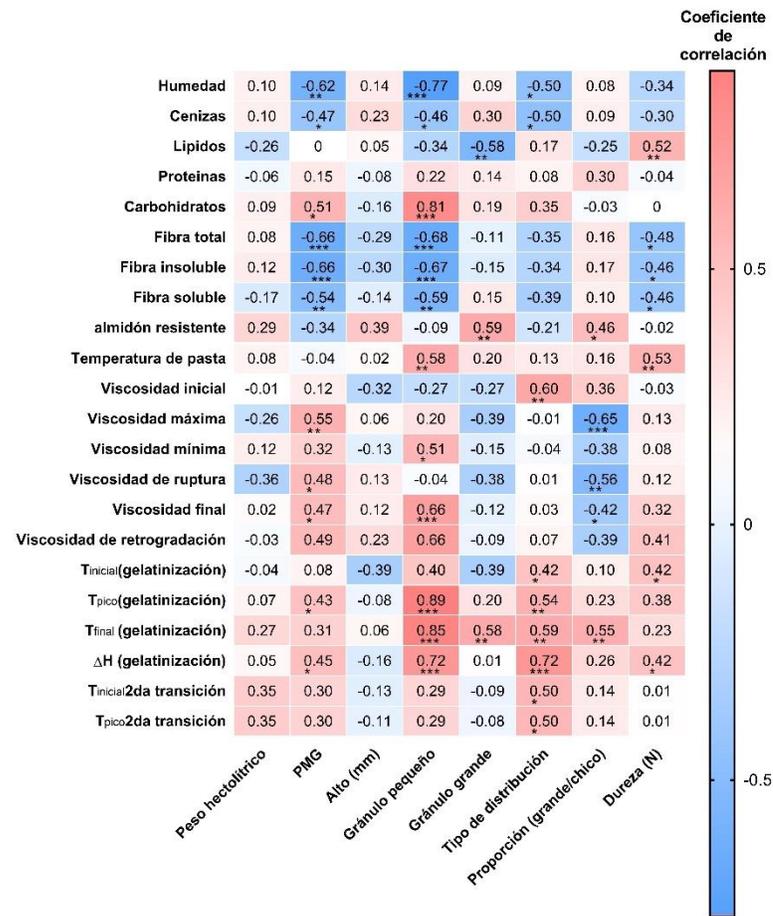


Figura 2.20 Coeficientes de correlación entre las propiedades físicas del grano y las propiedades de pasta, térmicas, y proximal. \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ .

Se observó una relación entre las propiedades fisicoquímicas del grano y la caracterización proximal, de tal manera que el peso de mil granos disminuyó respecto al contenido de humedad ( $r = -0.62$ ,  $p < 0.01$ ), el contenido de cenizas ( $r = -0.47$ ,  $p < 0.05$ ) y fibras ( $r = -0.66$ ,  $p < 0.001$ ), mientras que entre mayor fue el contenido de carbohidratos mayor fue el peso de mil granos ( $r = 0.51$ ,  $p < 0.05$ ), sugiriendo que los carbohidratos son los uno de los componentes con mayor aporte al peso de mil granos.

Por otro lado, la diferencia entre el tipo de distribución del tamaño de almidón en los granos resulta ser efecto de la humedad, ya que el tamaño del granulo, la distribución y proporción tienden a homogenizarse respecto al incremento del contenido de humedad en el grano ( $r = -0.77$ ,  $p < 0.001$ ), de tal manera que variedades con



mayor humedad tendrán gránulos de almidón más grandes. Por otro lado, los gránulos pequeños se han asociado a un mayor contenido de carbohidratos ( $r=0.81$ ,  $p<0.001$ ), fibra total ( $r=0.81$ ,  $p<0.81$ ), fibra soluble e insoluble ( $r=0.67$ ,  $p<0.001$ ), sin embargo, esto podría ser efectos de concentración por los diferentes contenidos de humedad en el grano. La incidencia en gránulos grandes se ve afectada por el contenido de lípidos ( $r=-0.58$ ,  $p<0.01$ ), donde variedades con mayores contenidos de lípidos presentan menores tamaño de gránulos de almidón, probablemente esta relación es debido a las propiedades hidrofóbicas de los lípidos los cuales, al estar dispersos en la matriz del sorgo, pudieran estar evitando la difusión de agua en el gránulo de almidón, lo que sería coherente con las correlaciones mencionadas previamente. Por otro lado, las variedades con gránulos de almidón grande presentan los mayores contenidos de almidón resistente ( $r=0.59$ ,  $p<0.01$ ), mientras que al tener gránulos de almidón más pequeños se reduce el contenido de almidón resistente (proporción [grande/chico],  $r=-0.46$ ,  $p<0.05$ ), por lo que se puede pensar que al poseer un menor tamaño estos son más accesibles a la hidrólisis enzimática.

Se observó una tendencia a tener mayores valores de dureza en variedades con altos contenidos de lípidos ( $r=0.52$ ,  $p<0.01$ ), mientras que las variedades más suaves mostraron los mayores contenidos de fibra ( $r=-0.48$ ,  $p<0.05$ ).

Las características del gránulo de almidón afectan el perfil de viscosidad (Figura 2.20), de tal manera que las variedades que muestran gránulos pequeños tienen temperaturas de pasta más elevadas ( $r=0.58$ ,  $p<0.01$ ), viscosidades mínimas más altas ( $r=0.51$ ,  $p<0.05$ ) al igual que la viscosidad final ( $r=0.66$ ,  $p<0.001$ ), mostrando mayor valor en la retrogradación ( $r=0.66$ ,  $p<0.001$ ).

El tipo de distribución del tamaño de gránulo de almidón ayuda a tener una viscosidad inicial alta ( $r=0.60$ ,  $p<0.01$ ), mientras que la proporción de estos reduce la viscosidad máxima ( $r=-0.65$ ,  $p<0.001$ ), le brinda una mayor integridad al gránulo después del hinchamiento disminuyendo la viscosidad de ruptura ( $r=-0.56$ ,  $p<0.01$ ) y la viscosidad final ( $r=-0.42$ ,  $p<0.05$ ). Por otro lado, la dureza del grano afecta la temperatura de pasta,



donde sorgos duros requieren una mayor temperatura para iniciar la gelatinización ( $r=0.53$ ,  $p<0.01$ ), finalmente se obtienen valores de retrogradación altos ( $r=0.41$ ,  $p<0.05$ ).

Las propiedades térmicas (Figura 2.20) mostraron en forma general la misma relación que las propiedades de pasta, donde se observa que granos con mayor PMG tendrán temperaturas ( $r=0.43$ ,  $p<0.05$ ) de gelatinización más elevadas, y estos, al tener un mayor contenido de carbohidratos requerirán más energía para llevar a cabo la gelatinización ( $r=0.45$ ,  $p<0.05$ ). El tamaño de gránulo en el almidón y la distribución de estos determina en gran medida la temperatura y la energía para llevar a cabo la gelatinización del almidón, por lo que a mayores tamaños de gránulos se requiere mayor temperatura para iniciar la gelatinización ( $r=0.42$ ,  $p<0.05$ ) y alcanzar la gelatinización media ( $r=0.54$ ,  $p<0.01$ ), traduciéndose en una temperatura final alta ( $r=0.59$ ,  $p<0.01$ ) y un requerimiento mayor de energía para llevar a cabo este proceso ( $r=0.72$ ,  $p<0.001$ ). La segunda transición encontrada a los 125 °C mostró relacionarse como la proporción del tamaño de gránulos ( $r=0.50$ ,  $p<0.05$ ). De igual manera, como se observó para las propiedades de pasta, la dureza del grano afecta la temperatura a la que inicia la gelatinización y la energía requerida para esto ( $r=0.42$ ,  $p<0.05$ ).

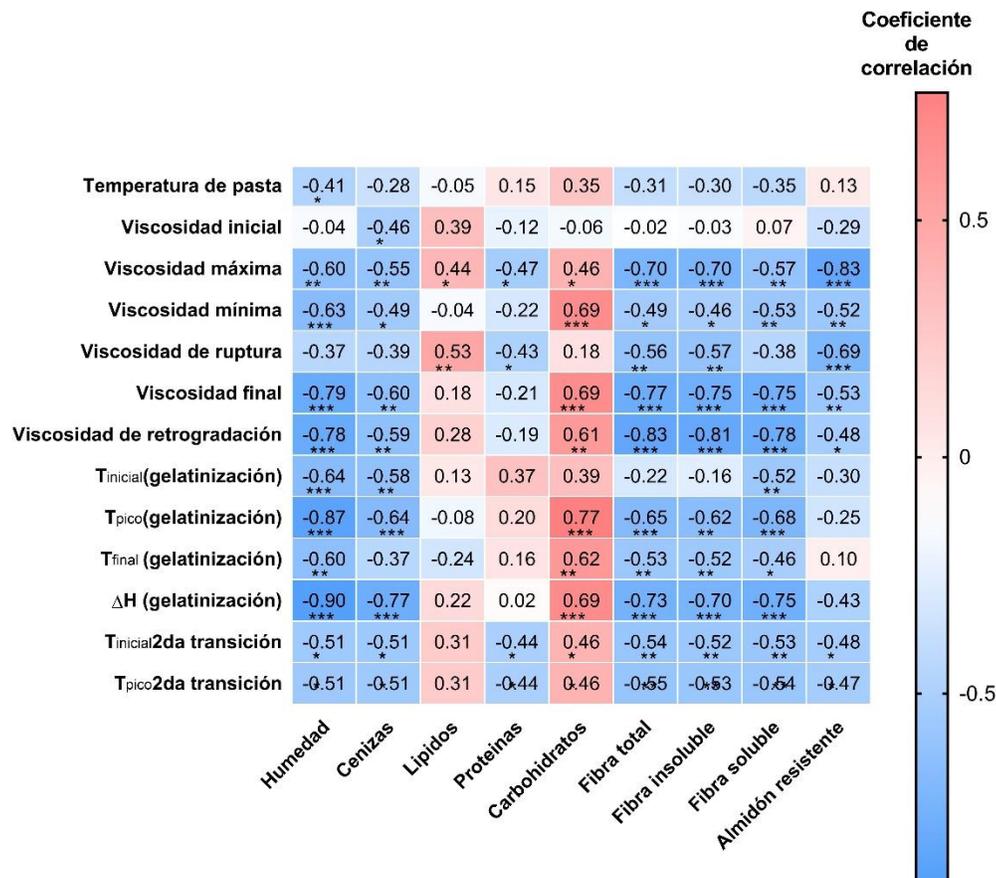


Figura 2.21 Coeficientes de correlación entre los atributos proximales del grano y las propiedades de pasta y térmicas. \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ .

Respecto a las propiedades de pasta (Figura 2.21), se observó que el contenido de humedad disminuye la temperatura de pasta ( $r = -0.41$ ,  $p < 0.05$ ), viéndose más afectadas la viscosidad máxima ( $r = -0.60$ ,  $p < 0.01$ ), mínima ( $r = -0.63$ ,  $p < 0.001$ ), final ( $r = -0.79$ ,  $p < 0.001$ ) y de retrogradación ( $r = -0.78$ ,  $p < 0.001$ ). El contenido de cenizas mostró la misma tendencia que la humedad. La presencia de lípidos en el sorgo aumenta la viscosidad máxima ( $r = 0.44$ ,  $p < 0.05$ ), así como la viscosidad de ruptura ( $r = 0.53$ ,  $p < 0.01$ ). Por otro lado, las proteínas disminuyen la viscosidad máxima ( $r = -0.47$ ,  $p < 0.05$ ), pero ayudan a mantener la integridad del gel después del proceso de gelatinización, denotándose en una reducción de la viscosidad de ruptura ( $r = -0.43$ ,  $p < 0.05$ ). La abundancia de carbohidratos en el sorgo ayuda a tener valores altos de viscosidad



máxima ( $r=0.46$ ,  $p<0.05$ ), mínima ( $r=0.69$ ,  $p<0.001$ ), final ( $r=0.69$ ,  $p<0.001$ ) y de retrogradación ( $r=0.61$ ,  $p<0.01$ ). Mientras que la fibra total, insoluble y soluble al ser un buen captador de agua compite con el almidón, reduciendo el agua disponible para su hinchamiento reflejándose en una disminución de la viscosidad máxima ( $r=-0.70$ ,  $p<0.001$ ), mínima ( $r=-0.49$ ,  $p<0.05$ ), final ( $r=-0.77$ ,  $p<0.001$ ) y de retrogradación ( $r=-0.83$ ,  $p<0.001$ ). El contenido de almidón resistente presentó un efecto similar al de la fibra, siendo más acentuado su efecto sobre la reducción de la viscosidad máxima ( $r=-0.83$ ,  $p<0.001$ ) y la viscosidad de ruptura ( $r=-0.69$ ,  $p<0.001$ ).

Para las propiedades térmicas, el contenido de humedad y ceniza presentó el mismo efecto que para las propiedades de pasta (Figura 2.21). Los carbohidratos totales se relacionaron positivamente con todas las propiedades térmicas ( $r=0.62$ ,  $p<0.01$ ), mientras que el contenido de fibra mostró disminuir estas propiedades ( $r=0.53$ ,  $p<0.01$ ).

La transición ubicada a los 125 °C mostró una tendencia a aumentar cuando disminuyó el contenido de proteínas ( $r=-0.44$ ,  $p<0.05$ ), fibra total ( $r=-0.54$ ,  $p<0.01$ ), insoluble ( $r=-0.52$ ,  $p<0.01$ ), soluble ( $r=-0.53$ ,  $p<0.01$ ) y almidón resistente ( $r=-0.47$ ,  $p<0.05$ ). Contrariamente, el contenido de carbohidratos se relacionó positivamente con esta transición ( $r=0.46$ ,  $p<0.05$ ). Por lo que se puede esperar que esta transición sea resultado de la interacción de los carbohidratos y otro componente de la matriz del sorgo.

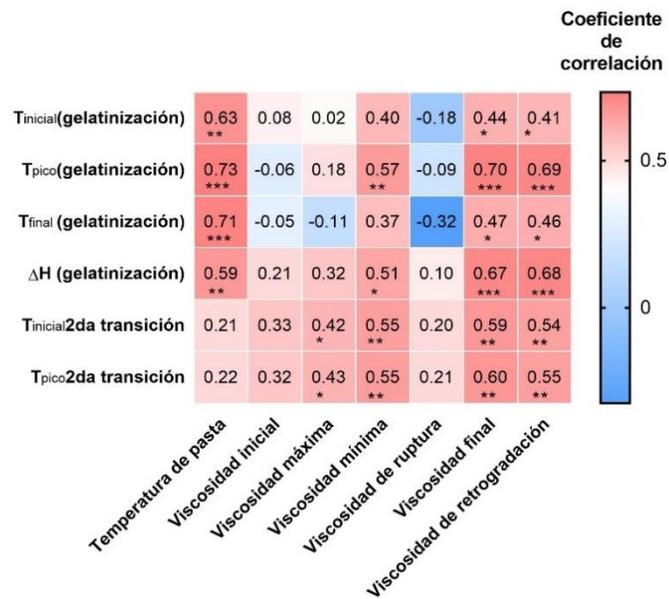


Figura 2.22 Coeficientes de correlación entre las propiedades de pasta y las propiedades térmicas. \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ .

Finalmente, en la Figura 2.22 se puede observar que la temperatura de pasta se correlacionó fuertemente con las temperaturas ( $r=0.63$ ,  $p < 0.001$ ) y energía de gelatinización ( $r=0.59$ ,  $p < 0.01$ ). La viscosidad mínima se relacionó con la temperatura pico ( $r=0.57$ ,  $p < 0.01$ ) y la energía de gelatinización ( $r=0.51$ ,  $p < 0.05$ ). La viscosidad final y de retrogradación se correlacionaron con la temperatura inicial y final ( $r=0.44$ ,  $p < 0.05$ ), así como con la energía de gelatinización ( $r=0.67$ ,  $p < 0.001$ ). Por otro lado, segunda transición se asoció con la viscosidad máxima ( $r=0.42$ ,  $p < 0.05$ ), mínima ( $r=0.55$ ,  $p < 0.01$ ), viscosidad final ( $r=0.59$ ,  $p < 0.01$ ) y de retrogradación ( $r=0.55$ ,  $p < 0.01$ ).



## 2.4 Conclusiones del capítulo

Las variedades de sorgo estudiadas pueden ser catalogadas como de primera calidad de acuerdo con la NMX-FF-037-1994 con base en sus propiedades fisicoquímicas, mientras que pueden ser aptas para el consumo humano acorde a los requerimientos del CODEX *Alimentarius*. Particularmente, se destacan las variedades blanca Paloma y la roja 81g67 como candidatas aptas para obtener las mejores características volumétricas en el explotado dadas sus características físicas como dureza, contenido de endospermo corneo, peso hectolítrico. Aunado a esto, presentaron los mejores aspectos nutricionales y nutracéuticos.

Características como el tamaño de gránulos de almidón y el tipo de distribución de tamaño de gránulo de almidón mostró correlacionarse con la entalpía de gelatinización DH y con la DT, de tal manera que, a mayor diferencia entre los tamaños de gránulos (homogeneidad) mayor será el valor  $\Delta T$ . Por otro lado, las propiedades de pasta de los sorgos crudos mostraron una tendencia a disminuir la viscosidad de ruptura (breakdown) y final en variedades con alto contenido de fibra, mayor proporción de gránulos de almidón grandes, mayor contenido de AR y proteína. Por lo que, en primera instancia, estos componentes podrían impedir la difusión del agua al interior del gránulo de almidón, afectando las temperaturas de gelatinización y posteriormente, después de la gelatinización del almidón, ayudan a mantener la estabilidad de las pastas obtenidas.



---

### Capítulo 3 : Relación entre las características fisicoquímicas del sorgo crudo y la calidad del sorgo explotado

---



## Resumen del capítulo

En este Capítulo se muestra la relación que guardan las características fisicoquímicas del sorgo crudo y la calidad del sorgo explotado. Por otro lado, se muestra cómo es que las características físicas del grano como el peso hectolítrico, grosor del pericarpio, peso de mil granos, entre otros pueden afectar los atributos de calidad del sorgo explotado. Más aun, se puntualiza como el contenido de endospermo corneo, así como el tipo de distribución y el tamaño de granulo como factores determinantes para asegurar los mejores atributos del explotado. Es importante destacar que en este capítulo no se mencionan resultados previamente discutidos en el Capítulo 2, por lo que en caso de ser necesario les pedirá dirigirse al mismo.

Brevemente, se evaluaron las características físicas y microestructurales de las variedades de sorgo cruda. Con base en análisis preliminares se estandarizó un método para la obtención del explotado de los granos de sorgo ajustados previamente a un 11% de humedad y se explotaron a 210 °C por 90 s usando aire caliente. Se midió el número de granos explotados, el volumen de expansión y el tamaño del explotado. El contenido de proteína se correlacionó positivamente con el número de granos explotados. Así mismo, la matriz de correlación mostró que propiedades físicas como el grosor del pericarpio, el peso hectolítrico y el tipo de endospermo son cruciales para obtener sorgo explotado. Un alto porcentaje de endospermo córneo y la distribución de tamaño de los gránulos de almidón en el endospermo harinoso determinan la capacidad de explotar del sorgo. El análisis de los principales componentes mostró que la variedad Paloma es la más adecuada para obtener explotados.



### 3.1 Introducción

Las palomitas o explotados son una botana que se ha consumido desde tiempos ancestrales, éstas se obtienen mediante un proceso de expansión que consiste en someter el grano de maíz a altas temperaturas en un corto tiempo (HTST), dando lugar a la gelatinización parcial y la expansión del endospermo después de la ruptura del pericarpio (Mishra et al., 2014). El pericarpio y su grosor juegan un papel fundamental en el proceso de explotado, ya que funcionan como un recipiente a presión (Mishra et al., 2014; Vázquez-Carrillo et al., 2019). El número de granos explotado, el volumen de expansión y el tamaño del explotado son las principales variables que se reportan para la evaluación de la calidad de este producto (Vázquez-Carrillo et al., 2019).

Históricamente se han utilizado diversos granos para el proceso de explotado como el trigo, el arroz, el amaranto, el sorgo y el maíz, siendo este último uno de los más utilizados (Mishra et al., 2014). En ese sentido, el sorgo es un grano que se ha utilizado en algunas regiones de Europa y Asia para obtener explotados, siendo la India uno de los principales consumidores de explotados de sorgo (Dayakar Rao, 2019). Varios estudios se han centrado en la obtención de sorgo explotado "popsorghum" (como homólogo de las "palomitas de maíz"), sin embargo, la mayoría de ellos se han enfocado en las condiciones de procesamiento y el rendimiento de las variedades euroasiáticas (Golubinova et al., 2017; Mishra et al., 2015; Sharma et al., 2014; Tymchak et al., 2018).

Sharma et al. (2014) probaron diferentes métodos y condiciones de procesamiento para obtener explotados de sorgo (variedad CSV-15), concluyendo que con un 18 % de humedad y un horno de microondas al 100% de su potencia era posible obtener explotados de sorgo con buenas características. Por otro lado, Mishra et al. (2015b) evaluaron el efecto de las características fisicoquímicas de diferentes variedades de sorgo sobre su rendimiento de explotado utilizando un horno de microondas. Los autores encontraron que las variedades con granos pequeños, alta densidad aparente, dureza media, alto contenido de amilosa y pericarpio grueso mostraron el mejor rendimiento de explotado. Posteriormente, Mishra et al. (2015a) propusieron un



pretratamiento para optimizar la calidad del sorgo explotado en horno de microondas doméstico, encontrando que un pretratamiento con 16.62 % de humedad, 0.55 % de sal y 10% de aceite, garantizaba las mejores características del producto tales como el rendimiento y volumen de expansión, así como una mayor aceptación sensorial.

En América, algunos estudios se han centrado en las características genéticas y los factores climáticos que determinan la calidad del sorgo reventado, así como en las características de calidad del grano explotado y su posible uso como aditivo en el desarrollo de alimentos funcionales como barras y galletas (Kumari et al., 2019; Llopart y Drago, 2016; Paiva et al., 2018). Llopart y Drago (2016) evaluaron la relación entre las características fisicoquímicas de 28 variedades de sorgo y su aptitud para explotar empleando la metodología de lecho fluidizado (250°C durante 1 min), encontrando que los sorgos duros presentaban las mejores características de estallido. Además, los autores observaron que las variedades blancas tendían a mostrar los mejores atributos en el explotado.

En el caso de maíz palomero, se ha reportado que el endospermo representa hasta el 80% del total del grano. Este endospermo está formado por dos fracciones: una opaca (endospermo harinoso) y otra translúcida, conocida como endospermo vítreo (corneo) (Hoseney et al., 1983). Las variedades de maíz abolladas han mostrado un menor contenido de endospermo vítreo (<40 %) en comparación con las variedades dentadas y palomeras (45-70%) (Larkins, 2019; Vázquez-Carrillo et al., 2019; Xu et al., 2019). En ese sentido, Hoseney et al. (1983) sugirieron que el contenido de endospermo vítreo puede ser uno de los factores más importantes que promueven las características del explotado en el maíz. Asimismo, Larkins (2019) reportó que los altos volúmenes de expansión de los explotados de maíz se correlacionaban positivamente con un pericarpio más grueso, así como con un mayor contenido de endospermo vítreo y un alto contenido de amilosa.

Como se puede apreciar, actualmente existen discrepancias entre los autores sobre cuáles son las características fisicoquímicas en el sorgo que permitan la obtención de explotados de calidad. Por otro lado, se tiene el paradigma de que el sorgo, al ser un



cereal similar al maíz, deberá mostrar el mismo comportamiento que este. Por lo tanto, el objetivo de este capítulo fue mostrar cómo es que las propiedades fisicoquímicas del sorgo se relacionan con las características de calidad del explotado.

En este capítulo se muestra la relación que guardan las características proximales (proteína, lípidos, cenizas, carbohidratos) del sorgo crudo con la calidad del explotado. Por otro lado, se muestra cómo es que las características físicas del grano como el peso hectolítrico, grosor del pericarpio, peso de mil granos, entre otros pueden afectar los atributos de calidad del sorgo explotado. Además, se muestra como el contenido de endospermo corneo, así como el tipo de distribución y el tamaño de gránulo, son factores determinantes para asegurar los mejores atributos del explotado de sorgo. Con lo anterior, este capítulo está alineado en el cumplimiento del segundo y tercer objetivo específico de la investigación.



## 3.2 Materiales y métodos

### 3.2.1 Material biológico

Se utilizaron los sorgos previamente descritos en el capítulo 1 apartado 2.2.2, página 21.

### 3.2.2 Métodos

#### 3.2.2.1 Caracterización física del sorgo crudo

La caracterización de las variedades de sorgo se llevó a cabo siguiendo las metodologías descritas previamente en el capítulo 1 (ver apartado 2.2.3.2 para mayor detalle). Se determinó el peso hectolítrico siguiendo la metodología descrita por (AACC, 2000), método 84-10. Por otro lado, la determinación del peso de mil granos, el tamaño del grano y la esfericidad siguiendo los métodos reportados por Mishra *et al.*, (2015), Cabrera-Ramírez (2015) y Ordoñez *et al.* (2012), respectivamente.

La dureza del grano se determinó en un texturómetro (Lloyd TAPlus) con una punta plana de 1 cm de diámetro y una velocidad de 2 mm/s, expresando los resultados como la fuerza máxima (N) para lograr 70% de compresión.

#### 3.2.2.2 Evaluación de la microestructura del sorgo crudo

Para la evaluación de la microestructura se siguió la metodología previamente descrita en detalle en el apartado 2.2.3.4.1. Por otro lado, se determinó la distribución del tamaño de gránulo de almidón en cada una de las variedades empleando las micrografías obtenidas. Adicionalmente, mediante el uso del software Penom Viewer 1.7 se realizó la medición de del grosor del pericarpio.

#### 3.2.2.3 Determinación del contenido de endospermo córneo y harinoso en los sorgos crudos

Para determinar el contenido de endospermo córneo y harinoso, los granos de sorgo se cortaron longitudinalmente obteniendo una superficie lo más plana posible. Utilizando una solución coloidal de carbono, el grano se colocó en el porta muestras con



cinta de carbono, se niveló y se dejó secar a temperatura ambiente (27 °C) durante 60 segundos. Las imágenes se adquirieron en el modo óptico (36x), utilizando el mismo equipo de SEM (apartado 2.2.3.4.1). Con el fin evaluar el contenido de endospermo, se realizó una segmentación de estas siguiendo la metodología descrita por Arriaga-Pérez et al. (2019), que consistió en la aplicación de un filtro en blanco y negro, así como un ajuste del umbral de la imagen para definir el endospermo sujeto de estudio. Finalmente, utilizando el software ImageJ (v1.52<sup>a</sup>), se midió el área ocupada por el endospermo (píxeles<sup>3</sup>). El contenido de endospermo en cada fracción se calculó utilizando la Ecuación 3.1, mientras que la relación entre el endospermo córneo y el harinoso se calculó utilizando la Ecuación 3.2.

Ecuación 3.1 Contenido de endospermo.

$$\text{Contenido de endospermo (\%)} = \left( \frac{A_i}{(AC + AH)} \right) * 100$$

Ecuación 3.2 Relación entre el contenido de endospermo corneo y harinoso.

$$\text{Relación (corneo/harinos)} = \frac{AC}{AH}$$

Donde:

AC: área del endospermo corneo (píxeles<sup>3</sup>)

AH: área del endospermo harinoso (Píxeles<sup>3</sup>)

A: área del endospermo a ser cuantificado (corneo o harinoso) (píxeles<sup>3</sup>)

### 3.2.2.4 Caracterización proximal del sorgo crudo

La determinación de las características proximales se realizó siguiendo las metodologías de la AOAC (2002). Humedad (método 44-16.01), la proteína se determinó por el método de Kjeldahl (método 46.16.01, Nx6.25), lípidos (método 30-25.01) y cenizas (método 942.05), fibra insoluble, soluble y fibra dietaria total (método 32.07.01). Finalmente, el contenido de carbohidratos se calculó por diferencia.



### 3.2.2.5 Obtención del sorgo explotado

#### 3.2.2.5.1 Pretratamiento del grano

Basado en análisis preliminares, a 30 g de granos de sorgo se les ajustó la humedad, para ello se empleó la ecuación descrita por Mamani (2015) (Ecuación 3.3). Una vez que se añadió la cantidad de agua destilada necesaria para ajustar la humedad, los granos se dejaron en reposo por dos días a 4 °C en bolsas selladas. Transcurrido el tiempo de reposo, los sorgos fueron sometidos a un proceso de secado a 50 °C por 3 min en un deshidratador (3900 B, Excalibur Dehydrators, Sacramento, CA, EE. UU.) con el fin de remover la humedad superficial del grano. Este proceso se realizó para cada variedad.

Ecuación 3.3 Cálculo de los gramos de agua necesarios para ajustar a la humedad deseada en el grano.

$$H_2O (g) = \frac{\text{Peso inicial (g)} * (\text{Humedad final (\%)} - \text{Humedad inicial (\%)})}{100 - \text{Humedad final (\%)}}$$

#### 3.2.2.5.2 Proceso de explotado

Los granos de sorgo (humedad ajustada al 11 %) fueron explotados en una cámara de aire caliente (marca Sunbeam), a la cual se le colocó un control de temperatura (Autonics TC4S) para estabilizar la temperatura del aire a 210 °C. Los granos de sorgo fueron sometidos al aire caliente durante 90 segundos.

### 3.2.2.6 Calidad del sorgo explotado

#### 3.2.2.6.1 Volumen aparente y tamaño del explotado

El volumen aparente del explotado se determinó mediante la técnica del desplazamiento de arena (Llopart y Drago, 2016). Por otro lado, para conocer el tamaño del explotado (cm<sup>3</sup>), el volumen total de los granos explotados fue dividido por el número total de granos explotados (Vázquez-Carrillo et al., 2019).



### 3.2.2.6.2 Volumen de expansión

Empleando la ecuación publicada por Mishra et al. (2015b), se calculó el volumen de expansión. El volumen de expansión es la relación entre el volumen final del explotado de sorgo ( $V_f$ ) sobre el volumen del grano crudo ( $V_i$ ), como se muestra en la ecuación 3.4.

Ecuación 3.4 Cálculo del volumen de expansión.

$$\text{Volumen de expansión (adimensional)} = \frac{V_f}{V_i}$$

### 3.2.2.7 Análisis estadístico

Los resultados se expresaron como la media  $\pm$  desviación estándar (SD) de al menos tres experimentos independientes. Utilizando el programa estadístico Minitab 18, se realizó un análisis ANOVA (análisis de varianza) con una comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para ilustrar la conexión entre las características del sorgo crudo y del sorgo reventado. Finalmente, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para determinar la contribución de cada parámetro evaluado al comportamiento general de los datos; por lo tanto, permitiendo identificar qué propiedades influyen en los atributos del sorgo reventado.

### 3.3 Resultados y discusiones

Con el fin de evitar duplicación y repetición en la discusión de los datos, las secciones de propiedades físicas, proximales y microestructurales del sorgo crudo no se muestran en este Capítulo. Sin embargo, si se desea revisar la información puede dirigirse al capítulo 1 en las secciones 2.3.2, 2.3.3 y 2.3.5, respectivamente, para encontrar más detalles sobre los resultados encontrados.

#### 3.3.1 Contenido de endospermo corneo y harinoso en los sorgos crudos

En la Figura 3.1 se muestran los resultados obtenidos de la segmentación de imágenes para cuantificar el área ocupada por las fracciones de endospermo harinoso y endospermo corneo.

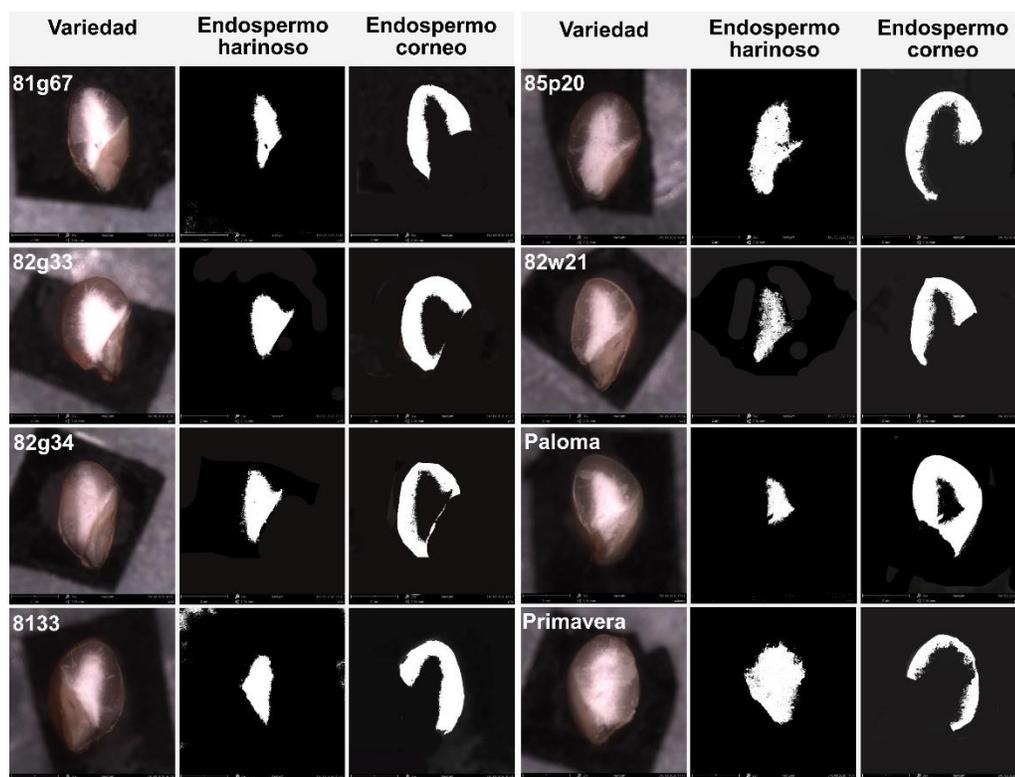


Figura 3.1 Segmentación de imágenes para la obtención de las fracciones de endospermo harinoso y corneo de las variedades de sorgo estudiadas



Por otro lado, en la Tabla 3.1 se muestran los resultados del contenido de endospermo harinoso y córneo, así como la relación entre el endospermo córneo y el harinoso. Para el contenido de endospermo corneo se observó una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre las variedades. La variedad Paloma mostró el mayor contenido de endospermo córneo, con  $84.4 \pm 0.5$  %, mientras que la variedad Primavera tuvo la menor cantidad con  $34.8 \pm 0.3$  %. En cuanto al contenido de endospermo harinoso, se observaron diferencias estadísticas ( $p < 0.05$ ) entre variedades, donde la variedad Primavera fue la de mayor contenido, con  $65.2 \pm 0.3$ %, mientras que la variedad Paloma fue la de menor contenido con  $15.6 \pm 0.5$  %.

Tabla 3.1 Contenido de endospermo harinoso, corneo y la relación corneo/harinoso en las variedades de sorgo crudo

Variedad	Endospermo corneo (%)	Endospermo harinoso (%)	Relación C/H
<b>Sorgos rojos</b>			
81g67	$67.6 \pm 0.5^b$	$32.4 \pm 0.5^g$	$2.1 \pm 0.1^b$
82g93	$63.1 \pm 0.1^d$	$37.0 \pm 0.1^d$	$1.7 \pm 0.1^c$
82g34	$57.8 \pm 0.3^e$	$42.2 \pm 0.3^c$	$1.4 \pm 0.1^d$
8133	$66.2 \pm 0.2^c$	$33.8 \pm 0.2^e$	$2.1 \pm 0.1^b$
85p20	$51.6 \pm 0.6^f$	$48.4 \pm 0.6^b$	$1.1 \pm 0.1^e$
<b>Sorgos blancos</b>			
82w21	$67.8 \pm 0.1^b$	$32.2 \pm 0.1^f$	$2.1 \pm 0.0^b$
Paloma	$84.4 \pm 0.5^a$	$15.6 \pm 0.5^g$	$5.4 \pm 0.2^a$
Primavera	$34.8 \pm 0.3^g$	$65.2 \pm 0.3^a$	$0.5 \pm 0.0^f$

Se muestra la media  $\pm$  la desviación estándar de tres experimentos independientes. Letras diferentes indican diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) entre variedades en el parámetro evaluado. C: endospermo corneo; H: endospermo harinoso.

Respecto a la relación entre el contenido de endospermo corneo/harinoso, se observó la misma tendencia que la mostrada por el endospermo corneo. La variedad Paloma tuvo la proporción más alta con 5.4, mientras que las otras oscilaban entre 0.5 y 2.1. Se han reportado contenidos de endospermo corneo que van de 59 a 84 % para



diferentes cultivares de sorgo (Ioerger et al., 2007), lo cual está en concordancia con los valores encontrados en este estudio a excepción de la variedad Primavera.

Comparando resultados obtenidos con aquellos reportados para variedades de maíz palomero, se ha observado que, dependiendo de la variedad de maíz, estos granos pueden tener entre un 9 y 30 % de endospermo harinoso (Vázquez-Carrillo et al., 2019). Por otro lado, se ha reportado que las variedades de maíz con altos contenidos de endospermo vítreo (corneo) han mostrado tener las mejores características de expansión (Pordesimo et al., 1990; Serna-Saldivar y Perez Carrillo, 2019). Es importante destacar que, en el caso del sorgo, hasta donde se sabe, la relación del contenido de endospermo y las características del sorgo explotado no ha sido reportada.

### 3.3.2 Propiedades del explotado de sorgo

La Tabla 3.2 muestra los parámetros de calidad de la explotado de sorgo, como el número de granos reventados y no reventados, así como el tamaño del grano explotado y el volumen de expansión para cada variedad de sorgo. En cuanto al número de granos reventados y no reventados, se encontraron diferencias estadísticas entre las variedades ( $p < 0.05$ ). Se observó que la variedad Paloma presentó el mayor número de granos reventados, con  $71.5 \pm 2.3$  %. Por el contrario, la variedad Primavera presentó el menor número de granos reventados con  $42.4 \pm 4.1$  %. Lo anterior clasifica a la variedad Paloma con el mejor rendimiento (No. de granos reventados), seguida de 81g67 con 71.5 % y 57.3 %, respectivamente. Cabe señalar que la variedad de 81g67 mostró el pericarpio más grueso ( $56.1 \pm 3.2$   $\mu\text{m}$ ), mientras que la variedad Primavera mostró el más delgado ( $23.7 \pm 3.7$   $\mu\text{m}$ ). De acuerdo con lo reportado para variedades de sorgo cultivadas en la India, Mishra et al. (2015b) encontraron que las variedades con el pericarpio más grueso mostraban las mejores características para el explotado en horno de microondas. En este sentido, se ha reportado que el número de granos de sorgo explotados depende directamente de la variedad y del contenido de humedad, reportándose rendimientos del 40 % al 92 % (Golubinova et al., 2017; Mishra et al., 2015; Rooney y Rooney, 2013).



Tabla 3.2 Parámetros de calidad de la explotado de sorgo

Variedad	Granos explotados (%)	Granos no explotados (%)	Tamaño del explotado (cm <sup>3</sup> )	Volumen de expansión
<b>Sorgos rojos</b>				
81g67	57.32 ± 0.74 <sup>ab</sup>	42.68 ± 0.74 <sup>ab</sup>	1.34 ± 0.19 <sup>a</sup>	1.88 ± 0.1 <sup>a</sup>
82g93	51.56 ± 6.77 <sup>b</sup>	48.44 ± 6.77 <sup>a</sup>	1.25 ± 0.33 <sup>a</sup>	1.11 ± 0.36 <sup>b</sup>
82g34	45.68 ± 11.25 <sup>b</sup>	54.32 ± 11.73 <sup>a</sup>	1.14 ± 0.05 <sup>ab</sup>	1.61 ± 0.25 <sup>a</sup>
8133	56.94 ± 5.28 <sup>ab</sup>	43.06 ± 5.28 <sup>ab</sup>	0.75 ± 0.1 <sup>bc</sup>	0.58 ± 0.02 <sup>c</sup>
85p20	54.06 ± 4.7 <sup>b</sup>	45.94 ± 4.7 <sup>a</sup>	0.68 ± 0.15 <sup>c</sup>	0.63 ± 0.1 <sup>c</sup>
<b>Sorgos blancos</b>				
82w21	52.25 ± 1.51 <sup>b</sup>	47.76 ± 1.51 <sup>a</sup>	0.51 ± 0.09 <sup>c</sup>	0.33 ± 0.03 <sup>c</sup>
Paloma	71.48 ± 2.26 <sup>a</sup>	28.52 ± 2.26 <sup>b</sup>	1.39 ± 0.05 <sup>a</sup>	1.13 ± 0.06 <sup>b</sup>
Primavera	42.32 ± 4.14 <sup>b</sup>	57.68 ± 4.14 <sup>a</sup>	0.52 ± 0.02 <sup>c</sup>	0.36 ± 0.02 <sup>c</sup>

Se presenta la media ± la desviación estándar de al menos tres experimentos independientes. Letras diferentes por renglón en la misma columna indican diferencia estadística (prueba de Tukey,  $p < 0.05$ ) en el parámetro evaluado.

Con relación al tamaño del explotado, las variedades Paloma, 81g67, y 82g93 mostraron ser estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ) al resto de los materiales estudiados, presentando los mayores tamaños con  $1.39 \pm 0.05 \text{ cm}^3$ ,  $1.34 \pm 0.19 \text{ cm}^3$  y  $1.24 \pm 0.33 \text{ cm}^3$ , respectivamente. Mientras que, en contraste, las variedades 85p20, 82w21 y Primavera presentaron los explotados más pequeños del conjunto con  $0.68 \pm 0.15 \text{ cm}^3$ ,  $0.52 \pm 0.02 \text{ cm}^3$  y  $0.51 \pm 0.09 \text{ cm}^3$ , respectivamente. El tamaño es un factor determinante en la calidad de los explotados, ya que la comercialización de este producto se basa en el volumen, por lo que se prefieren los tamaños más grandes. En los explotados de maíz, los tamaños oscilan entre 1.4 y 3.2 entre las diferentes variedades de granos de maíz palomero (Vázquez-Carrillo et al., 2019).

En cuanto al volumen de expansión, las variedades de 81g67 y 82g34 mostraron los mayores volúmenes de expansión, seguidas por Paloma y 82g93, las cuales mostraron un volumen de  $1.88 \pm 0.1$ ,  $1.61 \pm 0.3$ ,  $1.13 \pm 0.1$  y  $1.11 \pm 0.4$  veces mayor que el crudo, respectivamente. El resto de las variedades tuvieron los valores más bajos, con 0.4 a 0.6. Previamente, Mishra et al. (2015b) reportaron volúmenes de expansión del 9 al 15 % ( $\sim 0.09$  a  $0.15$ ) en diferentes sorgos; luego se observó que el volumen alcanzaba del 12



al 15% después de adicionar aceite (Mishra et al., 2015a). Los resultados encontrados en nuestro estudio son consistentes con los datos previamente reportados por Llopart y Drago (2016), quienes encontraron rendimientos de expandido entre 23 y 87 % dependiendo de la variedad de sorgo.

En resumen, las variedades Paloma, 81g67 y 82g34 mostraron el mejor tamaño del explotado y un mayor número de granos reventados, lo que las sitúa como buenas candidatas para el proceso de reventado, siendo la variedad Paloma la que garantiza los mayores rendimientos.

### 3.3.3 Relación entre las propiedades del sorgo crudo y explotado

En la Figura 2.2 se muestra la matriz de correlación entre las características proximales del sorgo crudo y los atributos del sorgo explotado, donde se puede apreciar que el contenido de cenizas se correlacionó positivamente con el radio del explotado ( $r=0.75, p<0.01$ ). Por otro lado, el contenido de proteína mostró una correlación positiva con el número de granos explotados ( $r=0.55, p<0.05$ ) y el radio del explotado ( $r=0.51, p<0.05$ ), mientras que se correlacionó negativamente con el número de granos no explotados ( $r=-0.55, p<0.05$ ). Lo anterior sugiere que la presencia de la proteína ayuda promover un aumento en el número de granos explotados, obteniendo explotados con un mayor radio (mm).

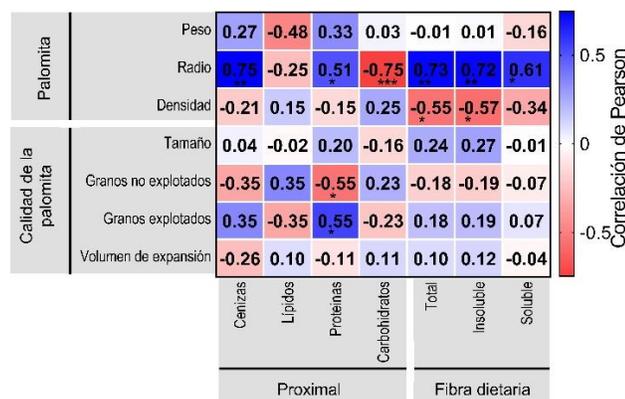


Figura 3.2 Matriz de correlación entre las características proximales del sorgo crudo y los atributos del sorgo explotado. Rojo y azul indican una correlación negativa y positiva, respectivamente. La intensidad del color indica la fuerza de la correlación, mientras que los asteriscos simbolizan el nivel de significación de la correlación (\*  $p<0.05$ , \*\*  $p<0.01$ , y \*\*\*  $p<0.001$ ).



La Figura 2.3 muestra la matriz de correlación entre las propiedades físicas del sorgo crudo y los atributos del sorgo explotado "*popsorghum*". De las propiedades físicas evaluadas, únicamente el peso hectolítrico y el grosor del pericarpio mostraron correlación con las características del sorgo explotado. Se encontró una correlación positiva entre el peso hectolítrico y el tamaño del explotado ( $r=0.54$ ,  $p<0.01$ ), por lo que el peso hectolítrico podría estar ayudando a mejorar la capacidad de explotar del sorgo, teniendo un mayor tamaño del explotado en variedades con altos valores de peso hectolítrico. En ese sentido, un mayor peso hectolítrico sugiere un mayor llenado del grano y por tanto una mayor compactación y mayor contenido de almidón.

Las características físicas del grano determinan inherentemente las propiedades y el rendimiento del grano expandido. En ese sentido, se ha reportado que el tamaño del grano y su forma, así como su densidad, afectan directamente el volumen del explotado (Mishra et al., 2014; Pordesimo et al., 1990). Por otro lado, Golubinova et al. (2017) mostraron la existencia de una correlación positiva entre el rendimiento de explotado con el contenido de humedad y la proteína bruta, mientras que el contenido de almidón se correlacionó negativamente. En el maíz, el peso hectolítrico y la esfericidad del grano son dos factores que se han correlacionado positivamente con el volumen de expansión del explotado (Pordesimo et al., 1990). Los resultados encontrados sugieren que, en el sorgo, el grosor del pericarpio y el peso del hectolitro son parámetros físicos que afectan positivamente a los atributos del sorgo explotado.

Las características del almidón en el endospermo harinoso mostraron una correlación significativa con las características del grano reventado (Figura 2.3). Una mayor abundancia de gránulos grandes en el endospermo harinoso se correlacionó positivamente con el número de granos reventados ( $r=0.57$ ,  $p<0.01$ ) y negativamente con el número de granos no reventados ( $r=-0.57$ ,  $p<0.01$ ). Esto significa que los gránulos grandes dispuestos en el endospermo de la harina permiten un mayor número de granos reventados, aumentando así el rendimiento de la variedad.

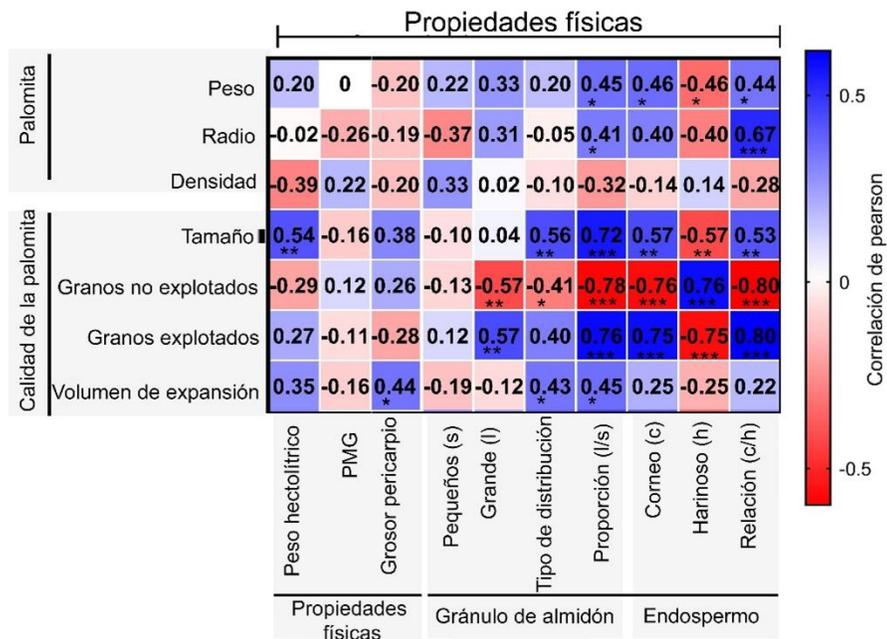


Figura 3.3 Matriz de correlación entre las propiedades físicas del sorgo crudo y los atributos del sorgo explotado. Rojo y azul indican una correlación negativa y positiva, respectivamente. La intensidad del color indica la fuerza de la correlación, mientras que los asteriscos simbolizan el nivel de significación de la correlación (\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , y \*\*\*  $p < 0.001$ ).

El tipo de distribución se correlacionó positivamente con el volumen de expansión ( $r=0.43$ ,  $p < 0.05$ ) y el tamaño de los granos reventados ( $r=0.56$ ,  $p < 0.01$ ). Mientras que los núcleos sin estallar estaban correlacionados negativamente ( $r=-0.41$ ,  $p < 0.05$ ); por lo tanto, un tipo de distribución bimodal podría tener mejores características como el volumen de expansión, produciendo granos más grandes con estallido y un menor número de granos sin explotar. Por otro lado, la proporción entre los gránulos de almidón grandes y pequeños mostró una correlación positiva con el volumen de expansión ( $r=0.45$ ,  $p < 0.05$ ), los granos reventados ( $r=0.76$ ,  $p < 0.001$ ), el radio del grano reventado ( $r=0.41$ ,  $p < 0.05$ ), y el peso del grano reventado ( $r=0.45$ ,  $p < 0.05$ ); mientras que el grano sin reventar se correlacionó negativamente ( $r=-0.78$ ,  $p < 0.001$ ). Basándonos en estos datos, se puede inferir que la presencia de gránulos de almidón grandes y pequeños en el endospermo harinoso es un factor clave. Sin embargo, la proporción de estos gránulos juega un papel vital durante el proceso de explotado,



donde las variedades con una proporción de 27:73 [chico:grande] (caso de Paloma) mostraron las mejores características y calidad del explotado.

En cuanto a las características del endospermo, el contenido del endospermo córneo se correlacionó positivamente con el número de granos explotados ( $r=0.75$ ,  $p<0.001$ ), el tamaño ( $r=0.57$ ,  $p<0.001$ ) y el peso del explotado ( $r=0.46$ ,  $p<0.05$ ); mientras que el número de granos no explotados se correlacionó negativamente ( $r=-0.76$ ,  $p<0.001$ ) con este parámetro. El contenido de endospermo harinoso se correlacionó negativamente con el número de granos reventados ( $r=-0.75$ ,  $p<0.001$ ), el tamaño ( $r=-0.57$ ,  $p<0.001$ ) y el peso del explotado ( $r=-0.46$ ,  $p<0.05$ ). Por el contrario, el número de granos no explotados se correlacionó positivamente ( $r=0.76$ ,  $p<0.001$ ) con el contenido de endospermo harinoso. La proporción de endospermo (córneo/harina) mostró una correlación positiva con el número de granos explotados ( $r=0.80$ ,  $p<0.001$ ), así como con el tamaño ( $r=0.53$ ,  $p<0.001$ ), el radio ( $r=0.67$ ,  $p<0.001$ ) y el peso del explotado ( $r=0.44$ ,  $p<0.05$ ); mientras que el número de granos no explotados se correlacionó negativamente ( $r=-0.80$ ,  $p<0.001$ ) con esta característica. El contenido de endospermo harinoso tiende a disminuir las características y la calidad del explotado, mientras que el endospermo córneo las promueve. Asimismo, la proporción de endospermos (córneo/harinoso) afecta directamente a las características y la calidad del sorgo explotado, donde las variedades con mayor proporción mostraron las mejores características para explotar.

Tomando como punto de partida lo anterior, la Figura 2.4a muestra una comparación esquemática de los posibles comportamientos entre los gránulos de almidón dispuestos en el endospermo harinoso y el tipo de distribución de almidón unimodal o bimodal durante el proceso de explotado. En una distribución monomodal, la matriz granular tiene múltiples espacios intergranulares (Figura 2.4a). Por lo tanto, durante el proceso de estallido, estos gránulos se centrarán en llenar los espacios vacíos, reduciendo la presión ejercida sobre el pericarpio, así como la diferencia de presión respecto la presión ambiental, lo que da lugar a explotados más pequeños y, en algunos casos, la presión no es suficiente para lograr que el grano explote.

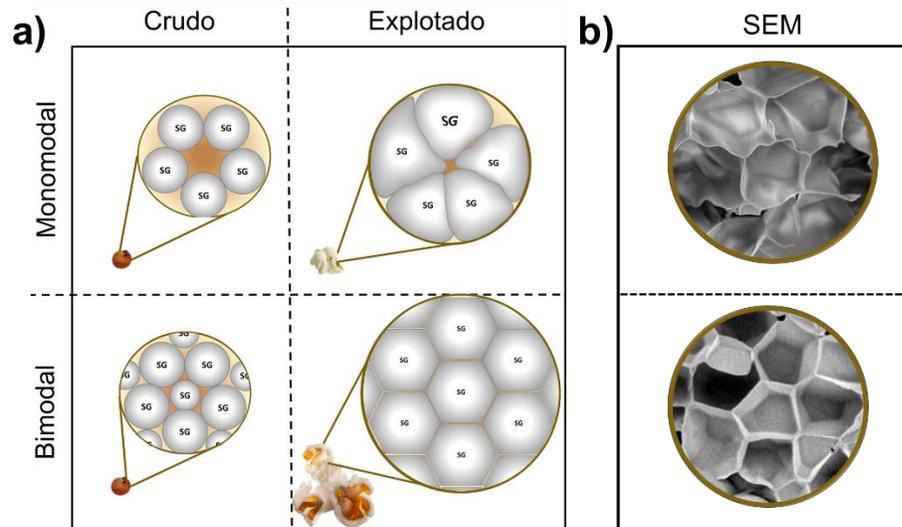


Figura 3.4 a) Esquema del comportamiento de la distribución del tamaño de los gránulos (monomodal y bimodal) en el endospermo harinoso, y su relación con el tamaño del sorgo reventado. b) Microestructura del explotado en función del tipo de distribución (monomodal y bimodal).

Por el contrario, en una distribución bimodal (Figura 2.4a), la matriz de almidón consta de dos tamaños de gránulos de almidón. Por lo tanto, la presencia de espacios intergranulares es menor en comparación con la monomodal. En consecuencia, durante el proceso de explotado esta característica permite que los gránulos se centren en la expansión radial (no hay espacios vacíos que llenar); así, la presión interna aumenta, lo que da lugar a una alta presión diferencial respecto a la atmosférica. Este hecho genera un alto volumen de expansión en el grano, obteniendo así un sorgo más grande y una menor incidencia de granos no explotados después de la ruptura del pericarpio. Finalmente, en la Figura 2.4b se muestra la microestructura de un explotado de un sorgo con distribución monomodal y otra con distribución bimodal.

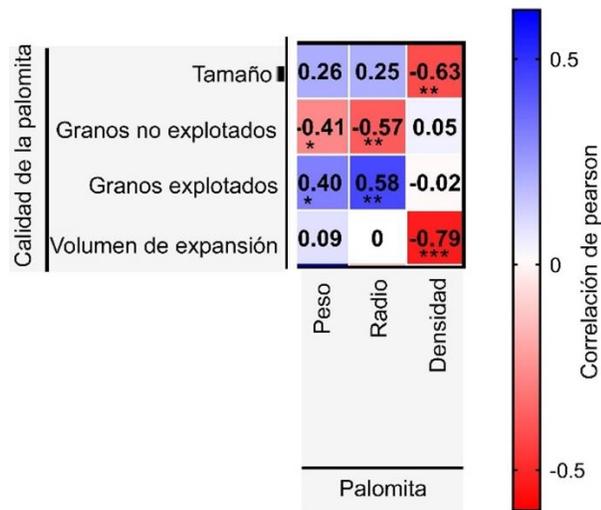


Figura 3.5 Matriz de correlación entre las características de calidad y los atributos del explotado. Rojo y azul indican una correlación negativa y positiva, respectivamente. La intensidad del color indica la fuerza de la correlación, mientras que los asteriscos simbolizan el nivel de significación de la correlación (\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , y \*\*\*  $p < 0.001$ ).

Finalmente, se realizó un análisis de correlación entre las características del explotado y sus atributos de calidad (Figura 2.5). Se observó que el peso del explotado se correlacionó positivamente con el número granos explotados ( $r=0.40$ ,  $p < 0.05$ ), y negativamente con el número de núcleos sin reventar ( $r=-0.41$ ,  $p < 0.05$ ) (Figura 2a). El volumen de expansión se correlacionó positivamente con el número de granos explotados ( $r=0.58$ ,  $p < 0.01$ ) y se correlacionó negativamente con el número de granos no explotados ( $r=-0.57$ ,  $p < 0.01$ ). Además, la densidad del explotado se correlacionó negativamente con el volumen de expansión ( $r=-0.79$ ,  $p < 0.001$ ) y el número de granos explotados ( $r=-0.63$ ,  $p < 0.01$ ).

En resumen, este análisis permitió conocer cómo se relacionaba cada una de las características evaluadas con los atributos del explotado de sorgo. Asimismo, se pudo comprobar que las características físicas como el peso del hectolitro y el grosor del pericarpio determinan las propiedades del explotado. Por otro lado, los componentes del endospermo, como el contenido de endospermo corneo y el tipo de distribución del almidón, afectan positivamente a los atributos del sorgo explotado. Sin embargo, con esta información, todavía no se ha podido concluir qué variedad es la más adecuada para



obtener explotados con los mejores atributos de calidad (tamaño, volumen y rendimiento).

### 3.3.4 Análisis de componentes principales

Para conocer la relación entre las variables analizadas, así como las características comunes entre las variedades de sorgo que promueven las cualidades del explotado, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) con todos los parámetros evaluados en este estudio. Los tres primeros componentes explican el 86.75 % de la variabilidad de los datos (Figura 2.5a). El primer componente explica el 55.27 % de la variabilidad de los resultados, mientras que el segundo explica el 20.68 % de la variabilidad de los datos. El primer componente fue afectado positivamente por la proporción del tamaño de gránulos de almidón (grande/pequeño), el número de granos explotados, el contenido de endospermo corneo (%), la relación c/h y el peso hectolítrico (Figura 2.5b). Por otra parte, el número de granos sin explotar y el contenido de endospermo harinoso contribuyen negativamente a este componente.

Respecto al segundo componente, el grosor del pericarpio, el volumen de expansión, el tamaño del explotado y el tipo de distribución del almidón influyeron positivamente; mientras que los gránulos grandes, el número de granos explotados y la relación c/h contribuyeron negativamente al segundo componente (Figura 2.5b).

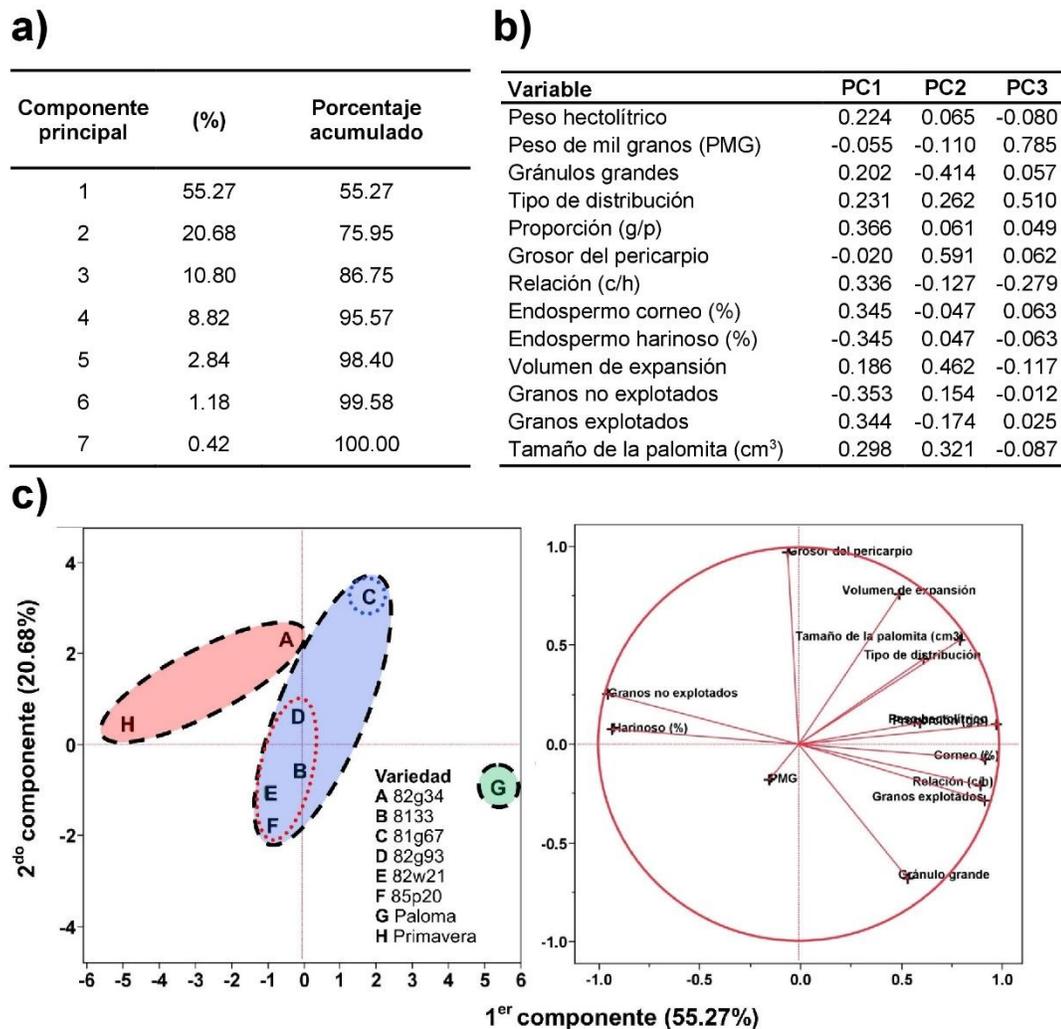


Figura 3.6 Análisis de Componentes Principales (PCA) agrupados por su capacidad de producir sorgo explotado.

a) Valores propios y su contribución a la variación total de las variables analizadas; b) Contribución de cada variable en cada componente del análisis PCA; c) Gráfica de dispersión y carga del primer y segundo componentes. TKW: peso de mil granos. PC: componente principal. Grupo verde:  $\geq 70$  % de granos explotados; Grupo azul: 45-50 % de granos explotados; Grupo rojo:  $< 45$  % de granos explotados.

La Figura 2.5c muestra la gráfica de dispersión y carga del primer y segundo componentes del PCA; los datos fueron nombrados por la variedad y agrupados de acuerdo con su capacidad de producir explotados. Se observó un marcado agrupamiento de acuerdo con la capacidad de las variedades para obtener sorgo reventado. El primer grupo (verde) se conformó por la variedad Paloma, la cual mostró los mejores



rendimientos (>70%), así como las mejores características del explotado (radio, peso, volumen, etc.). Además, esta variedad mostró específicamente características del almidón, como el mayor contenido de endospermo corneo y la proporción más notable de gránulos de almidón grandes en el endospermo harinoso.

El grupo central (azul) se conformó por variedades con un rendimiento entre el 45 y el 50 %, consideradas con una baja capacidad para producir explotados. Este grupo tendió a formar dos subgrupos en función de las características del sorgo reventado: las líneas punteadas rojas y azules. Además, se observó que estas variedades presentaban un contenido de endospermo corneo que oscilaba entre el 50 y el 70%. A pesar de su bajo rendimiento (círculo punteado azul), la variedad 81g67 (C) muestra características deseables como un alto volumen de expansión, una excelente capacidad de explotar, así como explotados de mayor tamaño. En cambio, las variedades 85p20 (F), 82w21 (E), 82g93 (D) y 8133 (B) (círculo punteado rojo), a pesar de su rendimiento, presentaron características de calidad media en el explotado, como bajo tamaño y volumen de expansión. Sin embargo, de acuerdo con sus características fisicoquímicas, estas variedades podrían utilizarse para otros fines industriales, como la obtención de harina y almidón, o bien como un aditivo para mejorar las propiedades reológicas de alimentos (Narváez-González et al., 2007).

Por último, el tercer grupo (rojo) presentó el mayor número de sorgos sin explotar teniendo rendimientos inferiores al 40 %, en este grupo se encontraron las variedades 82g34 (A) y Primavera (H). Estas variedades presentaban el número más considerable de granos sin explotar, así como los peores atributos de calidad en los granos que lograron explotar, considerándose como de baja calidad y no aptas para producir explotados. Por otra parte, la variedad Primavera se destacó por tener el mayor contenido de endospermo harinoso, lo que podría sugerir que esta variedad es la mejor candidata para la industria de la harina y el almidón, así como para la obtención de productos de panadería como el pan, las galletas, las masas y las tortillas, entre otros (Narváez-González et al., 2007).



### 3.4 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se evaluó la relación que guardan las características fisicoquímicas de diferentes variedades del sorgo crudo con la calidad de los explotados. En ese sentido, el contenido de proteína, el grosor del pericarpio, el contenido de endospermo córneo, el tipo de distribución del tamaño de gránulo de almidón fueron los factores que mostraron un impacto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre las características de calidad del grano explotado. En ese sentido, variedades con una mayor prevalencia de proteína en forma de matriz proteica y alto contenido de endospermo córneo (80 %) presentaron los mejores rendimientos y tamaños en el explotado. En ese sentido, la matriz proteica y el endospermo córneo, al fungir como una pared rígida entre el pericarpio y el endospermo harinoso, permite una mayor resistencia a la presión. Por tanto, aumentado el diferencial de presión tras la ruptura del pericarpio.

La distribución del tamaño de los gránulos de almidón afecta a las propiedades del sorgo explotado, donde una distribución bimodal (dos tamaños de gránulos) con una relación de 27:73 [pequeños:grandes] reduce los espacios vacíos en la matriz granular, generando así un explotado de mayor tamaño. Por lo que, esta es la primera vez que un estudio muestra la importancia de esta característica en la obtención de granos explotados.

Finalmente, la variedad blanca Paloma tuvo la mayor cantidad de granos explotado (rendimiento), así como las mejores características volumétricas (volumen y tamaño) como resultado de características fisicoquímicas como: distribución de tamaño de gránulos, cantidad de endospermo córneo, grosor del pericarpio, peso hectolítrico y contenido de proteína.



---

## Capítulo 4 : Cambios estructurales en el sorgo explotado y su impacto en el comportamiento reológico

---



## Resumen del capítulo

En este capítulo se presenta como es que los cambios estructurales ocurridos en el sorgo explotado afectan su comportamiento reológico. Brevemente, se evaluaron las características estructurales como microestructura, propiedades térmicas, rayos X y FTIR, en las harinas de sorgo crudo y explotados con diferentes contenidos de humedad inicial (HI). Así mismo, se evaluó el comportamiento reológico de los materiales. Esta caracterización evaluó el perfil de viscosidad, curvas de flujo y propiedades viscoelásticas. En forma general se observó que el proceso de explotado produjo cambios desde una escala micro a macro en las características del sorgo. De tal manera que, tras el explotado se generó una microestructura más abierta similar a un panal de abeja. Así mismo, rayos X mostró la disrupción de los cristales ortorrómbicos del almidón. Mientras que, las condiciones de presión y temperatura favorecieron la recristalización parcial del almidón en forma de lamelas cristalinas, evidenciadas por la aparición de un pico a  $13.08^\circ 2\theta$ . FTIR, evidenció este daño estructural con la pérdida del pico a  $1045\text{ cm}^{-1}$ . Por otro lado, DSC mostró que tras el proceso de explotado se logró alcanzar una gelatinización casi total del almidón y se aumentó el grado de retrogradación (3909 - 4258 %), esto comparado con el crudo.

El comportamiento reológico del sorgo reventado mostró una mejor estabilidad térmica, con los valores más bajos de viscosidad de estabilidad "breakdown" ( $25 \pm 3,5\text{ cP}$ ), retroceso ( $253 \pm 11,3\text{ cP}$ ) y viscosidad final ( $1337 \pm 5,7\text{ cP}$ ). También se observó un aumento del coeficiente de consistencia "K" y del índice de comportamiento del flujo "n", lo que significa una pérdida del carácter pseudoplástico y una matriz más estable. Las propiedades viscoelásticas aumentaron en el sorgo explotado, sugiriendo la formación de enlaces cruzados, generando una matriz más estable. Finalmente, el análisis de correlación mostró una fuerte relación entre los cambios estructurales y el comportamiento reológico del sorgo explotado.



## 4.1 Introducción

El sorgo es el quinto cereal más importante del mundo, su producción se destina principalmente a la alimentación del ganado (USDA, 2019). Sin embargo, las propiedades nutricionales y funcionales del cereal, lo han postulado como un candidato adecuado para su uso en la alimentación humana. Recientemente, se han evaluado métodos para procesar el sorgo, como la nixtamalización (Cabrera-Ramírez et al., 2020), productos de panadería y bebidas (Taylor & Duodu, 2019), el proceso de explotado (Cabrera-Ramírez et al., 2020; Castro-Campos et al., 2021; Mishra et al., 2015), entre otros. En este sentido, el proceso de explotado se ha empleado tradicionalmente para procesar el sorgo, particularmente en la India y en algunas regiones de Asia. Este proceso es un método de tratamiento de alta temperatura y corto plazo (HTST), con la peculiaridad de utilizar valores de contenido de humedad inferiores al 20 %. Este proceso consiste en someter los granos (11 a 20 % de humedad) a altas temperaturas (180 a 210 °C) durante un corto tiempo de procesamiento (90 a 180 segundos), aumentando la presión de vapor interna del grano y causando la ruptura del pericarpio, que expande rápidamente el endospermo (Cabrera-Ramírez et al., 2020). En cereales como el maíz y el sorgo, el explotado se ha utilizado ampliamente para obtener alimentos (botanas) listos para el consumo.

Independientemente del tipo de cereal procesado, el proceso de explotado transforma la matriz inicial en celdas poligonales similares a un panal de abejas, formado por delgadas paredes laminadas debido a la fusión de los componentes del almidón y otras macromoléculas (proteínas, lípidos, etc.) por la temperatura y la presión alcanzadas durante el explotado (Castro-Campos et al., 2020). A pesar de que la humedad es baja, se ha reportado en diversos cereales, que el explotado produce una gelatinización parcial del almidón (Mariotti et al., 2006). De acuerdo con Dharmaraj et al. (2014), el proceso de explotado redujo la cristalinidad del almidón, los azúcares libres y el contenido de amilosa soluble en el mijo “*finger millet*”.

El proceso explotado produce varios cambios físicos en el grano a nivel macro y micro molecular, que afectan a la estructura organizativa del grano y a las fracciones de polímeros que lo constituyen (Mishra et al., 2014). En ese sentido, esta matriz está



formada de almidón poroso (PS), la cual se caracteriza por sus excelentes propiedades de adsorción y absorción, derivado de su elevada superficie de contacto y por ser ideal para la industria de aromas y sabores ya que ofrecen una liberación gradual de especias, edulcorantes, ácidos, enzimas y sabores (Jin, 2018). Recientemente, Castro-Campos et al. (2020) demostraron que el proceso de explotado puede producir una gelatinización seca del almidón, lo que afecta sus propiedades físicas, térmicas y de pasta.

Los almidones nativos, gelatinizados y retrogradados presentan características diferentes entre sí, siendo su capacidad de absorción de agua una de las más importantes. Desde el punto de vista reológico, las pastas de almidón pueden describirse como una suspensión de partículas hinchadas dispersas en un medio macromolecular (Fonseca-Florido et al., 2018). Por lo tanto, la capacidad de hinchamiento del almidón afecta directamente a sus propiedades reológicas, comportándose de manera diferente según el tratamiento aplicado. En consecuencia, se modifican sus características tecnofuncionales y sus posibles usos industriales. Sin embargo, el efecto del procesamiento de una matriz compleja como el grano de sorgo en condiciones de alta temperatura y baja humedad (explotado) es un campo que apenas se ha investigado. Además, el estudio de la forma en que los cambios ocurridos durante el proceso de explotado repercuten en sus características reológicas, su tecnofuncionalidad y sus posibles usos industriales todavía ha sido poco explorado. Por lo anterior, este capítulo tiene como objetivo evaluar los cambios estructurales del sorgo explotado y su efecto sobre el comportamiento reológico.

## 4.2 Materiales y métodos

### 4.2.1 Material biológico

Se utilizó un sorgo blanco variedad “Paloma”, donado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Tamaulipas, México. De acuerdo con los métodos de la AACCC (2000), la composición proximal del sorgo crudo fue: cenizas ( $3.1 \pm 0.4$  %), lípidos ( $1.5 \pm 0.1$  %), proteínas ( $9.2 \pm 0.1$  %), carbohidratos (83.7 %, donde  $51.7 \pm 6.3$  % y  $21.9 \pm 0.4$  representa el almidón y la fibra dietética total).



Los granos de sorgo fueron molidos y pasados a través de una malla No. 60 (250  $\mu\text{m}$ ) y se consideró como el "crudo"; se mantuvo a 4 °C en bolsas de polietileno selladas hasta su uso.

#### 4.2.2 Pretratamiento del grano y obtención del explotado

Utilizando la ecuación previamente reportada por [Cabrera-Ramírez et al. \(2020\)](#), los granos de sorgo se ajustaron a tres contenidos de humedad inicial (HI) (11, 15 y 20%) y se explotaron usando aire caliente a 210 °C por 90 s. Los sorgos explotados se molieron y se pasó la harina a través de una malla de No. 60 (250  $\mu\text{m}$ ) y se almacenó a 4° C en bolsas selladas hasta su uso.

#### 4.2.3 Características estructurales

##### 4.2.3.1 Microestructura

Se evaluó la microestructura de los granos de sorgos crudos y explotados utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM Phenom-World BV, Países Bajos) adaptado para trabajar en un vacío bajo, con un haz de electrones ajustado a 5kV. Las imágenes se tomaron a 540x y 1100x con un detector BSD. Mediante el software Phenom Image viewer v1.0.0, se midió el tamaño a 30 gránulos de almidón.

##### 4.2.3.2 Difracción de rayos-X

Los cambios en la estructura cristalina de las harinas obtenidas a partir de los sorgos crudos y explotados fueron evaluados. Para esto, se obtuvieron los patrones de difracción de rayos X utilizando un difractómetro Rigaku (Ultima IV, Texas, USA) con un detector D/Tex Ultra (operado a 35 kV y 15 mA). Las muestras se escanearon con un haz de  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ ), desde 5 a 70 ° 2 con un paso de 0.02° ([Castro-Campos et al., 2021](#)).



#### 4.2.3.3 Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros de infrarrojo de las harinas del sorgo crudo y explotado se obtuvieron con un espectrómetro IR Perkin Elmer (Spectrum Two, Waltham-Estados Unidos) con ATR, escaneando de 600 a 4000  $\text{cm}^{-1}$  (Castro-Campos et al., 2021).

#### 4.2.3.4 Propiedades térmicas

Utilizando un calorímetro diferencial de barrido (modelo DSC 1, Mettler Toledo), se evaluaron las propiedades térmicas del sorgo crudo y explotado. Brevemente, 3 mg de muestra (base seca) se colocaron en un crisol de aluminio (estándar 40  $\mu\text{L}$ ) y se añadió 7  $\mu\text{L}$  de agua destilada; posteriormente, se selló el crisol y se sometió a un calentamiento. La rampa de calentamiento fue de 30 a 120  $^{\circ}\text{C}$  (10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ); el crisol con la muestra se conservó y se mantuvo en reposo frío (4  $^{\circ}\text{C}$ ) por 7 días. Se reportaron la temperatura inicial ( $T_0$ ), pico ( $T_p$ ) y final ( $T_f$ ) y la entalpía ( $\Delta H$ ) para la endoterma de gelatinización. Los crisoles almacenados a 4  $^{\circ}\text{C}$  durante 7 días, tiempo en cual se volvieron a escanear utilizando las mismas condiciones. El grado de retrogradación (RD) se expresó como el porcentaje de entalpía de retrogradación entre la entalpía de gelatinización de la misma muestra (Mendez-Montealvo et al., 2011).

#### 4.2.4 Comportamiento reológico

##### 4.2.4.1 Curvas de flujo

Las curvas de flujo se determinaron por triplicado utilizando una dispersión de 10 g/100 g de sólidos con agua destilada para cada muestra. La prueba rotacional se realizó en un reómetro Anton Paar (modelo Physica MCR 101, Austria) empleando el sistema de placas paralelas “arenada” (marca Anton Paar, PP25/3, 25 mm de diámetro). Todas las pruebas se realizaron con una separación de 0.5 mm. Se aplicaron dos ciclos de incremento-decremento de 3 a 100  $\text{s}^{-1}$  manteniendo una temperatura constante de 25  $^{\circ}\text{C}$  durante la prueba. A fin de evitar las pérdidas de humedad por evaporación, se colocó aceite mineral para cubrir la periferia de la sonda (Fonseca-Florido et al., 2018). El



comportamiento de las curvas de flujo se describió utilizando la ecuación de la ley de potencia (Ecuación 4.1).

Ecuación 4.1 Ley de la potencia

$$\sigma = k\dot{\gamma}^n$$

Donde " $\sigma$ " representa el esfuerzo de cortante (Pa), " $k$ " es el índice de consistencia (Pa • s<sup>n</sup>), " $\dot{\gamma}$ " representa la velocidad de corte (s<sup>-1</sup>), y " $n$ " indica el índice de comportamiento del flujo (adimensional).

#### 4.2.4.2 Perfil de viscosidad

Para la evaluación del perfil de viscosidad de las muestras se utilizó un reómetro Anton Paar (modelo Physica MCR 101, Austria). Se colocó una muestra (3 g b.s.) y se mezcló con 18 mL de agua destilada. La muestra se calentó de 50 a 92 °C (con una razón de calentamiento de 7.5 °C/min), se mantuvo durante 5 minutos a 92 °C y se enfrió a 52 °C a la misma velocidad (Cervantes-Ramírez et al., 2020). Los datos se expresaron en centipoise (cP), reportando las viscosidades iniciales, máxima, de estabilidad (breakdown), mínima, final y de retroceso (setback), así como la temperatura de formación de pasta (pasting) (°C). La prueba se llevó a cabo por triplicado para cada muestra.

#### 4.2.4.3 Propiedades viscoelásticas

Las propiedades viscoelásticas de las harinas obtenidas a partir de los granos de sorgo crudos y explotados se evaluaron mediante pruebas oscilatorias basadas en el método descrito por Contreras-Jiménez et al. (2017), con algunas modificaciones. Se mezcló una muestra de 500 mg con 500 µl de agua destilada (1:1), se homogeneizó y posteriormente se dejó reposar durante 5 minutos en una bolsa de plástico sellada. La muestra se colocó entre las placas del reómetro (0.5 mm), y se retiró el exceso de la muestra con una espátula. La región viscoelástica lineal (RVL) se determinó mediante barridos de deformación a 25 °C y 1 Hz, con intervalo de deformación de 0.01 a 100 %. Una vez encontrada la RVL, se realizó un barrido de frecuencia de 0.1 a 100 Hz con



una deformación constante de 0.3 %. Se evaluaron el módulo de almacenamiento ( $G'$ , Pa), el módulo de pérdida ( $G''$ , Pa), así como el factor de pérdida,  $\text{Tan } \delta$  ( $G''/G'$ ). Para evaluar el efecto del tratamiento en el  $G'$ ,  $G''$ , y  $\text{Tan } \delta$ , los datos se compararon a una frecuencia de 10 Hz. Este procedimiento se realizó por triplicado.

#### 4.2.5 Análisis estadístico

Los datos se expresaron como la media  $\pm$  desviación estándar de tres experimentos independientes. Se realizó un ANOVA con comparación de medias por la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ) usando el software estadístico Minitab® 18. Finalmente, se realizó una correlación de Pearson y un análisis de componentes principales para conocer la relación entre las propiedades estructurales y el comportamiento reológico de las harinas de sorgo explotado.

### 4.3 Resultados y discusiones

#### 4.3.1 Cambios físicos en el sorgo explotado

##### 4.3.1.1 Microestructura

La Figura 4.1 muestra la microestructura de los granos de sorgo crudos y explotados, utilizando diferentes humedades iniciales de acondicionamiento. Los gránulos de almidón en el sorgo crudo mostraron una forma semiesférica dispuesta en clústeres rodeados por una matriz proteica. Además, se observó una alta homogeneidad en el tamaño de los gránulos de almidón, con dos poblaciones de tamaño granular aparente de  $9.41 \pm 0.47 \mu\text{m}$  y  $20.40 \pm 1.47 \mu\text{m}$ , sugiriendo una distribución bimodal. Estos resultados son similares a los reportados por [Cabrera-Ramírez et al. \(2020\)](#), quienes encontraron que la variedad blanca Paloma mostró una distribución de tamaño de gránulo del almidón de tipo bimodal, con  $7.4 \pm 1.6 \mu\text{m}$  y  $21.0 \pm 1.8 \mu\text{m}$ .

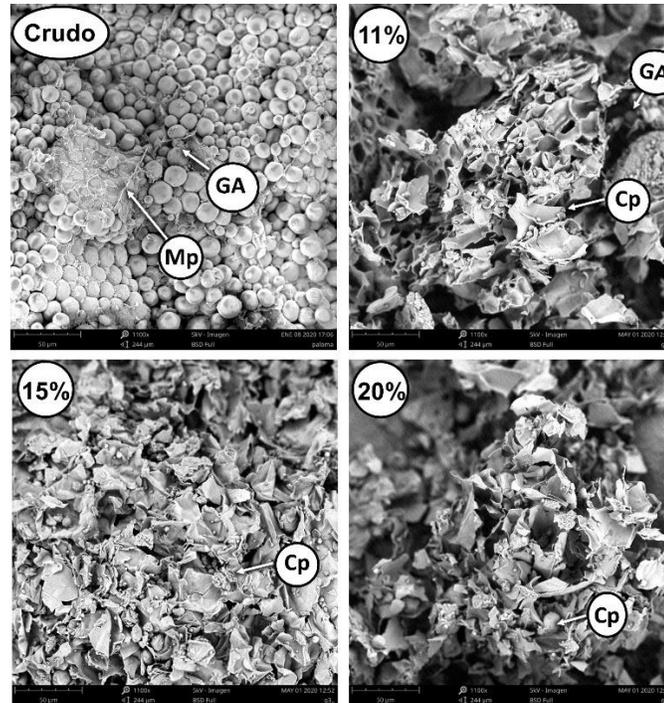


Figura 4.1 Microestructura de los granos de sorgo crudo y explotado con diferente contenido de humedad inicial (11, 15 y 20 %). GA: gránulo de almidón; Mp: matriz de proteína; Cp: cuerpo proteico.

Independientemente del contenido de humedad inicial (HI), los granos de sorgo reventado cambiaron completamente su microestructura en comparación con el crudo, formando una estructura similar a un panal de abejas con delgadas paredes laminadas. Sin embargo, se observó que con el 11% HI mostró algunos gránulos de almidón (GA) están todavía intactos. Asimismo, se observó una alta incidencia de cuerpos proteicos (Cp) postrados dentro de las cavidades poligonales de la estructura del sorgo explotado. Por otro lado, los sorgos explotados con las HI de 11, 15 y 20 % presentaron una matriz similar. Sin embargo, con una HI de 15 % se observó una estructura ligeramente más desordenada, que contenía cuerpos proteicos (Cp) dispersos. Lo anterior podría atribuirse al efecto de la molienda, causando así daños a la estructura de los granos de sorgo explotado. [Castro-Campos et al. \(2020\)](#) reportaron resultados similares, encontrando que el sorgo explotado mostraba una estructura similar a un panal de abeja con paredes delgadas. Los autores sugieren que la temperatura y la presión alcanzadas durante el proceso de explotado fusionaron el almidón y los componentes no almidonados, dando lugar a la formación de estas láminas poligonales.



Cabe destacar que estas características estructurales también se han encontrado en almidones porosos, los cuales presentan excelentes propiedades de adsorción y absorción de agua, lípidos y algunas vitaminas, resultado de su gran superficie de contacto; lo que da lugar a amplias aplicaciones industriales (Jin, 2018). Es bien sabido que las características físicas del gránulo de almidón y su homogeneidad de tamaño determinan su capacidad de hidratación y su poder de hinchamiento (Fonseca-Florida et al., 2017). Por lo tanto, se espera que las propiedades reológicas de las harinas de sorgo explotado difieran del crudo.

#### 4.3.1.2 Difracción de rayos-X y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La Figura 4.2 muestra los patrones de difracción de rayos X de las harinas de sorgo crudo y explotado con diferentes contenidos de humedad inicial (11, 15 y 20%). El sorgo crudo mostró un patrón de difracción típico de una estructura cristalina ortorrómbica, característica del almidón de cereales denominado tipo A. Además, en la Figura 4.2 se muestran los picos representativos y los índices de Miller de cada pico (líneas punteadas) de un almidón ortorrómbico, previamente indexados por Rodríguez-García et al. (2020).

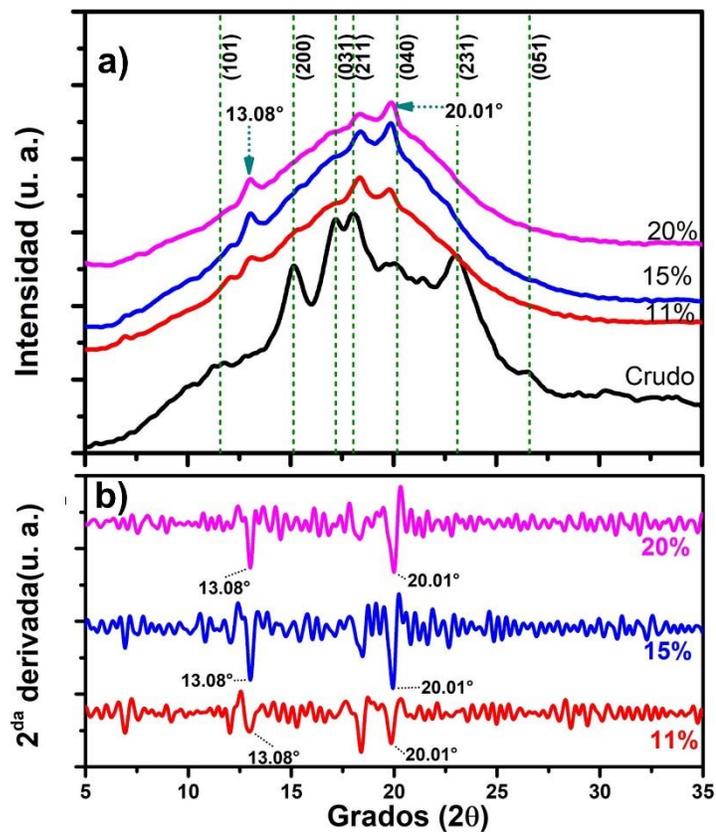


Figura 4.2 a) Patrón de difracción de rayos X de las harinas de sorgo crudo y explotado con diferente contenido de humedad inicial (11, 15 y 20%). b) segunda derivada del patrón de difracción de rayos X del sorgo explotado.

Como se observa en la Figura 4.2a, la estructura cristalina del almidón de sorgo se perdió parcialmente después del proceso de explotado. Lo anterior dio lugar a la aparición de una zona más amorfa, disminuyendo la intensidad en los picos (101), (200), (231) y (051). Estos resultados son coherentes con los observados en las micrografías (Figura 4.1), donde los granos de sorgo explotado cambiaron su microestructura en comparación con el crudo.

Curiosamente, tras el explotado se observaron dos picos cercanos a 13.04 y 20.01° (escala  $2\theta$ ); estas posiciones se determinaron utilizando el criterio de la segunda derivada en cada patrón (Figura 4.2b). Este comportamiento puede atribuirse al daño parcial de los cristales ortorrómbicos del almidón de sorgo después del explotado (Figura 4.3). Mientras que, la formación de la región amorfa podría deberse a la velocidad del



proceso de explotado, en el que el almidón no tiene el tiempo suficiente para estabilizarse completamente, promoviendo la fase amorfa.

Estos picos se han observado en el almidón de arroz explotado y retrogradado, asociado a una estructura cristalina de tipo V (Murugesan y Bhattacharya, 1989). Cabe destacar, que casi todos los trabajos se han referido a estos picos como una nueva estructura cristalina. Sin embargo, la estructura tipo V no ha sido identificada e indexada en cristalografía. Bajo un contexto cristalográfico, no es posible identificar una estructura cristalina solo por la presencia de dos picos no indexados (sin los tres índices de Miller “*hkl*” identificados). Sin embargo, teniendo en cuenta el proceso de indexación realizado por Rodríguez et al. (2021) en conjunto con la ley de Laue derivada de la ecuación de Bragg " $n\lambda = 2d\sin(\theta)$ ", donde  $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ,  $d$  es la distancia interplanar, y  $\theta$  es el eje del ángulo  $2\theta$  medido para cada pico. El cálculo directo del espaciamiento  $d$  para ambos picos difractados da como resultado  $6.783 \text{ \AA}$  y  $3.39 \text{ \AA}$ , respectivamente. El primer valor de  $d$  no corresponde a ningún pico difractado de la estructura ortorrómbica; sin embargo, el valor del  $d/2$  ( $3.395 \text{ \AA}$ ) corresponde a la dirección (051). La desviación experimental en relación con el valor reportado (Rodríguez-García et al., 2021) es sólo de 1.39%. El segundo caso ( $20.01^\circ$ ),  $d = 2.356$  corresponde al pico (040) y con una desviación experimental de 0.09 %. Esto significa que, en el primer caso ( $13.08^\circ$ ), es posible tener un crecimiento lamelar debido a la presión de vapor generada durante el proceso de explotado, tal como se ilustra en la Figura 4.3b. La Figura 4.2a muestra la estructura de un cristal ortorrómbico de almidón de sorgo. Sin embargo, después del proceso de explotado se altera el arreglo cristalino ortorrómbico, propiciando un crecimiento lamelar desfasado (Figura 4.3b); lo que altera significativamente el patrón de difracción de rayos X. Sin embargo, se requieren de estudios puntuales para validar este comportamiento.

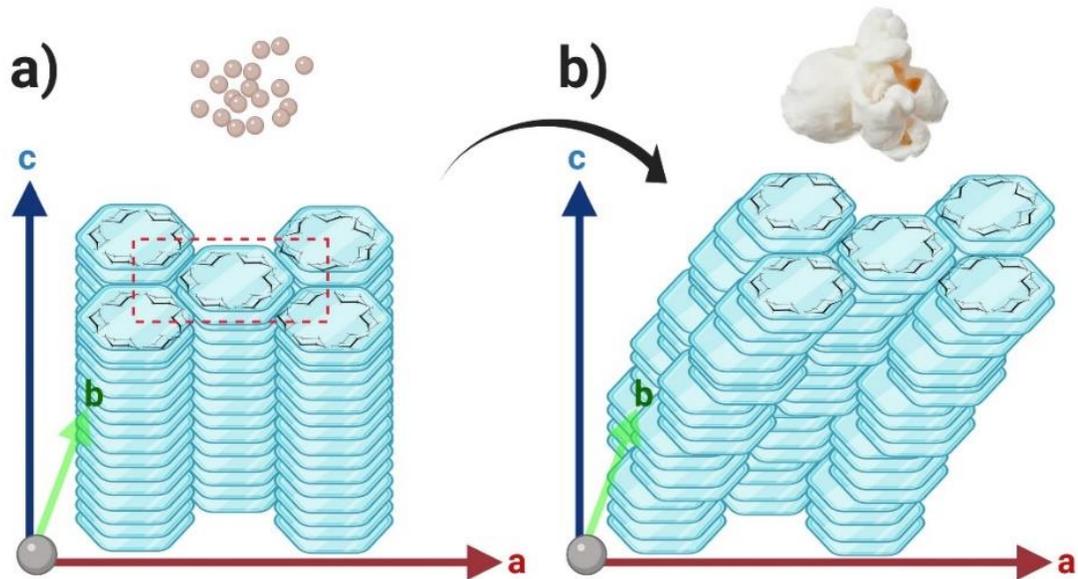


Figura 4.3 a) Cristal ortorrómbico de almidón de sorgo crudo y (b) crecimiento de lamelas cristalinas en el almidón de sorgo explotado.

Se sabe que la espectroscopia de IR es susceptible de detectar cambios en la estructura de corto rango del almidón tales como el orden en la conformación de la cadena y las dobles hélices. La Figura 4.4 muestra el espectro infrarrojo de las muestras de sorgo crudo y explotado con diferentes contenidos de humedad inicial. Independientemente del tratamiento, se observaron los picos característicos del almidón del sorgo. El pico de  $1147\text{ cm}^{-1}$  se atribuyó a la vibración antisimétrica de los grupos C-OH. La vibración simétrica de los grupos C-OH se atribuyó al pico de  $1075\text{ cm}^{-1}$ .

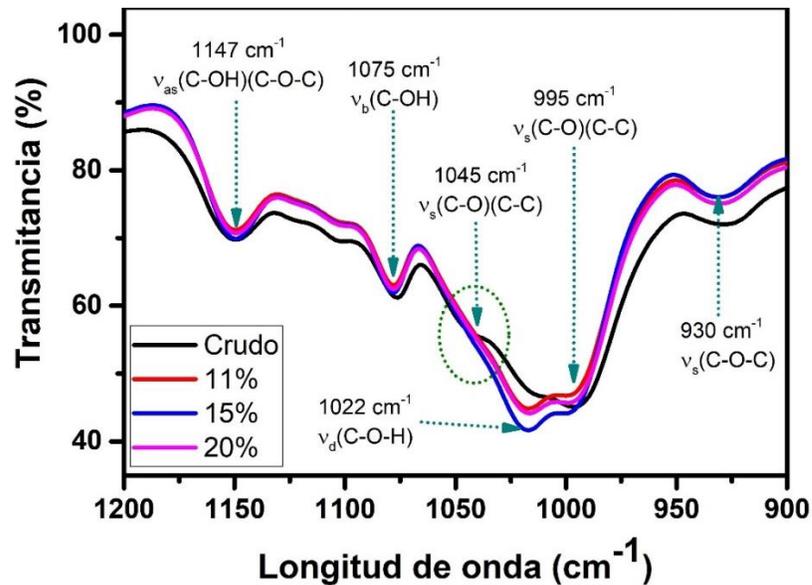


Figura 4.4 Espectro infrarrojo del sorgo crudo y explotado con diferentes contenidos de humedad inicial (11, 15 y 20%). v: modo de vibración; s: estiramiento simétrico; as: estiramiento antisimétrico; d: deformación; b: flexión.

Por otro lado, el pico de  $1022\text{ cm}^{-1}$  se asoció con la vibración de deformación de los grupos C-O-H. Conjuntamente, la vibración simétrica de los grupos C-O y la vibración esquelética de C-C se observaron en las bandas de  $997\text{ cm}^{-1}$ . Finalmente, las bandas de  $928$  y  $1147\text{ cm}^{-1}$  respondieron a la vibración simétrica y antisimétrica de los grupos C-O-C de los enlaces glucosídicos  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4) de las cadenas de almidón (Castro-Campos et al., 2021).

La relación de las intensidades de los picos a  $1045$ ,  $1022$  y  $995\text{ cm}^{-1}$  se ha utilizado para estimar el grado de orden ( $1047/1022\text{ cm}^{-1}$ ) y el grado de doble hélice ( $995/1022\text{ cm}^{-1}$ ) del almidón. Sin embargo, desde una perspectiva vibracional, este cálculo sólo tiene sentido si se conoce bien el espesor de la muestra y si esta se analizó por transmitancia. Por otra parte, como se muestra en la Figura 4.4 (círculo punteado verde), el pico de  $1045\text{ cm}^{-1}$  desapareció después del proceso de explotado, independientemente de la HI, sugiriendo un daño estructural del almidón. Lo anterior apunta a una alteración de los enlaces C-C y C-O de las cadenas de almidón después del proceso de explotado; eso podría estar relacionado con los picos de  $13.08$  y  $20.01^\circ 2$  (rayos X). Como se mencionó



anteriormente, el proceso laminar podría tener lugar originando el aumento de estas intensidades máximas.

### 4.3.1.3 Propiedades térmicas

Las regiones cristalinas del almidón se caracterizan por una mayor cantidad de interacciones inter e intramoleculares, lo que da lugar a una mayor energía necesaria para causar un cambio de fase en el material. En ese sentido, el DSC puede ayudar a inferir las características estructurales del almidón (Ehtiati et al., 2017). Es sabido que la entalpía de gelatinización es directamente proporcional al número de estructuras ordenadas en el almidón. En ese sentido, la Tabla 4.1 muestra las propiedades térmicas de los sorgos crudos y explotados. En el caso del sorgo crudo se observó una endoterma de gelatinización entre 66 y 77 °C con una entalpía de gelatinización de  $6.42 \pm 0.03$  J/g, lo que es congruente con reportes anteriores (Castro-Campos et al., 2021). En el caso del sorgo explotado, se observó una marcada tendencia a disminuir la energía necesaria para completar la gelatinización a medida que aumentaba el IM, obteniéndose energías de 0.19, 0.07 y 0.06 J/g cuando se utilizaba un HI de 11, 15 y 20 %, respectivamente. Lo anterior indica que el proceso de explotado altera la estructura ordenada del almidón, dando como resultado un material más amorfo que requiere menos energía para producir un cambio de orden, lo que concuerda con lo observado en difracción de rayos X.

Tabla 4.1 Propiedades térmicas del sorgo crudo y explotado

HI	T <sub>0</sub> (°C)	T <sub>p</sub> (°C)	T <sub>f</sub> (°C)	ΔH (J/g)
Gelatinización				
Crudo	66.9 ± 1.08 <sup>a</sup>	71.8 ± 0.23 <sup>b</sup>	77.6 ± 1.94 <sup>a</sup>	6.42 ± 0.03 <sup>a</sup>
11%	65.9 ± 1.37 <sup>a</sup>	71.5 ± 0.6 <sup>b</sup>	79.2 ± 1.36 <sup>a</sup>	0.19 ± 0.01 <sup>b</sup>
15%	67.7 ± 0.57 <sup>a</sup>	74.1 ± 0.25 <sup>a</sup>	79.4 ± 0.53 <sup>a</sup>	0.07 ± 0.01 <sup>c</sup>
20%	70.1 ± 1.03 <sup>a</sup>	72.1 ± 0.11 <sup>b</sup>	78.9 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.06 ± 0.01 <sup>c</sup>
Retrogradación				
Crudo	41.6 ± 1.7 <sup>a</sup>	52.1 ± 2.5 <sup>a</sup>	63.2 ± 0.9 <sup>a</sup>	2.76 ± 0.06 <sup>b</sup>
11%	43.4 ± 0.9 <sup>a</sup>	53.3 ± 0.1 <sup>a</sup>	61.5 ± 0.1 <sup>a</sup>	0.98 ± 0.01 <sup>d</sup>
15%	40.9 ± 0.7 <sup>a</sup>	51.1 ± 0.2 <sup>a</sup>	62.0 ± 0.9 <sup>a</sup>	2.92 ± 0.03 <sup>a</sup>
20%	41.3 ± 1.2 <sup>a</sup>	52.0 ± 0.2 <sup>a</sup>	61.8 ± 0.8 <sup>a</sup>	2.33 ± 0.04 <sup>c</sup>

Se muestra la media + desviación estándar de tres experimentos independientes. Las letras minúsculas indican diferencias estadísticas (prueba de Tukey,  $p < 0.05$ )



para cada sorgo entre el contenido de humedad inicial en una propiedad específica (gelatinización o retrogradación).  $T_0$ : temperatura de inicio;  $T_p$ : temperatura máxima;  $T_f$ : temperatura final. HI: humedad inicial; GD: grado de retrogradación.

Por otro lado, este comportamiento indica que el proceso de explotado produce una gelatinización parcial o casi total del almidón, la cual fue dependiente de la humedad inicial del grano (HI). En ese sentido, la gelatinización puede considerarse como "gelatinización seca" debido a los bajos niveles de humedad utilizados, concordando con los resultados previamente reportados por [Castro-Campos et al. \(2020\)](#). Por lo tanto, la HI ayuda a obtener una gelatinización parcial o casi completa del almidón durante el procesamiento, reduciendo la energía (entalpía) de transición después del explotado (Tabla 3.1). La entalpía de gelatinización es una forma indirecta de evaluar el contenido de doble hélice en los gránulos de almidón ([Ehtiati et al., 2017](#)); por lo tanto, en el sorgo explotado se puede desorganizar las estructuras de doble hélice en los gránulos de almidón, dependiendo de la HI.

Las temperaturas de gelatinización aumentaron respecto a la HI, pasando de 66.9 °C en crudo a 70.1 °C cuando se le aplicó una HI del 20 %. Este comportamiento puede indicar que el almidón de sorgo explotado es más estable térmicamente, requiriendo más temperatura para lograr un cambio de fase. Mientras tanto, la entalpía de gelatinización indica que sólo una pequeña fracción tiene esta característica. Lo anterior puede estar relacionado con la formación de lamelas cristalinas en el sorgo explotado (rayos X).

En cuanto a la retrogradación después de siete días de almacenamiento en refrigeración (7 °C) del sorgo crudo y explotado, se observaron diferencias estadísticas ( $p < 0.05$ ) en función del tratamiento aplicado. El sorgo crudo mostró el menor grado de retrogradación (GR) con un 43 %. Después del explotado, se observó una marcada tendencia a aumentar la retrogradación a medida que aumentaba la HI. En este sentido, el explotado con una HI de 11% alcanzó un  $\Delta H$  de 0.98 J/g (GR 15.3 %). Sin embargo, los explotado con una HI de 15 y 20 % mostraron ser estadísticamente iguales ( $p < 0.05$ ), alcanzando con una entalpía de retrogradación de 2.92 J/g (GR 45.3 %) y 2.33 J/g (GR



36.3%), respectivamente. El grado de retrogradación se ha utilizado para describir el nivel de reorganización de la estructura de la amilopectina después del almacenamiento en frío (Martinez et al., 2018). Sang et al. (2008) reportaron la transición de la retrogradación entre 41 a 62 °C, con energías de entalpía de 4.3 4 J/g, 5.1 4 J/g y 5.4 J/g para los almidones de sorgo crudo normales, heteroceroso y cerosos, respectivamente. Estos valores son más altos que los encontrados en este estudio; sin embargo, la razón principal es el tratamiento aplicado de explotado. Esta condición altera la organización dentro de los gránulos de almidón, provocando una desorganización del gránulo, obteniendo un material más amorfo (como se muestra en el análisis de rayos X).

Los resultados sugieren que el explotado del sorgo con una HI de 11 % redujo la capacidad de la amilosa y la amilopectina para reorganizarse después del almacenamiento en refrigeración. Por el contrario, cuanto más alto es el contenido de agua, más significativa es la desorganización del almidón, pero aumenta su capacidad de reorganizarse (GR) en condiciones de almacenamiento en refrigeración.

Es importante destacar que la entalpía de retrogradación indica la energía necesaria para desorganizar y disociar las dobles hélices. Se ha demostrado que cuanto más largas son las cadenas de amilopectina, más grandes y estables son las dobles hélices (Martinez et al., 2018). Bajo este enfoque, el comportamiento de los datos implica que el explotado del sorgo con una HI de 11 % resultó en un daño más significativo a las cadenas de amilopectina al disminuir su capacidad de reorganizarse con el tiempo, evidenciado por su baja retrogradación (15.3 %) Por el contrario, una HI del 20 % dio lugar a una desorganización de la amilopectina, que con el tiempo tiende a reorganizarse en una forma más estable, exhibiendo una mayor retrogradación (36.3 %).

### 4.3.2 Comportamiento reológico

#### 4.3.2.1 Perfil de viscosidad

La Figura 4.5 muestra las propiedades de viscosidad del sorgo crudo y explotado con una humedad inicial (HI) de 11, 15 y 20 %. El sorgo crudo mostró una temperatura de pasting de  $70.8 \pm 0.3$  °C. La temperatura de pasting disminuyó en el sorgo explotado,



independientemente de la HI. El comportamiento anterior puede sugerir que parte del almidón se gelatinizó durante el explotado, permitiendo que se solubilizara fácilmente a temperaturas más bajas. Este comportamiento concuerda con las entalpías de gelatinización, que tienden a disminuir en el sorgo explotado y proporcionalmente a la HI (Tabla 4.1). Contrariamente, Pinto et al. (2012) observaron esta tendencia a aumentar la temperatura de pasta en los almidones de pinhão tratados con calor húmedo “*heat moisture treatment*” (HMT) utilizando diferentes contenidos de humedad (15, 20 y 25 %). Los autores atribuyeron este aumento a la formación de los enlaces cruzados en la matriz del almidón durante el tratamiento, lo que exige una temperatura más elevada para romper la estructura y dar paso a la formación de pastas. Sin embargo, hay que destacar que, a diferencia de la HMT, el proceso de explotado implica alta presión y temperatura, causando más daño al almidón lo que promueve la disrupción granular y la gelatinización de este.

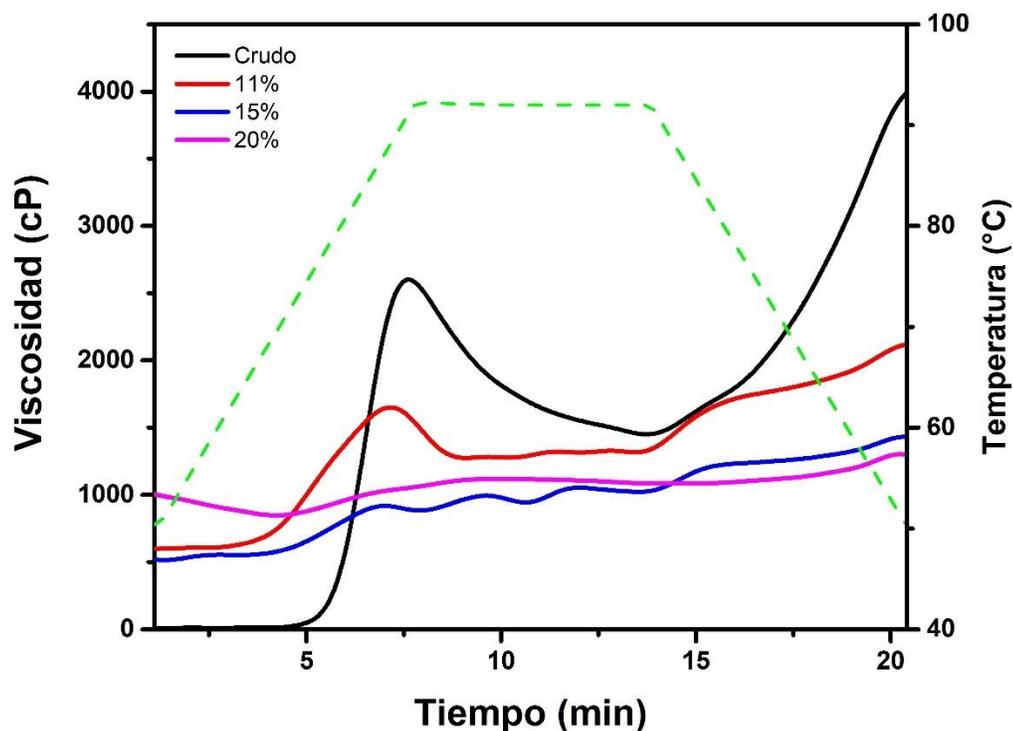


Figura 4.5 Perfil de viscosidad del sorgo crudo y explotado con diferentes HI.



En cuanto a la viscosidad inicial, el sorgo crudo mostró una baja viscosidad con  $11 \pm 1.3$  cP. Por el contrario, después de ser explotado, la viscosidad inicial aumentó proporcional a la HI, alcanzando hasta  $1003 \pm 7$  cP (HI de 20 %). Lo anterior puede sugerir que el almidón en la harina del sorgo crudo tiene una baja capacidad de absorción de agua y un menor hinchamiento, a bajas temperaturas ( $50$  °C). Este comportamiento es característico de almidones nativos, los cuales tienden a absorber una pequeña cantidad de agua (30 %) a temperatura ambiente, lo cual no aumenta la viscosidad de manera significativa (Mason, 2009). Mientras tanto, los sorgos explotados mostraron una gelatinización parcial o casi completa del almidón (Tabla 4.1) y una estructura poligonal (Figura 3.1). Por lo tanto, al tener una estructura más abierta puede absorber agua, aumentando la viscosidad inicial, lo que fue más evidente al utilizar una HI de 20 % (Tabla 4.2). Anteriormente, Castro-Campos et al. (2020) reportaron un aumento de la viscosidad inicial del sorgo variedad Paloma después de ser explotado (HI de 11 %), atribuyendo este aumento a la presencia de almidón pregelatinizado y a la estructura esponjosa de los granos de sorgo reventado.

Los valores de la viscosidad máxima, estabilidad, mínima, final y de retroceso tendieron a disminuir significativamente ( $p < 0.05$ ) después del explotado. En ese sentido, la viscosidad máxima del sorgo crudo fue de  $2606 \pm 9.9$  cP. Sin embargo, después del explotado, la viscosidad máxima disminuyó a  $1631 \pm 2.1$  cP. Cabe destacar que esta disminución se vio acentuada por la HI, obteniéndose  $1109 \pm 2.1$  cP con una HI de 20 % de humedad. Esta tendencia ya había sido observada previamente por Castro-Campos et al. (2020) en diferentes variedades de sorgo explotados con una HI de 11%. La viscosidad máxima del almidón se produce en el punto de equilibrio entre el hinchamiento y la lixiviación de sus componentes y aumentando su viscosidad, indicando la capacidad del almidón para retener agua (Méndez-Montevalvo et al., 2008). Por consiguiente, la pérdida de viscosidad máxima observada en el explotado puede atribuirse a la formación de enlaces cruzados a lo largo de las cadenas del almidón y sus interacciones, que impiden que la amilosa se lixivie al medio acuoso.

En cuanto a la viscosidad de estabilidad “breakdown”, el sorgo crudo mostró el valor más alto con  $1154 \pm 6.4$  cP, mientras que el explotado con una HI del 20 % mostró



el valor más bajo con  $25 \pm 3.5$  cP. Un comportamiento similar se observó para la viscosidad mínima, que pasó de  $1453 \pm 3.5$  (crudo) a  $1084 \pm 5.7$  en sorgo explotado con una HI de 20 %. Tal comportamiento en el explotado sugiere una mayor estabilidad térmica del almidón bajo condiciones de calentamiento y cizallamiento continuo. En ese sentido, se ha reportado que almidones con estas características son adecuados para proporcionar estabilidad durante el procesamiento térmico de los alimentos (Sharma et al., 2015).

La viscosidad final se redujo de  $3982 \pm 12.7$  cP (crudo) a  $1337 \pm 5.7$  cP en el sorgo explotado con una HI de 20 %. Asimismo, la viscosidad de retroceso pasó de  $2530 \pm 16.3$  cP (en crudo) a  $253 \pm 11.3$  cP en el explotado (HI del 20 %). Esta fuerte disminución puede ser el resultado de la recristalización del almidón provocada por el proceso de explotado (rayos X). La anterior conduce a una formación de enlaces cruzados, aumenta el grado de orden y doble hélice, permitiendo una mayor estabilidad de la pasta. Por tanto, esta estabilidad se refleja en una menor viscosidad de estabilidad, final y de retroceso. Este comportamiento coincide con el publicado anteriormente por Sun et al. (2014), quienes encontraron la misma tendencia a reducir la viscosidad final y de retroceso en las harinas de sorgo después de ser tratadas con aire caliente a  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante diez horas, utilizando 20 y 25 % de humedad. Cabe destacar que la viscosidad de retroceso se ha utilizado como un indicativo de la capacidad de los almidones para reagruparse, la cual depende de la cantidad de amilosa lixiviada (Sharma et al., 2015). Por lo tanto, a medida que se forman enlaces cruzados en el almidón de sorgo explotado, se reduce la movilidad de las cadenas de amilosa y amilopectina, limitando su capacidad de reordenamiento.

#### 4.3.2.2 Comportamiento de flujo

Se realizó un ajuste de los datos obtenidos de las curvas de flujo, empleando el modelo de la ley de la potencia (Tabla 4.2), dónde el coeficiente de consistencia “K” y el índice de comportamiento de flujo “n” se utilizaron para describir el comportamiento de flujo del sorgo crudo y explotado. El índice de comportamiento de flujo (n), no fue diferente ( $p < 0,05$ ) entre los tratamientos, tendiendo a aumentar en función del



tratamiento. En ese sentido, el sorgo crudo mostró el valor más bajo ( $0.641 \pm 0.01$ ) con tendencia a aumentar hasta  $0.800 \pm 0.02$  en el sorgo explotado con una HI del 20 %; representando un aumento del 24.8 % respecto al crudo. Estos tratamientos mostraron una tendencia a disminuir su adelgazamiento por efecto de cizallamiento, reduciéndose en función del aumento de la HI. Se sabe que los fragmentos de almidón hinchados se consideran fácilmente deformables y se produce una disrupción granular por el efecto de cizallamiento (Ehtiati et al., 2017). Sin embargo, el comportamiento del índice de flujo sugiere que a medida que la HI aumenta en el explotado, el almidón obtenido se vuelve más estable al daño por cizallamiento. Tal estabilidad es consistente con las propiedades de viscosidad, donde el sorgo explotado con una HI del 20 % mostró la menor viscosidad de estabilidad. Además, el comportamiento del índice "n" apunta a una aparente pérdida del carácter pseudoplástico del almidón a medida que aumenta la HI durante el explotado. Por lo tanto, el almidón del explotado es más estable al efecto de cizallamiento. Lo anterior podría deberse al crecimiento lamelar de los cristales de almidón y el grado de retrogradación del almidón observado en el sorgo explotado (Figuras 4.2 y Tabla 4.1).

Tabla 4.2 Comportamiento de flujo del sorgo crudo y explotado con diferente humedad inicial (HI).

HI	n (adimensional)	K (Pa•s <sup>n</sup> )	r <sup>2</sup>
Crudo	$0.641 \pm 0.01^b$	$0.031 \pm 0.01^c$	$0.961 \pm 0.02$
11 %	$0.685 \pm 0.06^{ab}$	$0.190 \pm 0.03^{ab}$	$0.990 \pm 0.01$
15 %	$0.758 \pm 0.02^{ab}$	$0.153 \pm 0.01^b$	$0.999 \pm 0.01$
20 %	$0.800 \pm 0.02^a$	$0.257 \pm 0.01^a$	$0.991 \pm 0.01$

Se muestra la media  $\pm$  desviación estándar de tres experimentos independientes. Letras minúsculas indican diferencias estadísticas (prueba de Tukey,  $p < 0.05$ ) entre los tratamientos. n: índice de comportamiento de flujo; k: coeficiente de consistencia; HI: humedad inicial.

Por otro lado, el índice de consistencia "K" fue diferente ( $p < 0.05$ ) dependiendo del tratamiento (Tabla 4.2). El sorgo crudo mostró el menor valor de K con  $0.031 \pm 0.01$  Pa•s<sup>n</sup>. Mientras que, al explotar el sorgo, se observó marcada tendencia a incrementar K a medida que la HI aumentaba, llegando a  $0.257 \pm 0.01$  Pa•s<sup>n</sup> (HI del 20 %). El índice



de consistencia se ha relacionado con el hinchamiento de los gránulos y la capacidad del almidón para retener agua, viéndose afectado por los entrelazamientos inter e intramoleculares de los componentes del almidón (Ehtiati et al., 2017). Por lo tanto, el aumento de  $K$  observado en el sorgo explotado podría sugerir un aumento en la formación de enlaces cruzados y la reorganización de la red de componentes del almidón durante el procesamiento, favoreciendo su capacidad de absorber y retener agua. Esto es coherente con la alta viscosidad inicial y el alto grado de retrogradación observado en el sorgo explotado.

### 4.3.2.3 Propiedades viscoelásticas

En la Figura 4.6a se muestra la evaluación de las propiedades viscoelásticas del sorgo crudo y explotado. En el intervalo evaluado, todas las muestras mostraron una ligera variación de los valores de ambos módulos ( $G'$  y  $G''$ ) en función de la frecuencia, indicando una dependencia de la frecuencia. Por otra parte, se observó un predominio de  $G'$  sobre  $G''$ . Lo anterior se ha asociado con un comportamiento suave del gel (Sharma et al., 2020).

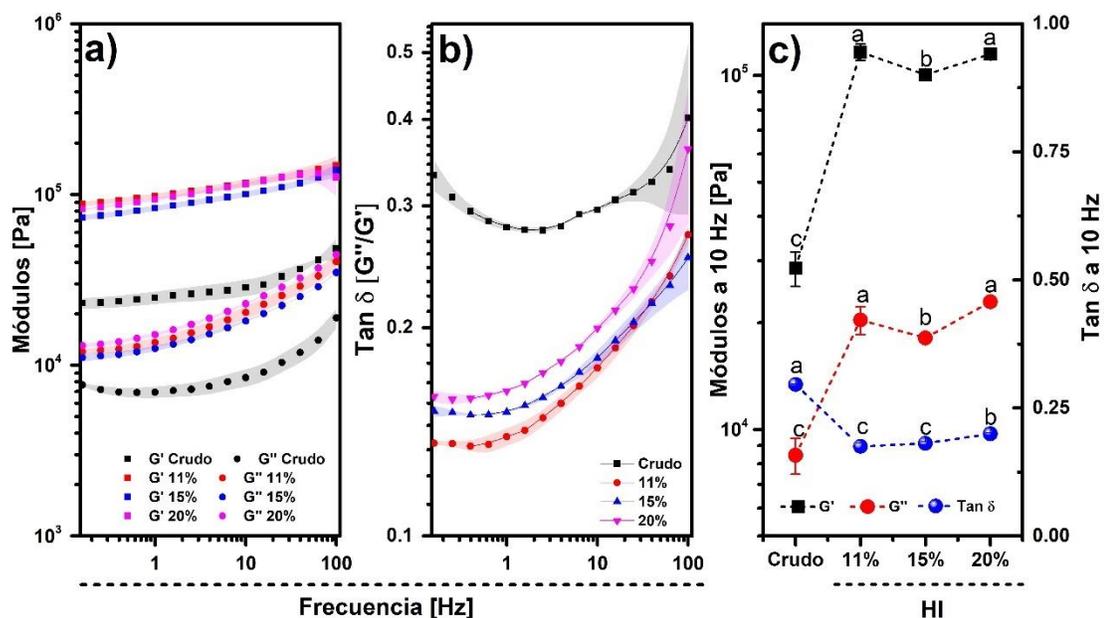


Figura 4.6 Comportamiento de las propiedades viscoelásticas de los sorgos crudos y explotados. Se grafica la media  $\pm$  desviación estándar (área sombreada) de tres experimentos independientes. En la Figura 3.6c, letras diferentes indican diferencia



estadística (prueba de Tukey,  $p < 0.05$ ) entre HI en el parámetro evaluado.  $G'$ : módulo de almacenamiento;  $G''$ : módulo de pérdida. a) módulos  $G'$  y  $G''$

El módulo  $G'$  representa la energía almacenada durante un ciclo de deformación, mientras que  $G''$  indica la energía disipada en forma de calor en un ciclo de deformación (Murata, 2012). En cuanto al factor de pérdida  $\tan \delta$  (Figura 4.6b), los tratamientos mostraron la misma tendencia a aumentar su valor a medida que aumentaba la frecuencia (Hz.), señalando un incremento del módulo de pérdida ( $G''$ ). Por lo tanto, pierde energía con cada ciclo de deformación, reduciendo así parcialmente su capacidad de recuperar su estructura original (Murata, 2012). El parámetro  $\tan \delta$  describe el comportamiento viscoelástico, donde los valores  $< 1$  indican un comportamiento elástico, por lo tanto, un dominio del componente elástico ( $G'$ ) en el gel de almidón (Zehra et al., 2020). Mientras tanto, los valores  $> 1$  reflejan un comportamiento más viscoso y una influencia significativa del módulo de pérdida ( $G''$ ) (Siroha et al., 2019). Los valores de  $\tan \delta$  se acercaron a 0.3, mostrando un predominio del comportamiento elástico en los sistemas.

Para conocer el efecto del tratamiento sobre los módulos de almacenamiento ( $G'$ ) y de pérdida ( $G''$ ), así como el factor de pérdida ( $\tan \delta$ ), se compararon los valores a una frecuencia de 10 Hz (Figura 4.6c). En cuanto a los módulos  $G'$  y  $G''$ , se observó una diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) entre los crudos y los granos de sorgo reventado. El sorgo crudo presentó valores de  $2.9 \times 10^4 \pm 3182$  Pa y  $8.5 \times 10^3 \pm 983$  Pa para  $G'$  y  $G''$ . Sin embargo, ambos módulos aumentaron después del explotado, siendo estadísticamente iguales entre las diferentes HI analizadas. En ese sentido, el módulo  $G'$  varió de 1 a  $1.2 \times 10^5$  Pa, mientras que los valores de  $G''$  oscilaron entre 1.8 y  $2.3 \times 10^4$  Pa. Es sabido que características como la fase continua, la concentración y la deformabilidad de los gránulos de almidón hinchados determinan las características reológicas de las dispersiones acuosas de almidón. En ese sentido, un aumento del módulo implica un incremento de la resistencia a la deformación del material (Sharma et al., 2015). Asimismo, un aumento del módulo se ha asociado a la formación de nuevas fuerzas (enlaces) intermoleculares, que proporcionan una mayor estabilidad al material (Contreras-Jiménez et al., 2019). Por lo tanto, este aumento de los módulos puede



deberse al grado de retrogradación y al crecimiento lamelar que se observó en el sorgo explotado.

Independientemente del tratamiento, los valores de  $\text{Tan } \delta$  fueron inferiores a 1 (Figura 3c); cuyos valores oscilaron entre 0.175 a 0.30, indicando un comportamiento elástico. Por otro lado, el sorgo explotado con una HI de 11, 15 y 20 % mostraron valores de  $\text{Tan } \delta$  más bajos que el sorgo crudo. Lo anterior indica una mayor tasa de almacenamiento de energía por ciclo y un comportamiento más elástico. Sin embargo, en el sorgo crudo, el almidón no está gelatinizado, por lo que tiene una absorción de agua limitada y no forma geles. Por el contrario, el almidón del sorgo explotado alcanzó una gelatinización casi total (Tabla 4.1); en consecuencia, su capacidad de absorber agua y formar geles aumentó drásticamente. Así, se explican los bajos valores de  $G'$  y  $G''$  así como el alto  $\text{Tan } \delta$  observado en el sorgo crudo.

Los resultados describen una matriz más estable, en la que la movilidad de los componentes está limitada debido a la formación de enlaces cruzados (Sudheesh et al., 2020). Así, se sugiere que el explotado del sorgo generó una matriz que se comporta de manera más elástica, manteniendo su estructura a la deformación aplicada.

### 4.3.3 Relación entre las propiedades estructurales y el comportamiento reológico del sorgo explotado

Con el fin de conocer cómo las características estructurales del sorgo explotado influyen sobre las propiedades reológicas, se realizó un análisis de correlación entre las variables estudiadas (Figura 3.7). Las propiedades de la viscosidad se correlacionaron con la presencia de los picos a 13.08 y 20.01° (2 $\theta$ ) observados en los rayos X; correlacionándose negativamente con la temperatura de pasta, así como con las viscosidades máxima, de estabilidad, mínima, final y de retroceso ( $r = -0.92$  a  $-0.99$ ). Por el contrario, la viscosidad inicial se correlacionó positivamente ( $r = 0.94$ ). En consecuencia, el crecimiento de lamelas cristalinas de almidón durante el explotado del sorgo favoreció el aumento de la viscosidad inicial y redujo el perfil de viscosidad. Cabe destacar que aumentó la



estabilidad térmica (calentamiento o enfriamiento) del almidón de sorgo; lo que resulta en una menor viscosidad de estabilidad “breakdown” y retroceso.

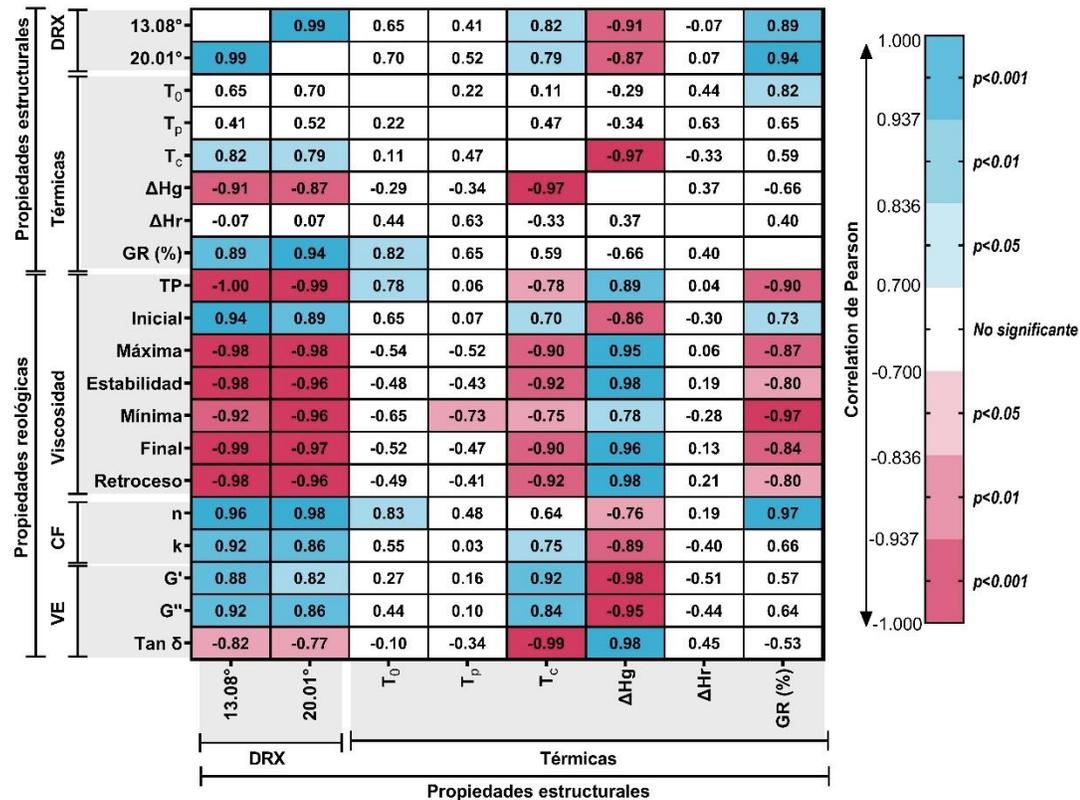


Figura 4.7 Comportamiento de las propiedades viscoelásticas de los sorgos crudos y explotados. Colores diferentes representan la fuerza, la dirección y el nivel de significancia de la correlación. DRX: rayos X; VE: propiedades viscoelásticas; FC: curvas de flujo; T<sub>i</sub>: temperatura de inicio; T<sub>p</sub>: temperatura máxima; T<sub>f</sub>: temperatura final. ΔHg: entalpía de gelatinización; ΔHr: entalpía de retrogradación; GR: grado de retrogradación. G': módulo de almacenamiento; G'': módulo de pérdida; Tan δ: factor de pérdida. n: índice de comportamiento del flujo; k: coeficiente de consistencia.

El índice de comportamiento del flujo “n” se correlacionó positivamente con los picos a 13.08 ( $r= 0.96$ ) y 20.01° ( $r= 0.98$ ), así como con el GR ( $r= 0.97$ ). Mientras tanto, la entalpía de gelatinización (ΔHg) se correlacionó negativamente con este parámetro ( $r= -0.76$ ). En ese sentido, los cambios estructurales ocurridos en el almidón durante el explotado, como la retrogradación y el crecimiento lamelar cristalino, disminuyen el



comportamiento pseudoplástico del almidón del sorgo, tendiendo a mostrar una mayor estabilidad ante el efecto de cizalla. Por otra parte, el coeficiente de consistencia "K" se correlacionó positivamente con los picos a 13.08 y 20.01° ( $r= 0.96$  a  $0.98$ ). En cambio, la entalpía de gelatinización ( $\Delta H_g$ ) mostró una correlación negativa con este parámetro ( $r= -0.89$ ). Estos datos sugieren, por lo tanto, que a partir de la gelatinización del almidón y de la recristalización parcial del almidón (crecimiento lamelar) durante el explotado, se forman nuevos arreglos moleculares y enlaces cruzados que aumentan la capacidad de absorción y retención de agua del almidón. En consecuencia, el coeficiente de consistencia aumenta.

Por otra parte, las propiedades viscoelásticas como el módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y el módulo de pérdida ( $G''$ ) se correlacionaron positivamente con los picos a 13.08 y 20.01° ( $r= 0.82$  a  $0.92$ ). Los módulos  $G'$  y  $G''$  se correlacionaron negativamente con la entalpía de gelatinización ( $\Delta H_g$ ) ( $r= -0.89$  a  $-0.95$ ). El factor de pérdida ( $\text{Tan } \delta$ ) se correlacionó negativamente rayos X ( $r= -0.77$  a  $-0.82$ ) y positivamente con la entalpía de gelatinización ( $r= 0.98$ ). Lo anterior sugiere que a medida que la humedad inicial aumenta, se produce un mayor grado de gelatinización durante el explotado. Debido a ello se producen reordenamientos moleculares y enlaces cruzados entre los componentes del almidón, obtenido así una matriz más elástica y estable, comparado con la del sorgo crudo.



#### 4.4 Conclusiones del capítulo

Las condiciones de temperatura y presión alcanzadas durante el proceso de explotado dieron como resultado una gelatinización parcial del almidón del sorgo, la cual fue dependiente del contenido de humedad inicial (HI). Como resultado, los cristales ortorrómbicos del almidón de sorgo fueron disrumpidos, aumentando así la fase amorfa. Sin embargo, la presión de vapor produjo un crecimiento lamelar de los cristales de almidón, el cual fue evidenciado por la aparición de un pico a  $13.08^\circ 2\theta$  en el patrón de difracción de rayos X. Asimismo, el FTIR verificó este daño estructural debido a la pérdida del pico a  $1045\text{ cm}^{-1}$ .

Las modificaciones estructurales en el sorgo explotado impactaron directamente en su comportamiento reológico. En ese sentido, el almidón del sorgo explotado fue más estable al tratamiento térmico y a condiciones de cizalla que el crudo; presentando los valores más bajos de viscosidad de estabilidad “breakdown” y retroceso. Asimismo, la morfología y los reordenamientos moleculares del almidón de sorgo explotado aumentaron la solubilidad y la absorción de agua a bajas temperaturas, reflejándose en su alta viscosidad inicial, el índice de comportamiento de flujo “n” y el coeficiente de consistencia “K”.

Por último, el comportamiento viscoelástico mostró un aumento de la resistencia a la deformación, debido a la formación de nuevas interacciones intermoleculares en el sorgo explotado, proporcionando una matriz más estable.



---

## Capítulo 5 : Conclusiones generales y trabajo futuro

---



microestructurales generados en el almidón de sorgo explotado (*Sorghum bicolor* L. Moench) y su impacto sobre sus propiedades reológicas.

Características como el tamaño del gránulo de almidón, tipo de distribución de tamaño de gránulos, proporción (gránulos grandes:pequeños), el contenido de endospermo córneo, grosor de pericarpio, propiedades térmicas, reológicas y estructurales permitieron diferenciar a estas variedades en su estado crudo. Destacando a la variedad Paloma (blanca) y 81g67 (roja) como candidatas para obtener las mejores características en el explotado, con el beneficio de presentar los mejores aspectos nutricionales y nutracéuticos de todo el conjunto.

Como resultado de la estandarización del método para la obtención de sorgo explotado, se encontró que una humedad inicial del 11 % en el grano, empleando una cámara de aire caliente a 210 °C y 90 s de procesamiento permitió obtener explotados de sorgo, cuyo rendimiento y calidad fue dependiente de las características fisicoquímicas de la variedad del sorgo utilizado. Se destacó la variedad blanca Paloma con el mayor rendimiento y los mejores atributos en el explotado.

De las características estudiadas en los sorgos crudos, el contenido de proteína, el grosor del pericarpio, peso hectolítrico y contenido de endospermo córneo mostró un impacto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre las características de calidad del explotado. Particularmente, el mejor volumen y rendimiento se obtuvo en variedades con mayor presencia de proteína en forma de matriz proteica envolviendo a los gránulos de almidón, así como un mayor contenido



de endospermo córneo. Por lo que, éstos podrían fungir como elementos que brinden resistencia al gránulo de almidón, aumentando así la presión al interior del gránulo y permitiendo un mayor volumen de expansión.

Así mismo, el tamaño de los gránulos de almidón y el tipo de distribución de tamaño afectan las propiedades del sorgo explotado, donde una distribución bimodal (dos tamaños de gránulos) con una relación de 27:73 [pequeños:grandes] reduce los espacios vacíos en la matriz granular, generando así un explotado de mayor tamaño. Por lo anterior, este estudio es el primero en mostrar el rol de estas variables durante el proceso de explotado.

Las condiciones de temperatura y presión alcanzadas durante el proceso de explotado dieron como resultado una gelatinización del almidón del sorgo en condiciones de baja humedad, acuñándose así por primera vez el término de “gelatinización en seco”. Esta gelatinización en seco fue evidenciada por una pérdida de la transición y entalpía ( $\Delta H$ ) de gelatinización en el sorgo explotado. Como resultado, los cristales ortorrómbicos del almidón de sorgo fueron disrumpidos, aumentando así la fase amorfa. Sin embargo, dadas las condiciones de presión y vapor, se produjo un crecimiento lamelar de los cristales de almidón, dando lugar la aparición de un pico a  $7^\circ$ ,  $13.08^\circ$  y  $20^\circ$  (escala  $2\theta$ ) en el patrón de difracción de rayos-X, cuyo daño estructural fue ratificado por la pérdida del pico a  $1045\text{ cm}^{-1}$ .

Las modificaciones estructurales en el sorgo explotado impactaron directamente en su comportamiento reológico. El almidón del sorgo explotado fue más estable al tratamiento térmico y a condiciones de cizalla que el crudo; presentando los valores más bajos de viscosidad de “breakdown” y retroceso. Asimismo, la morfología y los reordenamientos moleculares del almidón de sorgo explotado aumentaron la solubilidad y la absorción de agua a bajas temperaturas, reflejándose en su alta viscosidad inicial, el índice de comportamiento de flujo “n” y el coeficiente de consistencia “K”.

Por último, el comportamiento viscoelástico mostró un aumento de la resistencia a la deformación, debido a la formación de nuevas interacciones intermoleculares en el sorgo explotado, proporcionando una matriz más estable.



## 5.2 Trabajo futuro

Tomando como base este trabajo, futuras investigaciones podrían seguir varias líneas de investigación.

Una primera línea sería centrarse en las harinas obtenidas a partir de sorgo explotado como un ingrediente y/o aditivo. Por lo que, se podrían evaluar los efectos de la incorporación de harina de sorgo explotado sobre las características tecno-funcionales, nutricionales, reológicas y sensoriales de una matriz alimentaria. Así mismo, resulta de interés el evaluar concentración de sorgo explotado añadido y su impacto sobre la vida de anaquel del producto terminado.

Por otro lado, dada la limitada información, es importante evaluar el potencial nutricional y nutracéutico del sorgo explotado. En ese sentido, sería de interés el mostrar los efectos del explotado sobre la digestibilidad del almidón y proteínas. Aunado a esto, resultaría de interés el estudio de la fibra y el contenido de almidón resistente formado después del explotado. Así mismo, la evaluación de la digestibilidad y biodisponibilidad de los compuestos fenólicos sería un camino adecuado para continuar.

Finalmente, se podrían buscar usos alternativos para el sorgo explotado como una matriz de arrastre o retenedora de micronutrientes como vitaminas o bien prebióticos.



## Anexos: productos generados

Durante el desarrollo del presente trabajo se obtuvieron los siguientes productos:

### A.1 Artículos publicados SCI o JCR

#### A.1.1 Derivados del proyecto

1. **Cabrera-Ramírez, A. H.**, Gaytán-Martínez, M., Gonzáles-Jasso, E., Ramírez-Jiménez, A. K., Velázquez, G., Villamiel, M., & Morales-Sánchez, E. (2023). Flours from popped grains: Physicochemical, thermal, rheological, and techno-functional properties. *Food Hydrocolloids*, 135(August 2022), 108129. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108129>
2. **Cabrera-Ramírez, A.H.**, Morales-Sánchez, E., Méndez-Montealvo, G., Velazquez, G., Rodríguez-García, M.E., Villamiel, M., Gaytán-Martínez, M., 2021. Structural changes in popped sorghum starch and their impact on the rheological behavior. *International Journal of Biological Macromolecules* (Q1, IF 8.025). 186, 686-694. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.018>
3. **Cabrera-Ramírez, A.H.**, Castro-Campos, F.G., Gaytán-Martínez, M., Morales-Sánchez, E., 2020a. Relationship between the corneous and floury endosperm content and the popped sorghum quality. *Journal of Cereal Science* (Q1, IF 4.075). 95, 102999. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102999>
4. Castro-Campos, F.G., **Cabrera-Ramírez, A.H.**, Morales-Sánchez, E., Rodríguez-García, M.E., Villamiel, M., Ramos-López, M., Gaytán-Martínez, M., 2021. Impact of the popping process on the structural and thermal properties of sorghum grains (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Food Chemistry* (Q1, IF 9.235). 348, 129092. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129092>
5. **Ángel Humberto Cabrera-Ramírez**; Fernanda Guadalupe Castro-Campos; Eduardo Morales-Sánchez; Marcela Gaytán-Martínez. (2021). Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) como opción para obtener una botana saludable y su aceptabilidad sensorial. NTHE del CONCYTEQ, ISSN: 2007-9079. (Revista CONACYT)

#### A.1.2 Colaboración

1. G.G. Vázquez-Sosa, A. H. **Cabrera-Ramírez**, M. L. Reyes-Vega, E. Morales-Sánchez, M. Gaytán-Martínez, L. B. Vega-Vázquez., 2022. Alternative technologies for the production of Popped Sorghum: a comparative study. *Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05592-0>
2. Dorantes-Campuzano, M.F., **Cabrera-Ramírez, A.H.**, Rodríguez-García, M.E., Palacios-Rojas, N., Preciado-Ortíz, R.E., Luzardo-Ocampo, I., Gaytán Martínez, M. 2022. Effect of maize processing on amylose-lipid complex in pozole, a traditional Mexican dish. *Applied Food Research*. 2, 100078. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100078>
3. Morales-Sánchez, E., **Cabrera-Ramírez, A.H.**, Gaytán-Martínez, M., Mendoza-Zuavillaga, A.L., Velázquez, G., Méndez-Montealvo, M.G., Rodríguez-García, M.E. 2021. Heating-cooling extrusion cycles as a method to improve the physicochemical properties of extruded corn starch. *International Journal of Biological Macromolecules* (Q1, IF 8.025). 188, 620-627. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.189>



4. **Cabrera-Ramírez, A.H.**, Morales-Koelliker, D., Aguilar-Raymundo, V.G., 2021. Milk solids replacement with chickpea flour in a yogurt system and their impact on their physicochemical, rheological, and microstructural properties during storage. *Scientia Agropecuaria* (Q3, IF 1.48). 12, 385–391. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.042>
5. **Cabrera-Ramírez, A.H.**, Cervantes-Ramírez, E., Morales-Sánchez, E., Rodríguez-García, M.E., Reyes-Vega, M.D.L.L., Gaytán-Martínez, M., 2021. Effect of Extrusion on the Crystalline Structure of Starch during RS5 Formation. *Polysaccharides* 2, 187–201. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides2010013>
6. **Cabrera-Ramírez, A.H.**, Luzardo-Ocampo, I., Ramírez-Jiménez, A.K., Morales-Sánchez, E., Campos-Vega, R., Gaytán-Martínez, M., 2020b. Effect of the nixtamalization process on the protein bioaccessibility of white and red sorghum flours during in vitro gastrointestinal digestion. *Food Research International* (Q1, IF 7.425). 134, 109234. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109234>
7. Cervantes-Ramírez, J.E., **Cabrera-Ramírez, A.H.**, Morales-Sánchez, E., Rodríguez-García, M.E., Reyes-Vega, M. de la L., Ramírez-Jiménez, A.K., Contreras-Jiménez, B.L., Gaytán-Martínez, M., 2020. Amylose-lipid complex formation from extruded maize starch mixed with fatty acids. *Carbohydrate Polymers* (Q1, IF 10.723). 246, 116555. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116555>
8. Luzardo-Ocampo, I., Ramírez-Jiménez, A.K., **Cabrera-Ramírez, A.H.**, Rodríguez-Castillo, N., Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Gaytán-Martínez, M., 2020. Impact of cooking and nixtamalization on the bioaccessibility and antioxidant capacity of phenolic compounds from two sorghum varieties. *Food Chemistry* (Q1, IF 9.235). 309, 125684. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125684>

## A.2 Artículos de divulgación científica

1. Vázquez-Sosa, G. G., **Cabrera-Ramírez A.H.**, Gaytán-Martínez M., Morales-Sánchez E. (2021). Métodos populares para obtener explotados de sorgo. *Revista Innovate* No.3, 2da época abril-junio. Disponible en: [https://cv.cicataagro.ipn.mx/Paginas/images/revista\\_innovate/03\\_abril-junio-2021/Innovate\\_No\\_3\\_2da\\_epoca.pdf](https://cv.cicataagro.ipn.mx/Paginas/images/revista_innovate/03_abril-junio-2021/Innovate_No_3_2da_epoca.pdf)
2. Barrón-García O. Y., **Cabrera-Ramírez A. H.**, Gaytán-Martínez M., Morales-Sánchez E. (2021). Tecnologías emergentes en el procesamiento de alimentos. *Revista Innovate* No 1 2da época, pág. 10-13. [https://issuu.com/cicataqueretaro/docs/innovate\\_no.1\\_2da\\_epoca\\_correo](https://issuu.com/cicataqueretaro/docs/innovate_no.1_2da_epoca_correo)

## A.3 Presentaciones orales en congresos internacionales

1. Evaluation of the capability of eight sorghums cultivars harvested in Mexico to produce popsorghum. Cabrera-Ramírez, A.H., Castro-Campos, F.G., Morales-Sánchez, E., Gaytán-Martínez, M. 9th Food Science, Biotechnology & Safety congress (e-Latin Food 2020).
2. Digestibilidad y biodisponibilidad *in vitro* de proteína de Sorgo Rojo (*Sorghum Bicolor* L. Moench) Nixtamalizado. Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Morelia 2019, con publicación de memoria inextenso: ISSN 1946-5351, Volumen 11, No. 2, 2019, pp:318-323.
3. Obtención de almidón resistente tipo III mediante ciclos de calentamiento-enfriamiento en extrusión. Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Celaya 2019, con publicación de memoria inextenso: ISSN 1946-5351, Volumen 11, No. 9, 2019, pp:414-419.



#### A.4 Pláticas en congresos y eventos de divulgación científica

1. Caracterización nutrimental, nutraceutica, índice glucémico *in vitro* y aceptabilidad sensorial de sorgo explotado. 12 Congreso Internacional de Investigación, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. 7 de octubre de 2021.
2. Generación de valor agregado de maíces pigmentados criollos cultivados agroecológicamente. En el 2º Coloquio Maíz criollo: perspectivas para sistemas alimentarios sustentables realizado a distancia el 12 y 13 de mayo de 2022.

#### A.5 Estancias de investigación

1. Estancia de investigación en Instituto de Investigación en Ciencias de la Alimentación (CIAL) de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM-CSIC), Madrid, España. Marzo-septiembre 2022.

#### A.6 Participación en proyectos de investigación

1. Proyecto SIP-IPN No. 20221359: Síntesis, Caracterización Y Prueba De Un Sistema Prebiótico (Almidón /Pectina)- Probiótico Obtenido Por Extrusión Y Co-Extrusión. Becario BEIFI, enero 2022-diciembre 2022.
2. Proyecto SIP-IPN No. 20211175: Obtención De Almidón Resistente (AR3) Empleando Tecnologías Emergentes: Calentamiento Óhmico Y Extrusión. Becario BEIFI, enero 2019-diciembre 2021
3. **Responsable técnico** del proyecto de Innovación del IPN alumnos (Modalidad II “innovación”): “Tecnología de explotado para la modificación del almidón de sorgo”. Colaboración con Universidad Autónoma de Querétaro y la Universidad Autónoma de Madrid. Duración 2 años (01/01/2021-30/12/2022).
4. Proyecto CONACyT: Colaborador en el Proyecto 315890, Convocatoria FOP08-2021-01, Modalidad FAIII “Generación de valor agregado a maíces pozoleros criollos cultivados agroecológicamente de la región del Bajío”.
5. Colaborador en proyecto FOPER-2020-FQU01547 “Evaluación Del Impacto Del Proceso De Explotado Sobre El índice Glucémico De Palomitas De Sorgo (*Sorghum Bicolor* L. Moench) Mediante Un Estudio Clínico Con Personas Sanas”

#### A.7 Premios y distinciones

1. 2do lugar en el 8vo encuentro de jóvenes investigadores del área de ciencias naturales y exactas. Proyecto: Formación de complejos amilosa-lípidos en pozole. Colaborador.
2. 2do lugar en la convocatoria Jóvenes Investigadores 2020 desarrollado por el Poder del Estado de Querétaro a través de SEJUVE.



## Bibliografía

- AACC. (2000). *AACC International (2000) Approved methods, 11th edn. American Association of Cereal Chemists (AACC) International*, (11a ed.).
- Afify, A. E.-M. M. R., El-Beltagi, H. S., Abd El-Salam, S. M., & Omran, A. A. (2012). Oil and Fatty Acid Contents of White Sorghum Varieties under Soaking, Cooking, Germination and Fermentation Processing for Improving Cereal Quality. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 40(1), 86. <https://doi.org/10.15835/nbha4017585>
- Agah, S., Kim, H., Mertens-Talcott, S. U., & Awika, J. M. (2017). Complementary cereals and legumes for health: Synergistic interaction of sorghum flavones and cowpea flavonols against LPS-induced inflammation in colonic myofibroblasts. *Molecular Nutrition & Food Research*, 61(7), 1600625. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201600625>
- Althwab, S., Carr, T. P., Weller, C. L., Dweikat, I. M., & Schlegel, V. (2015). Advances in grain sorghum and its co-products as a human health promoting dietary system. *Food Research International*, 77, 349-359. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.08.011>
- Arriaga-Pérez, W., Gaytán-Martínez, M., & Reyes-Vega, M. L. (2019). Methods for the measurement of maize grain hardness: review. *Digital Ciencia@UAQRO*, 12(2), 67-78. <http://ciencia.uaq.mx/index.php/ojs/article/view/45/37>
- Awika, J. M. (2011). Sorghum Flavonoids: Unusual Compounds with Promising Implications for Health. En *Advances in Cereal Science: Implication to Food Processing and Health Promotion* (pp. 171-200). <https://doi.org/10.1021/bk-2011-1089.ch009>
- Bean, S. R., Wilson, J. D., Moreau, R. A., Galant, A., Awika, J. M., Kaufman, R. C., Adrianos, S. L., & Ioerger, B. P. (2019). Structure and Composition of the Sorghum Grain. En *Sorghum: State of the Art and Future Perspectives* (pp. 173-214). American Society of Agronomy and Crop Science Society of America, Inc. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr58.c9>
- Benson, K. F., Beaman, J. L., Ou, B., Okubena, A., Okubena, O., & Jensen, G. S. (2013). West African Sorghum bicolor Leaf Sheaths Have Anti-Inflammatory and Immune-Modulating Properties In Vitro. *Journal of Medicinal Food*, 16(3), 230-238. <https://doi.org/10.1089/jmf.2012.0214>
- Bianchini, M. D. G. de A., & Beléia, A. D. P. (2010). Umidade e congelamento de grãos de amaranto e sua capacidade de expansão térmica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45(8), 917-924. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000800018>



Blazek, J. (2008). *Role of amylose in structure-function relationship in starches from australian wheat varieties* (Número August). The University of Sydney.

Borras, F., Seetharaman, K., Yao, N., Robutti, J. L., Percibaldi, N. M., & Eyherabide, G. H. (2006). Relationship Between Popcorn Composition and Expansion Volume and Discrimination of Corn Types by Using Zein Properties. *Cereal Chemistry Journal*, 83(1), 86-92. <https://doi.org/10.1094/CC-83-0086>

Burdette, A., Garner, P. L., Mayer, E. P., Hargrove, J. L., Hartle, D. K., & Greenspan, P. (2010). Anti-Inflammatory Activity of Select Sorghum (*Sorghum bicolor*) Brans. *Journal of Medicinal Food*, 13(4), 879-887. <https://doi.org/10.1089/jmf.2009.0147>

Burdette, A. L. (2007). *Nutraceutical Uses of Sorghum Bran (Sorghum Bicolor)*. University of Georgia.

Butrón, R., Michma, R., Silva, E., & Siñani, O. (2015). Características de grano relacionados con rendimiento de trigo. *Revista Científica de Investigación INFO-INIAF*, 1, 68-76.

Cabrera-Ramírez, Á. H. (2015). *Efecto de la cocción térmico alcalina sobre los factores antinutricios y nutricios presentes en dos variedades de Sorgo (Sorghum Bicolor L. Moench)* [CICATA-IPN]. [https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/21293/Tesis\\_Angel-Humberto-Cabrera-Ramirez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/21293/Tesis_Angel-Humberto-Cabrera-Ramirez.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Cabrera-Ramírez, A. H., Castro-Campos, F. G., Gaytán-Martínez, M., & Morales-Sánchez, E. (2020). Relationship between the corneous and floury endosperm content and the popped sorghum quality. *Journal of Cereal Science*, 95(marzo), 102999. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.102999>

Cabrera-Ramírez, A. H., Luzardo-Ocampo, I., Ramírez-Jiménez, A. K., Morales-Sánchez, E., Campos-Vega, R., & Gaytán-Martínez, M. (2020). Effect of the nixtamalization process on the protein bioaccessibility of white and red sorghum flours during in vitro gastrointestinal digestion. *Food Research International*, 134(April), 109234. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109234>

Cabrera-Ramírez, A. H., Morales-Sánchez, E., Méndez-Montealvo, G., Velazquez, G., Rodríguez-García, M. E., Villamiel, M., & Gaytán-Martínez, M. (2021). Structural changes in popped sorghum starch and their impact on the rheological behavior. *International Journal of Biological Macromolecules*, 186(julio), 686-694. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.018>

Carballo Cuevas, B. Z. (2017). *Obtención y caracterización de almidones termoplásticos obtenidos a partir de almidones injertados con poliésteres biodegradables*. Centro de Investigación Científica de Yucatán.

Carr, T. P., Weller, C. L., Schlegel, V. L., Cuppett, S. L., Guderian, D. M., & Johnson, K. R. (2005). Grain Sorghum Lipid Extract Reduces Cholesterol Absorption and Plasma Non-HDL Cholesterol Concentration in Hamsters. *The Journal of*



*Nutrition*, 135(9), 2236–2240. <https://doi.org/10.1093/jn/135.9.2236>

Castro-Campos, F. G., Cabrera-Ramírez, A. H., Morales-Sánchez, E., Rodríguez-García, M. E., Villamiel, M., Ramos-López, M., & Gaytán-Martínez, M. (2021). Impact of the popping process on the structural and thermal properties of sorghum grains (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Food Chemistry*, 348, 129092. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129092>

Cervantes-Ramírez, J. E., Cabrera-Ramírez, A. H., Morales-Sánchez, E., Rodríguez-García, M. E., Reyes-Vega, M. de la L., Ramírez-Jiménez, A. K., Contreras-Jiménez, B. L., & Gaytán-Martínez, M. (2020). Amylose-lipid complex formation from extruded maize starch mixed with fatty acids. *Carbohydrate Polymers*, 246, 116555. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116555>

Chavan, U. D., Patil, J. V., & Shinde, M. S. (2016). Nutritional And Roti Quality Of Sorghum Genotypes. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 10(2), 80. <https://doi.org/10.21082/ijas.v10n2.2009.p80-87>

Chiremba, C., Taylor, J. R. N., Rooney, L. W., & Beta, T. (2012). Phenolic acid content of sorghum and maize cultivars varying in hardness. *Food Chemistry*, 134(1), 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.02.067>

Chuck-Hernández, C., Pérez-Carrillo, E., Heredia-Olea, E., & Serna-Saldívar, S. O. (2011). Sorgo como un cultivo multifacético para la producción de bioetanol en México: Tecnologías, avances y áreas de oportunidad. En *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(3), 529–549. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-27382011000300018](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382011000300018)

Chung, I.-M., Kim, E.-H., Yeo, M.-A., Kim, S.-J., Seo, M., & Moon, H.-I. (2011). Antidiabetic effects of three Korean sorghum phenolic extracts in normal and streptozotocin-induced diabetic rats. *Food Research International*, 44(1), 127–132. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.051>

Ciacci, C., Maiuri, L., Caporaso, N., Bucci, C., Del Giudice, L., Rita Massardo, D., Pontieri, P., Di Fonzo, N., Bean, S. R., Ioerger, B., & Londei, M. (2007). Celiac disease: In vitro and in vivo safety and palatability of wheat-free sorghum food products. *Clinical Nutrition*, 26(6), 799–805. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2007.05.006>

CODEX. (1995). Norma del Codex Stan 153-1985, Para Maíz. *Codex Stan 153\_1985*.

Contreras-Jiménez, B., Gaytán-Martínez, M., Morales-Sánchez, E., Figueroa-Cardenas, J. D., Pless, R., González-Jasso, E., Méndez-Montealvo, G., & Velazquez, G. (2017). Effects of Tempering Time, Ca(OH) 2 Concentration, and Particle Size on the Rheological Properties of Extruded Corn Flour. *Cereal Chemistry Journal*, 94(2), 230–236. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-03-16-0058-R>

Contreras-Jiménez, B., Vázquez-Contreras, G., de los Ángeles Cornejo-Villegas, M., del



- Real-López, A., & Rodríguez-García, M. E. (2019). Structural, morphological, chemical, vibrational, pasting, rheological, and thermal characterization of isolated jicama (*Pachyrhizus* spp.) starch and jicama starch added with Ca(OH)<sub>2</sub>. *Food Chemistry*, *283*(noviembre), 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.013>
- Cornejo-Ramírez, Y. I., Martínez-Cruz, O., Del Toro-Sánchez, C. L., Wong-Corral, F. J., Borboa-Flores, J., & Cinco-Moroyoqui, F. J. (2018). The structural characteristics of starches and their functional properties. *CyTA - Journal of Food*, *16*(1), 1003-1017. <https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1518343>
- Coulter, T. P. (Tom P. . (2002). *Food: the chemistry of its components*. Royal Society of Chemistry.
- Da Silva, L. S., & Taylor, J. R. N. (2004). Sorghum Bran as a Potential Source of Kafirin. *Cereal Chemistry*, *81*(3), 322-327. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.3.322>
- Dayakar Rao, B. (2019). Sorghum Value Chain for Food and Fodder Security. En *Breeding Sorghum for Diverse End Uses* (pp. 409-419). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101879-8.00023-1>
- Dharmaraj, U., Parameswara, P., Somashekar, R., & Malleshi, N. G. (2014). Effect of processing on the microstructure of finger millet by X-ray diffraction and scanning electron microscopy. *Journal of Food Science and Technology*, *51*(3), 494-502. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0536-4>
- Domanski, C., Giorda, L. M., & Foresin, O. (1997). Composición y calidad del grano de sorgo. *Sitio Argentino de Producción Animal*, *7*, 47-50. [www.produccion-animal.com.ar](http://www.produccion-animal.com.ar)
- Duodu, K. G., Tang, H., Grant, A., Wellner, N., Belton, P. S., & Taylor, J. R. N. (2001). FTIR and solid state <sup>13</sup>C NMR spectroscopy of proteins of wet cooked and popped sorghum and maize. *Journal of Cereal Science*, *33*(3), 261-269. <https://doi.org/10.1006/jcsc.2000.0352>
- Dykes, L., Seitz, L. M., Rooney, W. L., & Rooney, L. W. (2009). Flavonoid composition of red sorghum genotypes. *Food Chemistry*, *116*(1), 313-317. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2009.02.052>
- Ehtiati, A., Koocheki, A., Shahidi, F., Razavi, S. M. A., & Majzoobi, M. (2017). Pasting, rheological, and retrogradation properties of starches from dual-purpose sorghum lines. *Starch - Stärke*, *69*(7-8), 1600262. <https://doi.org/10.1002/star.201600262>
- Espinosa-Ramírez, J., & Serna-Saldívar, S. O. (2016). Functionality and characterization of kafirin-rich protein extracts from different whole and decorticated sorghum genotypes. *Journal of Cereal Science*, *70*, 57-65. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.05.023>



Evers, T., & Millar, S. (2002). Cereal Grain Structure and Development: Some Implications for Quality. *Journal of Cereal Science*, 36(3), 261-284. <https://doi.org/10.1006/JCRS.2002.0435>

FAOSTAT. (2018). *Food and Agriculture Data*. FAO statistics.

Fonseca-Flrido, H. A., Gómez-Aldapa, C. A., López-Echevarría, G., Velazquez, G., Morales-Sánchez, E., Castro-Rosas, J., & Méndez-Montealvo, G. (2018). Effect of granular disorganization and the water content on the rheological properties of amaranth and achira starch blends. *LWT*, 87, 280-286. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.09.004>

Fonseca-Flrido, H. A., Gómez-Aldapa, C. A., Velazquez, G., Hernández-Hernández, E., Mata-Padilla, J. M., Solís-Rosales, S. G., & Méndez-Montealvo, G. (2017). Gelling of amaranth and achira starch blends in excess and limited water. *LWT - Food Science and Technology*, 81, 265-273. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.061>

García-Lara, S., Bergvinson, D. J., Burt, A. J., Ramputh, A. I., Díaz-Pontones, D. M., & Arnason, J. T. (2004). The Role of Pericarp Cell Wall Components in Maize Weevil Resistance. *Crop Science*, 44(5), 1546-1552. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.1546>

Gaytán-Martínez, M., Cabrera-Ramírez, Á. H., Morales-Sánchez, E., Ramírez-Jiménez, A. K., Cruz-Ramírez, J., Campos-Vega, R., Velazquez, G., Loarca-Piña, G., & Mendoza, S. (2017). Effect of nixtamalization process on the content and composition of phenolic compounds and antioxidant activity of two sorghums varieties. *Journal of Cereal Science*, 77, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.06.014>

Gaytán-Martínez, M., Figueroa-Cárdenas, J. D., Reyes-Vega, M. L., Rincon-Sánchez, F., & Morales-Sánchez, E. (2006). Microstructure of starch granule related to kernel hardness in corn. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(2), 135-139.

Gökmen, S. (2004). Effects of moisture content and popping method on popping characteristics of popcorn. *Journal of Food Engineering*, 65(3), 357-362. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.01.034>

Golubinova, I., Katova, A., Ilieva, A., & Marinov-Serafimov, P. (2017). Popping characteristics of sorghum genotypes (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Food and Feed Research*, 44(2), 115-121. <https://doi.org/10.5937/FFR1702115G>

Hamden, K., Allouche, N., Damak, M., & Elfeki, A. (2009). Hypoglycemic and antioxidant effects of phenolic extracts and purified hydroxytyrosol from olive mill waste *in vitro* and in rats. *Chemico-Biological Interactions*, 180(3), 421-432. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2009.04.002>

Hargrove, J. L., Greenspan, P., Hartle, D. K., & Dowd, C. (2011). Inhibition of



- Aromatase and  $\alpha$ -Amylase by Flavonoids and Proanthocyanidins from *Sorghum bicolor* Bran Extracts. *Journal of Medicinal Food*, 14(7-8), 799-807. <https://doi.org/10.1089/jmf.2010.0143>
- Hassan, S., Imran, M., Ahmad, N., & Khan, M. K. (2017). Lipids characterization of ultrasound and microwave processed germinated sorghum. *Lipids in Health and Disease*, 16(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s12944-017-0516-4>
- Hoi, J. T., Weller, C. L., Schlegel, V. L., Cuppett, S. L., Lee, J.-Y., & Carr, T. P. (2009). Sorghum distillers dried grain lipid extract increases cholesterol excretion and decreases plasma and liver cholesterol concentration in hamsters. *Journal of Functional Foods*, 1(4), 381-386. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2009.09.005>
- Hoseney, R. C., Zeleznak, K., & Abdelrahman, A. (1983). Mechanism of popcorn popping. *Journal of Cereal Science*, 1(1), 43-52. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(83\)80007-1](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(83)80007-1)
- Hoyos-Leyva, J. D., Bello-Pérez, L. A., Yee-Madeira, H., Rodriguez-Garcia, M. E., & Aguirre-Cruz, A. (2017). Characterization of the flour and starch of aroid cultivars grown in Mexico. *Starch - Stärke*, 69(9-10), 1600370. <https://doi.org/10.1002/star.201600370>
- Ioerger, B., Bean, S. R., Tuinstra, M. R., Pedersen, J. F., Erpelding, J., Lee, K. M., & Herrman, T. J. (2007). Characterization of Polymeric Proteins from Vitreous and Floury Sorghum Endosperm. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(25), 10232-10239. <https://doi.org/10.1021/jf0716883>
- Jin, Z. (2018). Functional Starch and Applications in Food. En Z. Jin (Ed.), *Functional Starch and Applications in Food*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1077-5>
- Kaufman, R. C., Wilson, J. D., Bean, S. R., Xu, F., & Shi, Y.-C. (2017). Sorghum starch properties as affected by growing season, hybrid, and kernel maturity. *Journal of Cereal Science*, 74, 127-135. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.01.014>
- Khan, I., Yousif, A., Johnson, S. K., & Gamlath, S. (2013). Effect of sorghum flour addition on resistant starch content, phenolic profile and antioxidant capacity of durum wheat pasta. *Food Research International*, 54(1), 578-586. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.07.059>
- Kim, J., & Park, Y. (2012). Anti-diabetic effect of sorghum extract on hepatic gluconeogenesis of streptozotocin-induced diabetic rats. *Nutrition & Metabolism*, 9(1), 106. <https://doi.org/10.1186/1743-7075-9-106>
- Koehler, P., & Wieser, H. (2013). Chemistry of Cereal Grains. En *Handbook on Sourdough Biotechnology* (pp. 11-45). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5425-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5425-0_2)
- Kong, L., Perez-Santos, D. M., & Ziegler, G. R. (2019). Effect of guest structure on



- amylose-guest inclusion complexation. *Food Hydrocolloids*, 97(febrero), 105188. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105188>
- Kumari, R., Singh, K., Singh, R., Bhatia, N., & Nain, M. S. (2019). Development of healthy ready-to-eat (RTE) breakfast cereal from popped pearl millet. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 89(5), 877-881.
- Larkins, B. A. (2019). Proteins of the Kernel. En *Corn* (pp. 319-336). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00012-7>
- Lemlioglu-Austin, D., Turner, N. D., McDonough, C. M., & Rooney, L. W. (2012). Effects of Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] Crude Extracts on Starch Digestibility, Estimated Glycemic Index (EGI), and Resistant Starch (RS) Contents of Porridges. *Molecules*, 17(9), 11124-11138. <https://doi.org/10.3390/molecules170911124>
- Llopart, E. E., & Drago, S. R. (2016). Physicochemical properties of sorghum and technological aptitude for popping. Nutritional changes after popping. *LWT - Food Science and Technology*, 71, 316-322. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.04.006>
- Luzardo-Ocampo, I., Ramírez-Jiménez, A. K., Cabrera-Ramírez, Á. H., Rodríguez-Castillo, N., Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., & Gaytán-Martínez, M. (2020). Impact of cooking and nixtamalization on the bioaccessibility and antioxidant capacity of phenolic compounds from two sorghum varieties. *Food Chemistry*, 309(octubre), 125684. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125684>
- Ma, G., & Allen, H. C. (2004). Handbook of Spectroscopy. *Journal of the American Chemical Society*, 126(28), 8859-8860. <https://doi.org/10.1021/ja033666c>
- Mamani, I. (2015). Modeling of Thermal Properties of Persian Walnut Kernel as a Function of Moisture Content and Temperature Using Response Surface Methodology. *Journal of Food Processing and Preservation*, 39(6), 2762-2772. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12527>
- Mariotti, M., Alamprese, C., Pagani, M. A., & Lucisano, M. (2006). Effect of puffing on ultrastructure and physical characteristics of cereal grains and flours. *Journal of Cereal Science*, 43(1), 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.007>
- Marston, K., Khouryieh, H., & Aramouni, F. (2015). Evaluation of sorghum flour functionality and quality characteristics of gluten-free bread and cake as influenced by ozone treatment. *Food Science and Technology International*, 21(8), 631-640. <https://doi.org/10.1177/1082013214559311>
- Marston, K., Khouryieh, H., & Aramouni, F. (2016). Effect of heat treatment of sorghum flour on the functional properties of gluten-free bread and cake. *LWT - Food Science and Technology*, 65(2016), 637-644. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.08.063>
- Martinez, I., Wallace, G., Zhang, C., Legge, R., Benson, A. K., Carr, T. P., Moriyama,



- E. N., & Walter, J. (2009). Diet-Induced Metabolic Improvements in a Hamster Model of Hypercholesterolemia Are Strongly Linked to Alterations of the Gut Microbiota. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(12), 4175-4184. <https://doi.org/10.1128/AEM.00380-09>
- Martínez, M. M., Li, C., Okoniewska, M., Mukherjee, I., Vellucci, D., & Hamaker, B. (2018). Slowly digestible starch in fully gelatinized material is structurally driven by molecular size and A and B1 chain lengths. *Carbohydrate Polymers*, 197(junio), 531-539. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.021>
- Martínez, O., Lapo Calderón, B., Pérez Rodríguez, J., Zambrano Cabrera, C., & Maza Valle, F. (2016). Mecanismo de gelatinización del almidón nativo de banano exportable del ecuador. *Revista Colombiana de Química*, 44(2), 16-21. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v44n2.55215>
- Mason, W. R. (2009). Starch Use in Foods. En *Starch* (Tercera Edición). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-746275-2.00020-3>
- Matos-Chamorro, A., & Chambilla-Mamani, E. (2010). Importancia de la Fibra Dietética, sus Propiedades Funcionales en la Alimentación Humana. *Revista de investigación en ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1(1), 4-17.
- Méndez-Montealvo, G., García-Suárez, F. J., Paredes-López, O., & Bello-Pérez, L. A. (2008). Effect of nixtamalization on morphological and rheological characteristics of maize starch. *Journal of Cereal Science*, 48(2), 420-425. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.10.007>
- Ménera-López, I., Gaytán-Martínez, M., Reyes-Vega, M. L., Morales-Sánchez, E., & Figueroa, J. D. C. (2013). Physico-chemical properties and quality assessment of corn flour processed by a continuous ohmic heating system and traditional nixtamalization. *CyTA - Journal of Food*, 11(sup1), 8-14. <https://doi.org/10.1080/19476337.2012.762692>
- Mir, S. A., Bosco, S. J. D., Shah, M. A., Mir, M. M., & Sunooj, K. V. (2016). Process Optimization and Characterization of Popped Brown Rice. *International Journal of Food Properties*, 19(9), 2102-2112. <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1105254>
- Mishra, G., Joshi, D. C., & Kumar Panda, B. (2014). Popping and Puffing of Cereal Grains: A Review. *Journal of Grain Processing and Storage*, 1(2), 34-46.
- Mishra, G., Joshi, D. C., & Mohapatra, D. (2015). Optimization of pretreatments and process parameters for sorghum popping in microwave oven using response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology*, 52(12), 7839-7849. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1898-9>
- Mishra, G., Joshi, D. C., Mohapatra, D., & Babu, V. B. (2015). Varietal influence on the microwave popping characteristics of sorghum. *Journal of Cereal Science*, 65, 19-24. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.06.001>



- Mkandawire, N. L., Weier, S. A., Weller, C. L., Jackson, D. S., & Rose, D. J. (2015). Composition, in vitro digestibility, and sensory evaluation of extruded whole grain sorghum breakfast cereals. *LWT - Food Science and Technology*, 62(1), 662-667. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.12.051>
- Murata, H. (2012). Rheology - Theory and Application to Biomaterials. En *Polymerization* (Vol. 8, Número 3, pp. 273-281). InTech. <https://doi.org/10.5772/48393>
- Murugesan, G., & Bhattacharya, K. R. (1989). The nature of starch in popped rice. *Carbohydrate Polymers*, 10(3), 215-225. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(89\)90013-1](https://doi.org/10.1016/0144-8617(89)90013-1)
- Narváez-González, E. D., Figueroa-Cárdenas, J. D., & Suketoshi, T. (2007). Microestructural features and possible end uses of maize according to its geographic origin. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(3), 321-325.
- Narváez González, E. D., Figueroa Cárdenas, J. de D., Taba, S., Castaño Tostado, E., & Martínez Peniche, R. A. (2007). Efecto del tamaño del gránulo de almidón de maíz en sus propiedades térmicas y de pastificado. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(003), 269-277.
- Nirmal, S. V., Chavan, U. D., Pawar, G. H., Shinde, M. S., Dalvi, U. S., & Gadakh, S. R. (2017). Nutritional Quality of Hybrid Sorghum Genotypes. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(2), 586-592. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.602.066>
- NMX-FF-037-1994. Non industrialized food products for human use. Cereals. (*Sorghum Vulgare* L.). Specifications and test method. Normas mexicanas., 1 (1994).
- O'Neill, E. C., & Field, R. A. (2015). Underpinning Starch Biology with in vitro Studies on Carbohydrate-Active Enzymes and Biosynthetic Glycomaterials. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2015.00136>
- Ordoñez, M. R., Gely, M. C., & Pagano, A. M. (2012). Estudio de las propiedades físicas y de la cinética de secado de granos de maíz colorado duro. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 3(3), 153-171.
- Paiva, C. L., Aparecida, V., Queiroz, V., Aparecida, M., Teixeira, V., Wanderlei, C., & Carvalho, P. (2018). Acceptability and study of shelf life of gluten free cereal bar with popped and extruded sorghum based on a consumer acceptability. *Cad. Ciênc. Agrá.*, 10(1), 52-58.
- Palavecino, P. M., Penci, M. C., Calderón-Domínguez, G., & Ribotta, P. D. (2016). Chemical composition and physical properties of sorghum flour prepared from different sorghum hybrids grown in Argentina. *Starch/Stärke*, 68(11-12), 1055-1064. <https://doi.org/10.1002/star.201600111>



- Palavecino, P. M., Penci, M. C., & Ribotta, P. D. (2019). Impact of chemical modifications in pilot-scale isolated sorghum starch and commercial cassava starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, *135*, 521–529. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.202>
- Park, D., Allen, K. G. D. D., Stermitz, F. R., & Maga, J. A. (2000). Chemical Composition and Physical Characteristics of Unpopped Popcorn Hybrids. *Journal of Food Composition and Analysis*, *13*(6), 921–934. <https://doi.org/10.1006/jfca.2000.0943>
- Park, J. H., Lee, S. H., Chung, I.-M., & Park, Y. (2012). Sorghum extract exerts an anti-diabetic effect by improving insulin sensitivity via PPAR- $\gamma$  in mice fed a high-fat diet. *Nutrition Research and Practice*, *6*(4), 322. <https://doi.org/10.4162/nrp.2012.6.4.322>
- Pinto, V. Z., Vanier, N. L., Klein, B., Zavareze, E. D. R., Elias, M. C., Gutkoski, L. C., Helbig, E., & Dias, A. R. G. (2012). Physicochemical, crystallinity, pasting and thermal properties of heat-moisture-treated pinhão starch. *Starch - Stärke*, *64*(11), 855–863. <https://doi.org/10.1002/star.201200040>
- Pontieri, P., Mamone, G., De Caro, S., Tuinstra, M. R., Roemer, E., Okot, J., De Vita, P., Ficco, D. B. M. M., Alifano, P., Pignone, D., Massardo, D. R., & Del Giudice, L. (2013). Sorghum, a Healthy and Gluten-free Food for Celiac Patients As Demonstrated by Genome, Biochemical, and Immunochemical Analyses. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *61*(10), 2565–2571. <https://doi.org/10.1021/jf304882k>
- Pordesimo, L. O., Anantheswaran, R. C., Fleischmann, A. M., Lin, Y. E., & Hanna, M. A. (1990). Physical Properties as Indicators of Popping Characteristics of Microwave Popcorn. *Journal of Food Science*, *55*(5), 1352–1355. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb03934.x>
- Putseys, J. A., Lamberts, L., & Delcour, J. A. (2010). Amylose-inclusion complexes: Formation, identity and physico-chemical properties. *Journal of Cereal Science*, *51*(3), 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2010.01.011>
- Raigond, P., Ezekiel, R., & Raigond, B. (2015). Resistant starch in food: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *95*(10), 1968–1978. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6966>
- Rao, B. D., Geetha, S., & Kiranmai, E. (2017). *Effect of Heat Moisture Treatment on Resistant Starch Content of Sorghum Flour and Sorghum Starch*. *6*(1994), 398–403. <http://link.springer.com/10.1007/s40003-015-0177-3>
- Raquel, Escalona-Peña, A., & Romero-Arias, A. (2018). evaluación de tres cultivares de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] para la alimentación animal. *Pastos y Forrajes*, *41*(2), 93–96. <https://payfo.ihatuey.cu/index.php?journal=pasto&page=article&op=view&path%5>



B%5D=2032

- Ratnavathi, C. V., & Komala, V. V. (2016). Sorghum Grain Quality. En *Sorghum Biochemistry* (pp. 1-61). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803157-5.00001-0>
- Rodriguez-Garcia, M. E., Hernandez-Landaverde, M. A., Delgado, J. M., Ramirez-Gutierrez, C. F., Ramirez-Cardona, M., Millan-Malo, B. M., & Londoño-Restrepo, S. M. (2021). Crystalline structures of the main components of starch. *Current Opinion in Food Science*, *37*, 107-111. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.10.002>
- Rooney, T. E., & Rooney, W. L. (2013). Genotype and Environment Effects on the Popping Characteristics of Grain Sorghum. *Journal of Crop Improvement*, *27*(4), 460-468. <https://doi.org/10.1080/15427528.2013.794181>
- Salazar Lopez, N. J., Loarca-Piña, G., Campos-Vega, R., Gaytán Martínez, M., Morales Sánchez, E., Esquerra-Brauer, J. M., Gonzalez-Aguilar, G. A., & Robles Sánchez, M. (2016). The Extrusion Process as an Alternative for Improving the Biological Potential of Sorghum Bran: Phenolic Compounds and Antiradical and Anti-Inflammatory Capacity. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, *2016*(septiembre), 1-8. <https://doi.org/10.1155/2016/8387975>
- Sang, Y., Bean, S., Seib, P. A., Pedersen, J., & Shi, Y.-C. (2008). Structure and Functional Properties of Sorghum Starches Differing in Amylose Content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *56*(15), 6680-6685. <https://doi.org/10.1021/jf800577x>
- Serna-Saldivar, S. O., & Perez Carrillo, E. (2019). Food Uses of Whole Corn and Dry-Milled Fractions. En *Corn* (3a ed., Número 2018, pp. 435-467). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00016-4>
- Sharma, M., Pico, J., Martinez, M. M., & Duizer, L. (2020). The dynamics of starch hydrolysis and thickness perception during oral processing. *Food Research International*, *134*(abril), 109275. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109275>
- Sharma, M., Yadav, D. N., Singh, A. K., & Tomar, S. K. (2015). Rheological and functional properties of heat moisture treated pearl millet starch. *Journal of Food Science and Technology*, *52*(10), 6502-6510. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1735-1>
- Sharma, V., Champawat, P., & Mudgal, V. (2014). Process development for puffing of Sorghum. *International Journal of Current Research and Academic Review*, *2*(1), 164-170. [http://www.ijrcar.com/vol-5/Vinita Sharma, et al.pdf](http://www.ijrcar.com/vol-5/Vinita%20Sharma,%20et%20al.pdf)
- Shen, R.-L. L., Zhang, W.-L. L., Dong, J.-L. L., Ren, G.-X. X., & Chen, M. (2015). Sorghum resistant starch reduces adiposity in high-fat diet-induced overweight and obese rats via mechanisms involving adipokines and intestinal flora. *Food and Agricultural Immunology*, *26*(1), 120-130. <https://doi.org/10.1080/09540105.2013.876976>



- Shiga, T. M., Lajolo, F. M., & Filisetti, T. M. C. C. (2003). Cell wall polysaccharides of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 23(2), 141-148. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612003000200007>
- Shih, C.-H., Siu, Ng, R., Wong, E., Chiu, L. C. M. M., Chu, I. K., & Lo, C. (2007). Quantitative Analysis of Anticancer 3-Deoxyanthocyanidins in Infected Sorghum Seedlings. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(2), 254-259. <https://doi.org/10.1021/jf062516t>
- Shim, T.-J., Kim, T. M., Jang, K. C., Ko, J.-Y., & Kim, D. J. (2013). Toxicological Evaluation and Anti-Inflammatory Activity of a Golden Gelatinous Sorghum Bran Extract. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 77(4), 697-705. <https://doi.org/10.1271/bbb.120731>
- Silva, E. M. S., Peres, A. E. C., Silva, A. C., Leal, M. C. D. M., Lião, L. M., & Almeida, V. O. De. (2019). Sorghum starch as depressant in mineral flotation: part 1 - extraction and characterization. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 396-402. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.001>
- Siroha, A. K., Sandhu, K. S., & Punia, S. (2019). Impact of octenyl succinic anhydride on rheological properties of sorghum starch. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 11(3), 221-229. <https://doi.org/10.3920/QAS2018.1379>
- Sokrates, G. (2001). Infrared and Raman characteristic group frequencies. Tables and charts. En *Journal of Raman Spectroscopy*. <https://doi.org/10.1002/jrs.1238>
- Srdić, J., Pajić, Z., Filipović, M., & Sečanski, M. (2015). The influence of moisture content of grain on popping volume of popcorn hybrids (*Zea mays* L. everta). *Journal on Processing and Energy in Agriculture*.
- Srichuwong, S., Curti, D., Austin, S., King, R., Lamothe, L., & Gloria-Hernandez, H. (2017). Physicochemical properties and starch digestibility of whole grain sorghums, millet, quinoa and amaranth flours, as affected by starch and non-starch constituents. *Food Chemistry*, 233, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.019>
- Sudheesh, C., Sunooj, K. V., Navaf, M., Bhasha, S. A., George, J., Mounir, S., Kumar, S., & Sajeevkumar, V. A. (2020). Hydrothermal modifications of nonconventional kithul (*Caryota urens*) starch: physico-chemical, rheological properties and in vitro digestibility. *Journal of Food Science and Technology*, 57(8), 2916-2925. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04323-7>
- Suganyadevi, P., Saravanakumar, K. M., & Mohandas, S. (2013). The antiproliferative activity of 3-deoxyanthocyanins extracted from red sorghum (*Sorghum bicolor*) bran through P53-dependent and Bcl-2 gene expression in breast cancer cell line. *Life Sciences*, 92(6-7), 379-382. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2013.01.006>
- Sun, Q., Han, Z., Wang, L., & Xiong, L. (2014). Physicochemical differences between



- sorghum starch and sorghum flour modified by heat-moisture treatment. *Food Chemistry*, 145, 756–764. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.129>
- Sweley, J. C., Rose, D. J., & Jackson, D. S. (2013). Quality Traits and Popping Performance Considerations for Popcorn (*Zea mays Everta*). *Food Reviews International*, 29(2), 157–177. <https://doi.org/10.1080/87559129.2012.714435>
- Taylor, J. R., & Duodu, K. G. (2019). Traditional Sorghum and Millet Food and Beverage Products and Their Technologies. En *Sorghum and Millets* (pp. 259–292). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811527-5.00009-5>
- Teixeira, N. D. C., Queiroz, V. A. V., Rocha, M. C., Amorim, A. C. P., Soares, T. O., Monteiro, M. A. M., de Menezes, C. B., Schaffert, R. E., Garcia, M. A. V. T., & Junqueira, R. G. (2016). Resistant starch content among several sorghum (*Sorghum bicolor*) genotypes and the effect of heat treatment on resistant starch retention in two genotypes. *Food Chemistry*, 197, 291–296. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.099>
- Tester, R. F., Karkalas, J., & Qi, X. (2004). Starch—composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*, 39(2), 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2003.12.001>
- Tymchak, D. O., Mykolenko, S. Y., & Kuianov, Y. Y. (2018). Production of popped sorghum with using microwave treatment. *Зернові продукти і комбікорми (Cereal products and feed)*, 18(1), 15–20.
- USDA. (2019). Grain: World Markets and Trade. *United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service*.
- Vázquez-Carrillo, M. G., Santiago-Ramos, D., & Figueroa-Cárdenas, J. de D. (2019). Kernel properties and popping potential of Chapalote, a Mexican ancient native maize. *Journal of Cereal Science*, 86, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.01.010>
- Vishalli, Kaur, R., Raina, K. K., & Dharamvir, K. (2015). Investigation on single walled carbon nanotube thin films deposited by Langmuir Blodgett method. *Journal of AOAC International*, 080033. <https://doi.org/10.1063/1.4915424>
- Warren, F. J., Gidley, M. J., & Flanagan, B. M. (2016). Infrared spectroscopy as a tool to characterise starch ordered structure - A joint FTIR-ATR, NMR, XRD and DSC study. *Carbohydrate Polymers*, 139, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.11.066>
- Wu, G., Bennett, S. J., Bornman, J. F., Clarke, M. W., Fang, Z., & Johnson, S. K. (2017). Phenolic profile and content of sorghum grains under different irrigation managements. *Food Research International*, 97, 347–355. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.04.030>
- Xu, A., Qiu, J., Yin, Z., & Wei, C. (2019). Morphological characteristics of endosperm



in different regions of maize kernels with different vitreousness. *Journal of Cereal Science*, 87(March), 273-279. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.04.010>

Yang, L., Browning, J. D., & Awika, J. M. (2009). Sorghum 3-Deoxyanthocyanins Possess Strong Phase II Enzyme Inducer Activity and Cancer Cell Growth Inhibition Properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(5), 1797-1804. <https://doi.org/10.1021/jf8035066>

Zehra, N., Mohsin Ali, T., & Hasnain, A. (2020). Comparative study on citric acid modified instant starches (alcoholic alkaline treated) isolated from white sorghum and corn grains. *International Journal of Biological Macromolecules*, 150, 1331-1341. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.143>

Zhu, F. (2014). Structure, Physicochemical Properties, Modifications, and Uses of Sorghum Starch. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(4), 597-610. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12070>