



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA
AGROINDUSTRIAL**

TESIS

**ARABINOXILANOS, CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE SOLVENTES
Y COMPORTAMIENTO DE LA RED VISCOELÁSTICA: ANÁLISIS
COMPARATIVO EN HARINAS DE TRIGO**

Para obtener el título de
Licenciada en Ingeniería Agroindustrial

Presenta

Paulina Galindo Gómez

Director

Dr. Antonio de Jesús Cenobio Galindo

Codirectora

Dra. Maria Itria Ibba

Comité tutorial

Dra. Thania Alejandra Urrutia Hernández

Mtra. Denis de Jesús Dimas López

Mtro. Rubén Adalberto Saucedo Licona

Santiago Tulantepec; 12 de mayo de 2026



Tulancingo de Bravo, Hidalgo., a 12 de mayo de 2026

Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado
 Directora de Administración Escolar de la UAEH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado a la pasante de Licenciatura en Ingeniería Agroindustrial, **Paulina Galindo Gómez**, quien presenta el trabajo de Tesis denominado **“Arabinosilanos, capacidad de retención de solventes y comportamiento de la red viscoelástica: análisis comparativo en harinas de trigo”**, que después de revisarlo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión de este, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los miembros del jurado:

Dr. Antonio de Jesus Cenobio Galindo

Dra. Maria Itria Ibba

Dra. Thania Alejandra Urrutia Hernández

Mtra. Denis de Jesus Dimas López

Mtro. Rubén Adalberto Saucedo Licona

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente
 “Amor, Orden y Progreso”

Dr. Yair Olaydo Santiago Sáenz
 Coordinador de la Licenciatura en
 Ingeniería Agroindustrial



Av. Universidad No. 133, Col. San Miguel Huatengo, Santiago
 Tulantepec. C.P. 43775. Hidalgo, Mexico.
 Teléfono: 7717172000 Ext. 42021
 ricardo_navarro@uaeh.edu.mx

“Amor, Orden y Progreso”



uaeh.edu.mx

“La ciencia también es una forma de ver el mundo con asombro.”

— Julieta Fierro

“El cuerpo guarda memoria de todo lo vivido.”

— Tania Pérez-Salas

“Nombrar es empezar a existir.”

— Yolanda Segura

Agradecimientos

A lo largo de mi proceso de aprendizaje y crecimiento, he tenido la fortuna de sentirme rodeada de personas que han aportado tantísimo en mí. Esta tesis de investigación fue posible gracias a la guía y acompañamiento de mis tutores. Al Dr. Antonio Cenobio Galindo, por la guía, apoyo y seguimiento desde el inicio para llevar a cabo la investigación y el proceso fuera del Instituto.

A mi comité, por su tiempo y orientación a la distancia.

Mi más profundo agradecimiento y admiración a la Dra. Maria Itria Ibba, por abrirme las puertas al ahora Laboratorio de calidad de granos y alimentos, porque no es necesario saber todo, las nuevas experiencias también son oportunidades de aprendizaje; por impulsar siempre un espacio de cooperación y compromiso. Por la calidez, humanismo, equidad y sonrisa que con el que lidera un gran programa. Por creer y crear mi primera oportunidad de desempeñarme como estudiante internacional y staff.

Al Biol. Héctor González Santoyo, por la guía, acompañamiento y pláticas cargadas de sabiduría, paciencia y experiencia para desarrollarme académica y socialmente. Por creer en mí y darme cátedra del crecimiento y aprovechamiento de las oportunidades. De procurar a la estudiante e impulsar a la mujer trabajadora.

A la Ing. Cynthia Velazquez Luna, por el acompañamiento, la enseñanza y la buena disposición de mostrar el camino. Por su paciencia y calidez como maestra y coordinadora.

A la Dra. Nayelli Hernández Espinosa. Por ser una gran mujer y guía, no solo en las largas horas de pláticas y pruebas en el laboratorio, sino también de cómo recorrer con más gusto y ligereza la vida. Gracias por tu tiempo, paciencia y ofrecerme tu invaluable ayuda en todo momento posible, ha sido un gran parteaguas de inicio a fin.

Al Ing. Gabriel Posadas Romano. Por el gran ser humano y mentor que es, por su grande paciencia y corazón, por compartir la inmensidad de su conocimiento y vocación. Por hacer tan fácil el trabajo y ser tan inclusivo en cada proceso. Tu apoyo ha significado tanto para mí.

A todo el staff del laboratorio que me guio en cada área, con su experiencia me ayudaron a crecer dentro y fuera de calidad.

Al CIMMYT, por ser cuna de conocimiento y cooperación, me llevo momentos y experiencias gratas como estudiante y mujer. Espero haber aportado un poco de lo mucho que recibí.

Finalmente, agradezco infinitamente a mis amados padre, Paulina Guadalupe y Alejandro por regalarme la vida y el apoyo incondicional. A mi amada hermana Alexia, por impulsarme y su gran amor. A mi familia, a mis adorados sobrinos y a mis increíbles amigas y amistades. Por ser mi pilar, por acompañarme y permanecer en este viaje, no solo académico.

A mí. A mi fortaleza, a mi humanidad, a mi feminidad, a mi valentía. A mi esfuerzo, dedicación y jornada sin fin de introspección.

Estamos hechos de fragmentos de personas... con las que decidimos ser y estar. Porque este camino también ha sido suyo.

Paulina Galindo Gómez

1. Contenido	
I. ÍNDICE DE TABLAS.....	I
II. ÍNDICE DE FIGURAS.....	II
III. RESUMEN	III
IV. ABSTRACT.....	IV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. TRIGO.....	3
2.1.1 Estructura del grano de trigo	4
2.1.2 Tipos de harinas de trigo y su composición	6
2.2 ARABINOXILANOS	8
2.2.1 Arabinoxilanos en trigo: estructura y características generales.....	8
2.2.2. Clasificación de los arabinosilanos	9
2.2.3. Funcionalidad de los arabinosilanos en sistemas de harina	10
2.2.4 Métodos de cuantificación de arabinosilanos (TOT-AX y WE-AX).....	11
2.2.5 Relevancia de los arabinosilanos en el estudio de harinas	12
2.3 CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE SOLVENTES.....	13
2.3.1 Fundamentos del método CRS	13
2.3.2 Solventes y su significado funcional	14
2.3.3 CRS como herramienta funcional integrada.....	15
2.4 ANÁLISIS REOLÓGICO MEDIANTE MIXOLAB	15
2.4.1 Principio del ensayo	16
2.4.2 Ciclos de temperatura y perfil de la curva.....	16
2.4.3 Etapas funcionales del perfil Mixolab	17
2.4.4 Relación con la funcionalidad de la harina.....	18
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
4. JUSTIFICACIÓN	20
5. OBJETIVOS	21
5.1 OBJETIVO GENERAL	21
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
6. HIPÓTESIS.....	22

7. MATERIALES Y MÉTODOS	23
7.1 MATERIALES.....	23
7.1.1 Material vegetal y características de las harinas.....	23
7.2 MÉTODOS.....	23
7.2.1 Contenido de arabinosilanos	23
7.2.2 Capacidad de retención de solventes (CRS).....	26
7.2.3 Análisis reológico mediante Mixolab.....	27
7.2.4 Análisis estadístico	28
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
8.1 CUANTIFICACIÓN Y VARIABILIDAD DEL CONTENIDO DE ARABINOSILANOS	30
8.2 CUANTIFICACIÓN Y VARIABILIDAD EN LOS VALORES DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE SOLVENTES	33
8.3 VARIABILIDAD DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO MEDIANTE MIXOLAB	39
8.4 ASOCIACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE ARABINOSILANOS, LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE SOLVENTES Y EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO	44
9. CONCLUSIONES.....	48
10. REFERENCIAS.....	50
11. ANEXOS	54

I. ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Volúmenes estándar de xilosa para la curva de calibración</i>	25
<i>Tabla 2. Contenido de arabinoxilanos totales (TOT-AX) y solubles en agua (WE-AX) en harinas integrales y refinadas</i>	31
<i>Tabla 3. Coeficientes de determinación (R^2) entre arabinoxilanos totales (TOT-AX) y solubles en agua (WE-AX) en harinas integral y refinada</i>	32
<i>Tabla 4. Capacidad de retención de solventes en harinas integrales</i>	35
<i>Tabla 5. Capacidad de retención de solventes en harinas refinadas</i>	37
<i>Tabla 6. Coeficientes de determinación (R^2) de la capacidad de retención de solventes entre harina refinada y harina integral</i>	38
<i>Tabla 7. Parámetros reológicos obtenidos mediante Mixolab en harinas refinadas</i>	42
<i>Tabla 8. Coeficientes de determinación entre harinas refinadas de Mixolab y los parámetros de arabinoxilanos y capacidad de retención de solventes de harinas integrales y refinadas</i>	46
<i>Tabla 9. Coeficientes de determinación (R^2) entre arabinoxilanos totales (TOT-AX y WE-AX) y capacidad de retención de solventes en harina integral</i>	47
<i>Tabla 10. Coeficientes de determinación (R^2) entre arabinoxilanos totales (TOT-AX y WE-AX) y capacidad de retención de solventes en harina refinada</i>	47

II. ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Componentes químicos en las capas del grano de trigo (Khalid et al., 2023).</i>	4
<i>Figura 2. Estructura química de los arabinoxilanos (Niño-Medina et al., 2009).</i>	9
<i>Figura 3. Mecanismo de reacción del furfural con floroglucinol para la determinación indirecta de AX; a) Hidrólisis de xilosa a furfural. b) Formación del complejo floroglucido coloreado (Kiszonas et al., 2012).</i>	12
<i>Figura 4. Perfil reológico obtenido mediante Mixolab de una muestra de harina refinada bajo el protocolo Chopin+</i>	54

III. RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo cuantificar el contenido de arabinosilanos totales (TOT-AX) y solubles en agua (WE-AX) en harinas de trigo refinadas e integrales para establecer su variabilidad composicional y su impacto en la calidad panadera. Se analizaron 35 muestras de trigo, evaluando la asociación estadística entre los Arabinosilanos (AX), la capacidad de retención de solventes (CRS) y los parámetros reológicos obtenidos mediante Mixolab. Los resultados determinaron que la harina integral presenta un contenido promedio de 56.3 mg/g para TOT-AX y 8.1 mg/g para WE-AX. En contraste, en la harina refinada estos niveles disminuyen a 16.1 mg/g y 7.4 mg/g, respectivamente. El análisis estadístico reveló que los WE-AX tienen una influencia predominante en la absorción de agua y el desarrollo de la red viscoelástica de las masas, mientras que los TOT-AX actúan como moduladores en las etapas de estabilidad térmica y retrogradación del almidón. Estos hallazgos permiten interpretar el efecto de los componentes de la fibra sobre la funcionalidad tecnológica de las harinas con distinto grado de extracción.

Palabras clave: Arabinosilanos, Trigo, Mixolab, CRS, Reología.

IV. ABSTRACT

This research aimed to quantify total (TOT-AX) and water-extractable (WE-AX) arabinoxylan content in refined and whole wheat flours to establish their compositional variability and impact on baking quality. Thirty-five wheat samples were analyzed, evaluating the statistical association between AX, Solvent Retention Capacity (SRC), and rheological parameters obtained via Mixolab. The results determined that whole wheat flour has an average content of 56.3 mg/g for TOT-AX and 8.1 mg/g for WE-AX. In contrast, in refined flour, these levels decreased to 16.1 mg/g and 7.4 mg/g, respectively. Statistical analysis revealed that WE-AX have a predominant influence on water absorption and the development of the dough's viscoelastic network, while TOT-AX act as modulators during thermal stability and starch retrogradation stages. These findings allow for the interpretation of fiber components' effects on the technological functionality of flours with different extraction rates.

Keywords: Arabinoxylans, Wheat, Mixolab, SRC, Rheology.

1. INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum aestivum* L.), originario de la Media Luna Fértil, región que abarca el sureste de Turquía y Siria alrededor del 10,000 a.C., constituye uno de los cultivos más relevantes en la historia de la humanidad. Su evolución se dio mediante procesos de poliploidía: a partir del einkorn (*T. monococcum*) genoma AA y el emmer (*T. dicoccum*) genoma AABB, que al hibridarse con *Aegilops tauschii* con un genoma DD dieron origen al trigo hexaploide moderno AABBDD. La selección natural y la intervención de los primeros agricultores, quienes elegían semillas de mejor calidad basándose en las características fenotípicas como tamaño y color del grano, jugaron un papel crucial en su evolución (Gohar *et al.*, 2022).

En la actualidad, la producción mundial de trigo para el ciclo 2025/26 se estima en 827 millones de toneladas (IGC, 2025). En México, la producción nacional se proyecta en 1.75 millones de toneladas, de acuerdo con el USDA Foreign Agricultural Service (2026), cifra que representa menos del 0.3% de la producción mundial.

Más allá de su importancia histórica y productiva, el trigo debe comprenderse también desde su estructura morfológica, pues la composición de cada fracción del grano determina su funcionalidad tecnológica y nutricional. El grano se divide en tres partes principales: el salvado, formado por pericarpio, testa y aleurona, donde los polisacáridos de la pared celular representan hasta 50% del tejido y están constituidos principalmente por arabinoxilanos totales (TOT-AX); el endospermo, rico en almidón y proteínas, cuyas paredes celulares representan 3-5% del tejido constituidas principalmente por arabinoxilanos solubles en agua (WE-AX); y el germen como fuente de lípidos y compuestos bioactivos (Barrón *et al.*, 2020).

Dentro de estos componentes, los arabinoxilanos (AX) representan la fracción mayoritaria de fibra dietaria del trigo. Su contenido varía según el estado de extracción de la harina: en harinas integrales la fibra alcanza entre 3.2-7.6% del peso total de la harina, mientras que en harinas refinadas se reduce a 0.8-2.2%. Además de la función estructural en la planta, los AX influyen de manera decisiva en la calidad tecnológica y en el procesamiento del trigo, afectando la absorción de agua, la viscosidad y formación de la red de gluten (Hernández *et al.*, 2024).

La capacidad de retención de solventes es una prueba fundamental para caracterizar la funcionalidad de la harina. Evalúa la hinchazón diferencial mediante cuatro solventes: agua destilada, que refleja la hidratación total; sacarosa al 50%, que mide la interacción con pentosanos solubles; carbonato de sodio al 5%, que indica el nivel de almidón dañado; y ácido láctico al 5%, que evalúa la fuerza y calidad del gluten. El patrón combinado de estos valores permite predecir la absorción óptima de agua y el desempeño reológico de las masas, correlacionándose con parámetros de panificación (Gong *et al.*, 2023; Guzmán *et al.*, 2015).

Finalmente, el Mixolab constituye una herramienta integral para el análisis de harinas, ya que registra perfiles reológicos continuos bajo condiciones de amasado y ciclos de calentamiento y enfriamiento. Sus parámetros (C1-C5) describen absorción inicial, estabilidad proteica, gelatinización del almidón, actividad enzimática y retrogradación. Este análisis permite predecir las propiedades viscoelásticas de las masas y la calidad panadera, simulando el proceso completo de horneado. (Dubat, 2013). En este contexto es importante estudiar de manera integrada cómo el contenido de arabinosilanos se relaciona con la capacidad de retención de solventes en harina de trigo con distinto grado de extracción. Asimismo, analizar su asociación con el comportamiento reológico de masas elaboradas con harina refinada permite comprender mejor su influencia en la absorción de agua y en el desarrollo de la red viscoelástica.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. TRIGO

El trigo (*Triticum aestivum*) es uno de los cereales más importantes a nivel mundial, tanto por su aporte energético como por su versatilidad tecnológica. De acuerdo con la FAO (2026) representa cerca de un tercio del consumo mundial de cereales y constituye un pilar de la seguridad alimentaria global. En este contexto, para 2026 la producción mundial se estima en 810 millones de toneladas, concentrándose principalmente en China, India y la Unión Europea. A nivel comercial, el trigo se destaca como el cereal más dinámico, con más de 200 millones de toneladas movilizadas anualmente. Entre los principales exportadores se encuentran la Unión Europea, Rusia, Estados Unidos, Canadá y Argentina, mientras que Turquía y diversos países del norte de África y Asia Occidental figuran como importadores relevantes (FAO, 2026).

Por otra parte, las reservas mundiales alcanzan 339.9 millones de toneladas, con incrementos sostenidos en las principales regiones productoras, lo que refuerza su papel como un insumo estratégico tanto en la alimentación humana como en la estabilidad de los mercados agrícolas (FAO, 2026). En México, el trigo es el segundo cereal más importante después del maíz y se considera estratégico para la seguridad alimentaria nacional. De acuerdo con el Panorama Agroalimentario 2025, la producción alcanzó 3.3 millones de toneladas, con una superficie sembrada superior a 600,000 hectáreas, reflejando así su relevancia en el sector agrícola. Los principales estados productores son Sonora, Guanajuato, Baja California, Michoacán y Sinaloa, que concentran la mayor parte de la producción nacional. El país cultiva principalmente dos tipos de trigo: el cristalino o duro (*Triticum durum*), destinado a la elaboración de pastas y con excedentes que permiten exportaciones, y el panificable o suave (*Triticum aestivum* L.), utilizado en la industria panadera y galletera, cuya producción resulta insuficiente y obliga a complementar la demanda con importaciones, principalmente de Estados Unidos y Canadá. En términos de participación, el trigo representa alrededor del 10% de la producción nacional de granos, consolidándose como un cultivo esencial en la dieta y en la industria agroalimentaria mexicana (SADER, 2025).

2.1.1 Estructura del grano de trigo

El grano de trigo (*Triticum aestivum* L.), clasificado botánicamente como una cariopsis, presenta una estructura altamente especializada que garantiza la protección del embrión, el almacenamiento de reservas y la viabilidad durante la germinación. Esta organización anatómica no solo responde a funciones biológicas, sino que también determina en gran medida las propiedades tecnológicas y nutricionales de las harinas derivadas, siendo además influenciada por factores genéticos ambientales contribuye de manera significativa a la dieta humana y a la calidad tecnológica de las harinas derivadas, siendo influenciada por factores genéticos y ambientales (Khalid *et al.*, 2023).

Morfológicamente, los granos de trigo suelen ser de forma elíptica, aunque diferentes tipos de trigo presentan granos que varían desde alargados, comprimidos, delgados, hasta esféricos. La longitud y masa del grano suelen estar en torno a los 5-9 mm y 35-50 mg. El grano de trigo (Figura 1) está compuesto por un 2–3 % de germen, un 13–17 % de salvado y un 80–85 % de endospermo harinoso (Khalid *et al.*, 2023).

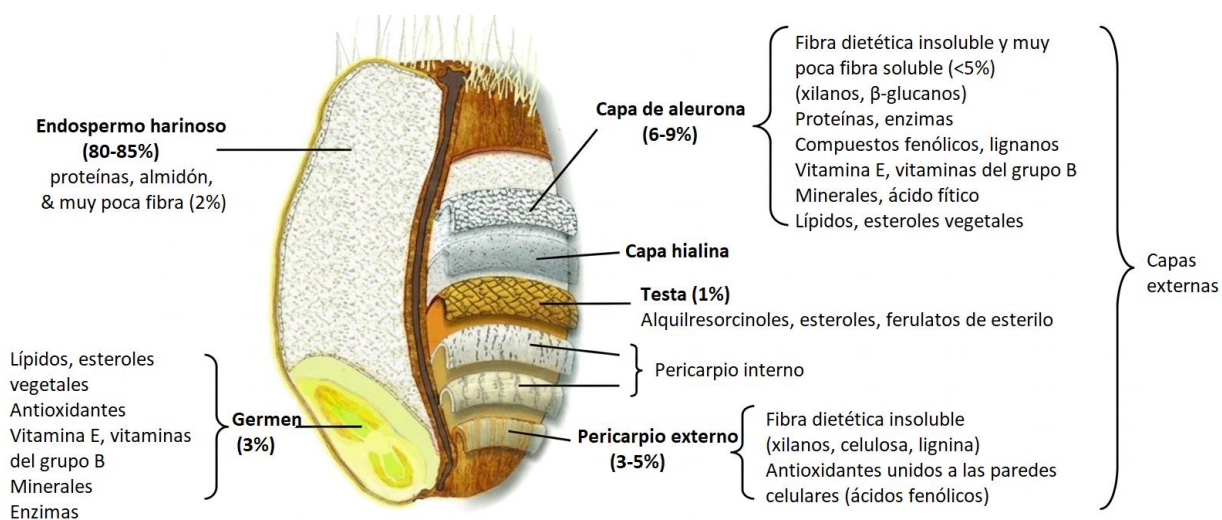


Figura 1. Componentes químicos en las capas del grano de trigo (Khalid *et al.*, 2023).

La testa, también denominada tegumento seminal, se ubica debajo del pericarpio y está compuesta por células pigmentadas ricas en compuestos fenólicos y antioxidantes. Su función principal es proteger al embrión frente a procesos oxidativos y agentes externos, contribuyendo

al contenido de compuestos bioactivos del salvado (Lebert *et al.*, 2022). La capa de aleurona, situada inmediatamente por debajo de la testa, está formada por células con paredes ricas en arabinosilanos ($\approx 65\%$) y β -glucanos, además de proteínas, minerales y compuestos bioactivos. Esta capa constituye una de las principales fracciones del salvado y desempeña un papel clave en la hidratación del grano debido a la capacidad de sus polisacáridos para retener agua y formar estructuras tipo gel (Lebert *et al.*, 2022).

Desde una perspectiva tecnológica, los arabinosilanos presentes en la aleurona influyen en la funcionalidad de la harina, ya que sus propiedades fisicoquímicas y su grado de solubilidad determinan su interacción con el agua y otros componentes del sistema, afectando la reología de la masa (Pietikäinen *et al.*, 2022). El endospermo, que constituye entre el 80 y 83 % del peso del grano, se compone principalmente por almidón y proteínas de almacenamiento. Estas macromoléculas determinan la calidad tecnológica de la harina, ya que el almidón y el gluten son los principales responsables de las propiedades de procesamiento y del comportamiento reológico de la masa (Chateigner-Boutin *et al.*, 2021).

El almidón del endospermo presenta una distribución bimodal de gránulos, cuya proporción influye en la hidratación y en las propiedades funcionales durante el procesamiento. Se ha demostrado que la interacción entre almidón, proteínas y polisacáridos regula la disponibilidad de agua y, por tanto, el comportamiento del sistema (Chateigner-Boutin *et al.*, 2021). Aunque el contenido de arabinosilanos en el endospermo es menor que en el salvado, su fracción soluble desempeña un papel importante en la retención de agua y en la viscosidad del sistema, debido a su capacidad de formar estructuras altamente hidratadas (He *et al.*, 2021). Durante el desarrollo del grano, se observa una diferenciación estructural del endospermo, donde las zonas periféricas presentan mayor contenido de proteínas y componentes de pared celular, mientras que las zonas centrales contienen mayor proporción de almidón. Esta heterogeneidad influye en la calidad de la harina, ya que determina el comportamiento del grano durante la molienda y la distribución de sus componentes en las fracciones obtenidas (Lebert *et al.*, 2022).

El germen, que representa entre el 2 y 3 % del peso del grano, se caracteriza por su alto contenido de lípidos, proteínas, vitaminas y minerales. Sin embargo, su elevada susceptibilidad a la

oxidación lipídica limita su presencia en harinas refinadas, debido a su impacto en la estabilidad y vida útil del producto (Lebert *et al.*, 2022). En conjunto, la organización estructural del grano determina la distribución de sus componentes durante la molienda y su posterior funcionalidad en la harina. Se ha demostrado que las propiedades de los arabinosilanos y su interacción con otros componentes dependen de su estructura y localización en el grano, lo que influye directamente en el comportamiento tecnológico del sistema (Pietäinen *et al.*, 2022).

2.1.2 Tipos de harinas de trigo y su composición

La harina de trigo es el producto resultante de la molienda del grano, cuya composición y funcionalidad dependen principalmente del grado de extracción, el tipo de trigo y las condiciones del proceso de molienda. Estas variaciones determinan no solo su valor nutricional, sino también sus propiedades funcionales y su comportamiento en procesos de panificación (Khalid *et al.*, 2023). Desde el punto de vista tecnológico, las harinas de trigo pueden clasificarse principalmente en harinas refinadas e integrales, aunque existen subdivisiones basadas en el contenido proteico y su uso industrial.

Las harinas refinadas, obtenidas a partir del endospermo (70–78 % de extracción), se caracterizan por un alto contenido de almidón (70–76 %) y proteínas (10–14 % en harinas panificables), con una proporción significativa de proteínas formadoras de gluten. Asimismo, presentan bajos niveles de fibra dietética (0.3–0.6 %) y cenizas (0.4–0.55 %), lo que favorece la formación de masas homogéneas, elásticas y con una adecuada capacidad de retención de gas, siendo ideales en procesos de panificación (Khalid *et al.*, 2023). Estas características se asocian con la predominancia de fracciones del endospermo y la ausencia de componentes del salvado que puedan interferir con la red de gluten.

En contraste, las harinas integrales (100 % de extracción) conservan todas las fracciones del grano, incluyendo salvado y germen, lo que se traduce en un mayor contenido de fibra dietética (2.5–5 %), lípidos (2–4 %), minerales y compuestos bioactivos. En particular, los polisacáridos no amiláceos, como los arabinosilanos, se concentran rápidamente en las capas externas del grano y constituyen una fracción importante de la fibra dietética total, con efectos relevantes

sobre la absorción de agua y la viscosidad del sistema (Chen *et al.*, 2024). Esta composición mejora el perfil nutricional, incrementando significativamente el contenido de minerales como fósforo, hierro, zinc y magnesio en comparación con harinas refinadas (Fernández-Canto *et al.*, 2022).

En este sentido, la composición química de la harina resultante está intrínsecamente ligada al grado de separación de las estructuras del grano durante el procesamiento. A pesar del alto valor nutricional de la capa de aleurona, durante la producción de harina refinada este tejido se elimina en gran medida junto con las capas del salvado. Esta segregación física explica la reducción drástica del contenido de fibra dietética y la densidad de compuestos bioactivos en el producto comercial (Chen *et al.*, 2024; Khalis *et al.*, 2023), lo que representa un desafío tecnológico para el desarrollo de productos integrales o enriquecidos que busquen mantener la calidad panadera sin sacrificar el aporte nutricional.

Las harinas también pueden clasificarse según el tipo de trigo del que provienen. Las harinas de trigo duro presentan mayor contenido de proteínas y una red de gluten más fuerte, lo que se traduce en masas más tenaces y adecuadas para la panificación. Por otro lado, las harinas de trigo suave contienen menor cantidad de proteínas (8-11%) y generan masas más débiles, siendo preferidas en productos de repostería donde se requieren texturas más suaves (Paesani *et al.*, 2021).

En términos generales, la composición de la harina de trigo incluye almidón (65–75 %), principal responsable de la gelatinización y estructura del producto final; proteínas (8–15 %), que determinan la formación del gluten y el comportamiento reológico de la masa; polisacáridos no amiláceos (2–3 %), entre los que destacan los arabinoxilanos, que influyen en la absorción de agua y la viscosidad del sistema; lípidos (1–2 %), que participan en la estabilidad de la masa y la interacción con otros componentes; además de minerales, vitaminas y enzimas, que influyen en procesos bioquímicos durante la fermentación (Chen *et al.*, 2024; Khalid *et al.*, 2023).

Dicho de otro modo, la diferencia entre harinas refinadas e integrales no es únicamente composicional, sino también funcional. Mientras que las harinas refinadas presentan un

comportamiento reológico más predecible y adecuado para procesos industriales, las harinas integrales aportan beneficios nutricionales asociados a su contenido de fibra y compuestos bioactivos. Sin embargo, su uso implica diversos desafíos tecnológicos en panificación, derivados principalmente de la presencia de salvado y germen, los cuales afectan la formación y funcionalidad de la red de gluten.

En especial, las partículas de salvado pueden interrumpir la continuidad de dicha red, mientras que los arabinosilanos compiten por el agua disponible, reduciendo la hidratación efectiva de las proteínas y modificando la viscoelasticidad del sistema. Además, el mayor contenido de fibra incrementa la absorción de agua, lo que requiere ajustes en la formulación. Como consecuencia, los productos elaborados con harinas integrales suelen presentar menor volumen específico, miga más densa y cambios en la textura, efectos asociados a la interacción entre los componentes del salvado y la matriz proteína-almidón, así como la redistribución del agua dentro del sistema (Gómez *et al.*, 2020).

2.2 ARABINOSILANOS

2.2.1 Arabinosilanos en trigo: estructura y características generales

Los arabinosilanos (AX) son polisacáridos no amiláceos pertenecientes a las hemicelulosas y constituyen uno de los principales componentes de la pared celular del trigo. Están formados por una cadena principal de residuos de xilosas unidos mediante enlaces glucosídicos β -(1 \rightarrow 4), a la cual se enlazan unidades de arabinosa como sustituyentes laterales en las posiciones O-2 y/o O-3 de los residuos de xilosa mediante enlaces α -L-arabinofuranosil, lo que da lugar a una estructura altamente ramificada y heterogénea (Izydorczyk & Biliaderis, 2020; Appeldoorn *et al.*, 2022).

Adicionalmente, algunos de estos residuos de arabinosa pueden encontrarse esterificados con ácido ferúlico en la posición O-5. Lo que permite la formación de enlaces cruzados de entre cadenas de AX mediante la dimerización de ácidos ferúlicos. Este fenómeno contribuye a la

formación de redes tridimensionales dentro de la pared celular, influyendo en la rigidez estructural y en la interacción con otros componentes del sistema (Appeldoorn *et al.*, 2022). Para ilustrar esta organización estructural, en la Figura 2 se presenta la estructura general de los AX, donde se identifican la cadena principal de xilosa, las ramificaciones de arabinosa y los sitios potenciales de esterificación con ácido ferúlico. La variabilidad en el grado de sustitución y en el patrón de ramificación influye directamente en propiedades como solubilidad, el peso molecular y la capacidad de interacción con proteínas y almidón, determinando su funcionalidad en sistemas de harina (Wang *et al.*, 2020).

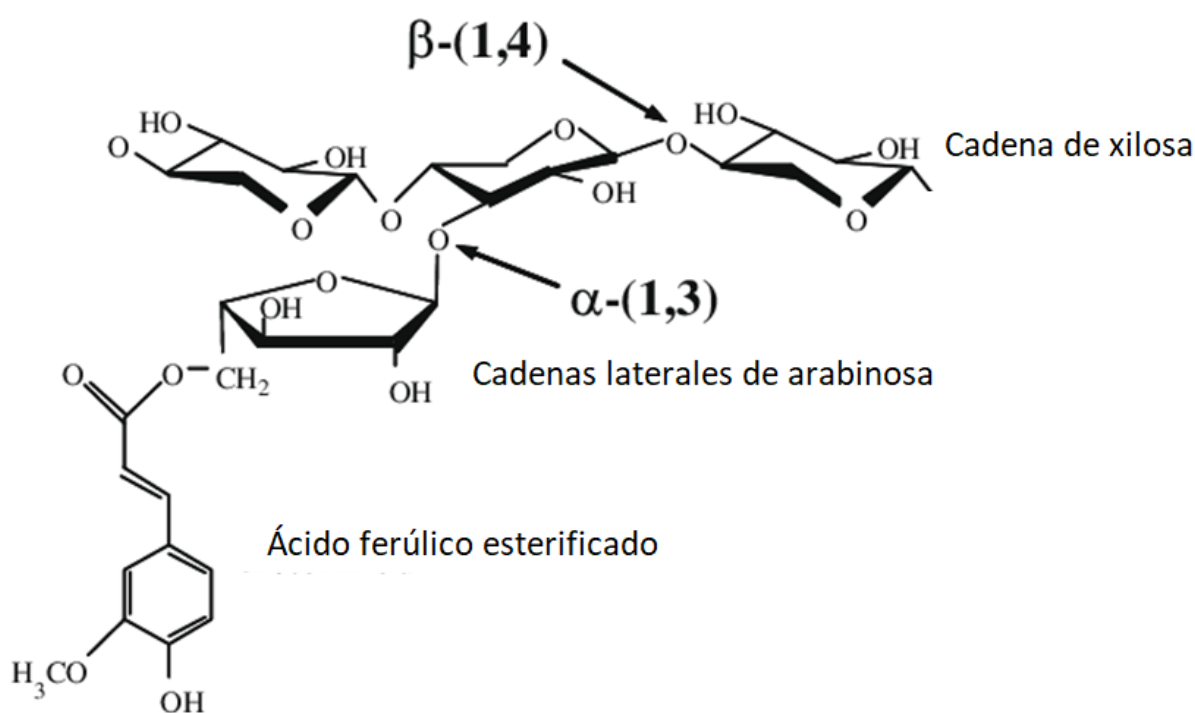


Figura 2. Estructura química de los arabinoxilanos (Niño-Medina *et al.*, 2009).

2.2.2. Clasificación de los arabinoxilanos

Desde una perspectiva analítica, los AX se clasifican según su solubilidad en agua, lo que permite distinguir sus propiedades funcionales en 3 fracciones: los arabinoxilanos totales (TOT-AX), que representan el contenido total presente en la muestra; los arabinoxilanos solubles en agua (WE-AX), que corresponden a la fracción extraíble y funcionalmente más activa; y los

arabinosilanos no solubles o no extraíbles (WU-AX), que permanecen asociados a la pared celular (Zhou *et al.*, 2021).

Desde el punto de vista conceptual, los TOT-AX incluyen tanto la fracción soluble como la insoluble, lo que permite interpretar su contenido como una medida global de los polisacáridos estructurales del trigo. Esta diferenciación es fundamental, ya que los WE-AX presentan mayor accesibilidad y capacidad de interacción con el agua, mientras que los WU-AX muestran un mayor grado de entrecruzamiento y una función predominantemente estructural dentro de la matriz (Appeldoorn *et al.*, 2022).

La distribución de estas fracciones depende del tipo de harina y del grado de extracción. En harinas integrales, el contenido de TOT-AX y WU-AX es mayor debido a la presencia de salvado y aleurona, mientras que en harinas refinadas su concentración disminuye significativamente. En contraste, los WE-AX tienden a mantenerse en el endospermo, lo que explica su presencia relativa incluso después del refinado (Zhou *et al.*, 2021).

2.2.3. Funcionalidad de los arabinosilanos en sistemas de harina

Los AX influyen de manera significativa en la funcionalidad de la harina, a pesar de su baja concentración. Los WE-AX desempeñan un papel clave en la absorción de agua y en la viscosidad del sistema, debido a su capacidad de formar soluciones altamente hidratadas y de interactuar con la red de gluten, contribuyendo a la estabilidad de la masa (Wang *et al.*, 2020). Por su parte, los WU-AX, incluidos dentro de los TOT-AX, participan principalmente como componentes estructurales, pudiendo interferir físicamente con la formación de la red de gluten y limitar la movilidad del agua dentro de la matriz. Este efecto se asocia con la presencia de estructuras más rígidas y con un mayor grado de entrecruzamiento, lo que reduce su accesibilidad y participación en la fase continua del sistema (Zhou *et al.*, 2021).

En conjunto, los AX participan en la redistribución del agua entre proteínas y almidón, influyendo en procesos clave como la hidratación del gluten y la gelatinización del almidón. Este comportamiento evidencia la naturaleza multicomponente del sistema harina-agua, en el

cual pequeñas variaciones en la composición pueden generar cambios significativos en la funcionalidad tecnológica (Appeldoorn *et al.*, 2022).

2.2.4 Métodos de cuantificación de arabinosilanos (TOT-AX y WE-AX)

La cuantificación de AX se centra principalmente en la determinación de las fracciones TOT-AX y WE-AX, ya que permiten diferenciar entre el contenido estructural total y la fracción funcionalmente activa. Entre los métodos más utilizados se encuentra el ensayo colorimétrico basado en la reacción con floroglucinol, el cual permite estimar indirectamente el contenido de pentosas derivadas de los AX (Gebruers *et al.*, 2020).

En este método, los TOT-AX se determinan mediante una hidrólisis ácida directa de la muestra, mientras que los WE-AX se cuantifican tras una extracción acuosa previa seguida del mismo proceso analítico. Esta diferenciación permite evaluar la distribución de las fracciones solubles e insolubles, lo cual resulta fundamental para establecer relaciones entre composición y funcionalidad en sistemas de harina (Gebruers *et al.*, 2020). Además, se han desarrollado adaptaciones recientes del método que permiten mejorar la reproducibilidad y el rendimiento analítico, facilitando su aplicación en estudios de caracterización de harinas y en programas de mejoramiento genético enfocados en la calidad tecnológica (Zhou *et al.*, 2021).

2.2.4.1 Principio del método colorimétrico de floroglucinol

El método de floroglucinol permite la cuantificación indirecta de pentosas derivadas de los AX a través de un proceso estructurado en tres etapas fundamentales. Inicialmente, se lleva a cabo una hidrólisis ácida para liberar las unidades de arabinosa y xilosa, las cuales posteriormente se someten a una deshidratación que da lugar a la formación de furfural. Finalmente, ocurre una reacción colorimétrica en la que el furfural interactúa con el floroglucinol, originando un complejo coloreado cuya intensidad es proporcional a la concentración de AX presentes en la muestra (Hernández-Espinosa *et al.*, 2022).

La secuencia de reacciones involucradas en la formación del complejo coloreado se ilustra en la Figura 3, donde se muestra la conversión de pentosas a furfural y su posterior reacción con el floroglucinol para formar el compuesto cromóforo responsable de la señal espectrofotométrica. Este esquema permite visualizar que la cuantificación de AX es indirecta, basada en la medición del furfural generado, lo que explica la sensibilidad del método a las condiciones de hidrólisis y reacción.

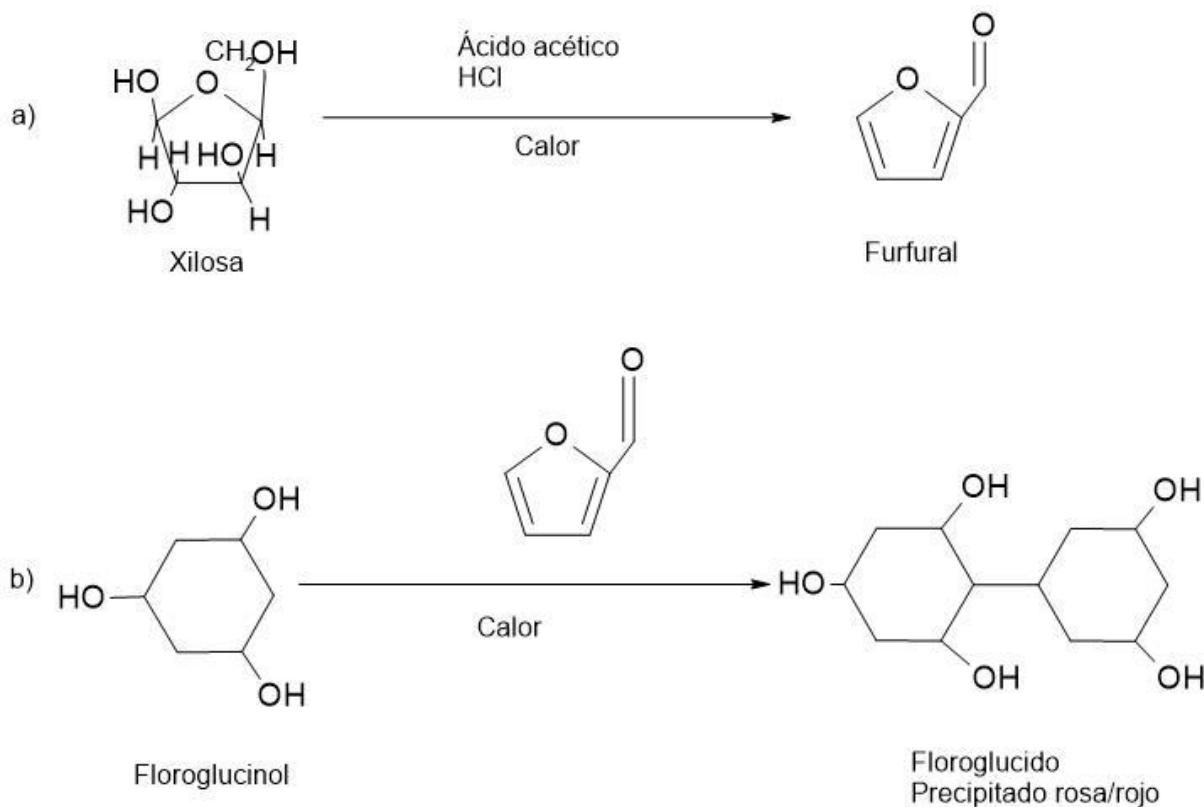


Figura 3. Mecanismo de reacción del furfural con floroglucinol para la determinación indirecta de AX; a) Hidrólisis de xilosa a furfural. b) Formación del complejo floroglucido coloreado (Kiszonas et al., 2012).

2.2.5 Relevancia de los arabinoxilanos en el estudio de harinas

La cuantificación diferenciada de TOT-AX y WE-AX, junto con la comprensión del papel estructural de los WU-AX, permite interpretar cómo la composición de la harina influye en su comportamiento tecnológico. Esta integración resulta fundamental para analizar fenómenos como la absorción de agua, la estabilidad de la masa y su respuesta reológica (Wang *et al.*,

2020). En este sentido, el estudio de los AX permite establecer relaciones entre la composición química, la funcionalidad y el comportamiento de la masa, facilitando la comprensión de sistemas complejos en el procesamiento del trigo y proporcionando herramientas para la optimización de la calidad de la harina (Appeldoorn *et al.*, 2022).

2.3 CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE SOLVENTES

La capacidad de retención de solventes (CRS) es un método funcional ampliamente utilizado para evaluar la calidad tecnológica de las harinas de trigo, basado en la interacción diferencial entre los componentes de la harina y solventes específicos bajo condiciones controladas (Gong *et al.*, 2023). A diferencia de los análisis composicionales, la CRS no cuantifica directamente los componentes, sino que evalúa su comportamiento funcional durante la hidratación, por lo que se considera una herramienta intermedia entre la caracterización química y la evaluación reológica, permitiendo inferir el desempeño tecnológico a partir de interacciones polímero-solvente (Kweon *et al.*, 2020).

2.3.1 Fundamentos del método CRS

El principio de la CRS radica en la capacidad de los polímeros presentes en la harina, principalmente proteínas, almidón y polisacáridos no amiláceos como los arabinoxilanos (AX), para absorber solventes y formar estructuras hinchadas. Este fenómeno depende de la estructura molecular, el grado de sustitución, la accesibilidad de los grupos hidroxilo y la afinidad química con el medio (Gong *et al.*, 2023). En el caso específico de los AX, su capacidad de hidratación está fuertemente asociada a la presencia de múltiples grupos hidroxilo en la cadena de xilosa y sus ramificaciones de arabinosa, los cuales establecen puentes de hidrógeno con las moléculas de agua. Esta interacción favorece la solubilización de la fracción WE-AX y su contribución a la viscosidad del sistema, siendo especialmente relevante en medios acuosos donde la disponibilidad de agua no está restringida (Izydorczyk & Biliaderis, 2020).

Cada solvente genera una respuesta diferenciada debido a su interacción selectiva con los componentes de la harina, lo que permite descomponer funcionalmente el sistema. En este sentido, la CRS se fundamenta en que la funcionalidad de la harina está gobernada por una red polimérica compleja donde proteínas, almidón y AX compiten por el agua disponible (Kweon *et al.*, 2020).

2.3.2 Solventes y su significado funcional

El método CRS emplea cuatro solventes estándar, preparados bajo condiciones específicas de concentración, los cuales permiten evaluar diferentes componentes funcionales del sistema harinero (Kweon *et al.*, 2020; Gong *et al.*, 2023):

- Agua destilada (100 %, p/p): refleja la capacidad global de absorción de agua de la harina, integrando la contribución de todos los componentes. En este medio, los AX desempeñan un papel fundamental, ya que su hidratación ocurre mediante la formación de puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de la xilosa y el agua, favoreciendo la solubilización de los WE-AX y su expansión estructural. Este proceso incrementa la viscosidad del sistema y contribuye a la retención de agua, especialmente en harinas con mayor contenido de fibra.
- Carbonato de sodio (5 %, p/p): se vincula con el almidón dañado, ya que el medio alcalino favorece la ionización de grupos hidroxilo y la disrupción de la estructura granular, incrementando su capacidad de absorción de agua. Este entorno también puede afectar la solubilidad de algunos polisacáridos, aunque su efecto principal se observa sobre el almidón (Kweon *et al.*, 2020).
- Ácido láctico (5 %, p/v): se asocia principalmente con la funcionalidad del gluten, ya que promueve la hinchazón de las proteínas mediante la protonación de grupos funcionales. En relación con los AX, el medio ácido puede influir indirectamente en su estructura, particularmente en los residuos esterificados con ácido ferúlico, donde

condiciones ácidas pueden favorecer la modificación de interacciones intermoleculares, alterando la organización de la red polisacáridica (Gong *et al.*, 2023).

- Sacarosa (50 %, p/p): genera un sistema de alta presión osmótica que limita la disponibilidad de agua libre. En estas condiciones, la hidratación de los AX se ve restringida, ya que la formación de puentes de hidrógeno con el agua se vuelve menos eficiente. Por ello, la respuesta en este solvente no refleja únicamente la presencia de AX, sino la competencia entre proteínas, polisacáridos y otros solutos por el agua disponible, siendo un indicador del comportamiento multicomponente del sistema (Gong *et al.*, 2023).

2.3.3 CRS como herramienta funcional integrada

Una de las principales ventajas de la CRS es su capacidad para interpretar la harina como un sistema multicomponente altamente integrado. En lugar de analizar cada componente de manera aislada, el perfil conjunto de los cuatro solventes proporciona información sobre la interacción entre proteínas, almidón y polisacáridos como los AX (Kweon *et al.*, 2020). Diversos estudios han demostrado que los valores de CRS se correlacionan con propiedades tecnológicas clave, como la absorción de agua, la estabilidad de la masa y la calidad panadera. En este contexto, la contribución de los AX resulta particularmente relevante, ya que su capacidad de retención de agua y su interacción con otros componentes modulan la distribución del agua dentro del sistema, influyendo en el comportamiento reológico de la masa (Gong *et al.*, 2023).

2.4 ANÁLISIS REOLÓGICO MEDIANTE MIXOLAB

El análisis reológico de masas constituye una herramienta fundamental para comprender el comportamiento funcional de las harinas durante el procesamiento. En este contexto, el Mixolab (CHOPIN Technologies, Francia) es uno de los sistemas más completos para evaluar simultáneamente la respuesta mecánica y térmica de la masa, ya que permite integrar en una sola prueba la información relacionada con la formación del gluten, la gelatinización del

almidón, la actividad enzimática y la retrogradación durante el enfriamiento. Esta capacidad de análisis integral lo posiciona como una técnica clave para la caracterización tecnológica de harinas en condiciones similares a las del proceso panadero (Kweon *et al.*, 2020; Gómez *et al.*, 2020). A diferencia de otros equipos como el farinógrafo o el amilógrafo, el Mixolab simula condiciones dinámicas mediante ciclos controlados de mezclado, calentamiento y enfriamiento, registrando de manera continua el torque (Nm) generado por la masa. Esta medición refleja la resistencia del sistema a la deformación y permite seguir la evolución estructural de los componentes de la harina a lo largo del ensayo (Kweon *et al.*, 2020).

2.4.1 Principio del ensayo

El principio del Mixolab se basa en medir la resistencia que opone la masa al amasado mientras es sometida a cambios progresivos de temperatura. Durante el ensayo, la harina se mezcla con agua hasta alcanzar una consistencia estándar cercana a 1.1 Nm, condición a partir de la cual se inicia el programa térmico. La curva obtenida expresa el torque en función del tiempo y permite observar de manera continua los cambios estructurales asociados a proteínas, almidón y otros componentes de la harina (Kweon *et al.*, 2020). Este enfoque permite evaluar no solo la absorción de agua, sino también la estabilidad de la masa y los cambios viscoelásticos inducidos por el calentamiento y el enfriamiento, lo que resulta particularmente útil para analizar sistemas complejos donde múltiples componentes compiten por el agua disponible (Gómez *et al.*, 2020).

2.4.2 Ciclos de temperatura y perfil de la curva

El perfil Mixolab se desarrolla a través de un programa que incluye una etapa inicial de mezclado a temperatura constante (~30 °C), seguida de un calentamiento progresivo (~30 a 90 °C) y una fase de enfriamiento controlado (~90 a 50 °C). A lo largo de este proceso se generan cinco puntos característicos (C1–C5) y sus respectivos tiempos (T1–T5), los cuales describen las distintas fases del comportamiento de la masa y permiten interpretar la funcionalidad de sus componentes (Kweon *et al.*, 2020).

- C1 y T1 (formación de la masa y absorción de agua): representan la consistencia máxima durante el mezclado y el tiempo de desarrollo de la masa. Este punto refleja la capacidad de absorción de agua y la formación de la red de gluten, influenciada por proteínas, almidón dañado y polisacáridos como los arabinosilanos, que modifican la disponibilidad de agua en el sistema.
- C2 y T2 (debilitamiento del gluten): corresponden al mínimo torque durante el calentamiento inicial y reflejan la desnaturalización de las proteínas. Una menor disminución entre C1 y C2 indica mayor estabilidad térmica del gluten y mejor resistencia al esfuerzo mecánico.
- C3 y T3 (gelatinización del almidón): representan el incremento del torque asociado al hinchamiento y gelatinización de los gránulos de almidón. Este punto depende de la disponibilidad de agua y de la competencia entre almidón, proteínas y polisacáridos, incluyendo los AX.
- C4 y T4 (estabilidad del gel y actividad enzimática): reflejan la disminución del torque debido a la acción de amilasas y la estabilidad térmica del gel de almidón. Una caída pronunciada indica mayor actividad enzimática y degradación del almidón.
- C5 y T5 (retrogradación): corresponden al aumento del torque durante el enfriamiento, asociado a la reorganización de amilosa y amilopectina. Este parámetro se relaciona con la firmeza de la miga y el envejecimiento del pan.

2.4.3 Etapas funcionales del perfil Mixolab

El perfil obtenido mediante Mixolab puede interpretarse como una secuencia de etapas funcionales que describen la evolución del sistema harina-agua. Estas etapas incluyen la absorción de agua, el amasado y desarrollo de la masa, la estabilidad del gluten frente al calentamiento, la gelatinización del almidón, la resistencia a la degradación enzimática y la retrogradación durante el enfriamiento. En conjunto, estos eventos reflejan la interacción

dinámica entre los principales componentes de la harina, proporcionando una visión integrada de su comportamiento tecnológico (Kweon *et al.*, 2020). Además, el equipo permite expresar estos comportamientos mediante índices estandarizados, lo que facilita la comparación entre muestras y su aplicación en estudios de calidad de trigo y evaluación de harinas para distintos usos industriales (Gómez *et al.*, 2020).

2.4.4 Relación con la funcionalidad de la harina

El perfil Mixolab refleja la interacción integrada entre proteínas, almidón, enzimas, fibra y agua, por lo que su interpretación debe abordarse desde un enfoque multicomponente. En harinas con mayor contenido de fibra, particularmente aquellas ricas en arabinosilanos, la disponibilidad de agua se modifica debido a la capacidad de estos polisacáridos para retenerla mediante puentes de hidrógeno. Esta competencia por el agua puede afectar parámetros clave como la absorción (C1), la gelatinización (C3), la estabilidad del gel (C4) y la retrogradación (C5), evidenciando el papel de los AX en la modulación del comportamiento reológico (Gómez *et al.*, 2020; Izydorzyc & Biliaderis, 2020). De esta manera, el Mixolab se consolida como una herramienta útil para relacionar la composición estructural de la harina con su desempeño tecnológico, permitiendo establecer vínculos entre la presencia de polisacáridos, la disponibilidad de agua y la respuesta reológica del sistema durante el procesamiento (Kweon *et al.*, 2020).

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La calidad tecnológica de las harinas de trigo depende de la interacción compleja entre proteínas, almidón, fibra y agua dentro del sistema harina-masa. Entre los componentes de la fibra dietaria, los arabinoxilanos representan una de las fracciones de polisacáridos más importantes del trigo debido a su capacidad para modificar la absorción de agua, la viscosidad y el comportamiento reológico durante el procesamiento. Sin embargo, su efecto funcional varía de acuerdo con su grado de solubilidad y con el tipo de harina en el que se encuentran (He et al., 2021; Gómez et al., 2020).

Actualmente, las pruebas de capacidad de retención de solventes (CRS) y los análisis reológicos mediante Mixolab son herramientas empleadas para evaluar la funcionalidad tecnológica de las harinas y predecir su desempeño panadero. No obstante, la interpretación de estos parámetros suele enfocarse principalmente en proteínas y almidón, mientras que la participación de los AX en la dinámica dentro del sistema continúa siendo limitada, particularmente en harinas con distinto grado de extracción (Meeus et al., 2021; Gong et al., 2023; Kweon et al., 2011).

A pesar de la relevancia de los arabinoxilanos dentro de los sistemas harina-agua, la información sobre su relación con la capacidad de retención de solventes y con el comportamiento reológico de masas aún es limitada, especialmente bajo un enfoque integrado que contemple tanto harinas refinadas como integrales (Ha & Kweon, 2024; Zhu et al., 2023). Además, se ha reportado que los AX modifican la distribución de agua y las interacciones entre gluten y almidón, afectando propiedades relacionadas con hidratación, estabilidad y retrogradación de la masa (Sun et al., 2022; Yan et al., 2022).

En este contexto, resulta necesario analizar de manera conjunta la relación entre los arabinoxilanos totales (TOT-AX), los arabinoxilanos solubles en agua (WE-AX), la capacidad de retención de solventes y los parámetros reológicos obtenidos mediante Mixolab en harinas de trigo con distinto grado de extracción, ampliar la comprensión sobre la funcionalidad de estos polisacáridos en sistemas harineros y su posible influencia sobre las propiedades tecnológicas de interés en panificación.

4. JUSTIFICACIÓN

La creciente demanda de productos integrales y alimentos con mayor contenido de fibra ha impulsado el interés por estudiar los componentes estructurales del trigo que influyen en la calidad tecnológica de las harinas. Entre estos componentes, los arabinoxilanos destacan por su capacidad de modificar propiedades relacionadas con la hidratación y el comportamiento de la masa durante el procesamiento. Comprender su funcionalidad resulta relevante debido a que las variaciones en su contenido y solubilidad pueden influir en el desempeño tecnológico de harinas refinadas e integrales empleadas en panificación.

En este sentido, la presente investigación permitirá generar información sobre la relación entre los arabinoxilanos, la capacidad de retención de solventes y las propiedades reológicas evaluadas mediante Mixolab, contribuyendo al entendimiento del sistema harina-agua desde un enfoque funcional. Además, los resultados obtenidos podrán servir como referencia para futuras investigaciones orientadas a la caracterización de harinas, la optimización de procesos industriales y el desarrollo de productos de trigo con mejores propiedades tecnológicas y nutricionales.

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la relación entre el contenido de arabinoxilanos y la capacidad de retención de solventes en harinas de trigo refinadas e integrales, y su asociación con parámetros reológicos de masas elaboradas con harinas refinadas, para describir su efecto sobre la absorción de agua y el comportamiento viscoelástico de la masa.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Cuantificar el contenido de arabinoxilanos totales y solubles en harinas de trigo refinadas e integrales mediante un método colorimétrico de floroglucinol para establecer su asociación con la funcionalidad de la harina.
2. Determinar la capacidad de retención de solventes en harinas de trigo refinadas e integrales mediante el método de capacidad de retención de solventes, para evaluar su relación con el contenido de arabinoxilanos.
3. Caracterizar el comportamiento reológico de masas de harinas de trigo refinadas mediante los parámetros obtenidos en el análisis Mixolab para describir los cambios funcionales durante el mezclado, calentamiento y enfriamiento.
4. Analizar estadísticamente la asociación entre el contenido de arabinoxilanos, la capacidad de retención de solventes y los parámetros reológicos obtenidos mediante Mixolab, para interpretar su efecto sobre la absorción de agua y el desarrollo de la red viscoelástica de las masas.

6. HIPÓTESIS

El contenido y la distribución de los arabinosilanos totales (TOT-AX) y solubles en agua (WE-AX) en harinas de trigo refinadas e integrales se relacionan con la capacidad de retención de solventes y con el comportamiento reológico de las masas, debido a su influencia sobre la disponibilidad de agua y las interacciones dentro de la red viscoelástica del sistema harina-agua.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 MATERIALES

7.1.1 Material vegetal y características de las harinas

Se eligieron 35 muestras de grano de trigo harinero del vivero EYTBW Y.18-19 (Elite Yield Trial Bread Wheat) del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) del programa de mejoramiento de trigo, sembrado en Ciudad Obregón al norte de México, en el estado de Sonora, durante el ciclo de cultivo 2018-2019. Las muestras fueron seleccionadas de una población con variabilidad en el contenido de arabinosilanos. Para obtener la harina integral, se usaron aproximadamente 2 g de grano que fueron procesados usando un molino ciclónico equipado con una malla de 0.5 mm, obteniendo una harina con partículas de ese tamaño y más pequeñas. Inmediatamente después de moler, todas las muestras fueron completamente homogenizadas. Para las muestras de harina refinada se obtuvieron usando un molino Brabender Quadrumat Senior (C.W. Brabender OHG, Alemania). Previo a la molienda, las muestras fueron acondicionadas de acuerdo a su dureza siguiendo la metodología oficial AACC method 26-95.01 (AACC Approved Methods of Analysis, 2011). La dureza de grano fue medida empleando el Single Kernel Characterization System (SKCS 4100 Model, Perten), conforme al método 55-31.01 AACC (AACC, 2011).

7.2 MÉTODOS

7.2.1 Contenido de arabinosilanos

Empleando la metodología descrita por Hernández-Espinosa *et al.* (2023), para la cuantificación de los niveles de pentosanos totales y extraíbles mediante el ensayo colorimétrico de floroglucinol optimizado, se pesaron 10 mg (± 0.3 mg) de harina (integral y refinada) de las 35

muestras por duplicado, que se transfirieron a tubos de 2 mL tipo Safe-Lock Eppendorf (TOT-AX), los cuales garantizan un cierre seguro al momento de la incubación a 99 °C y tubos graduados de 2 mL marca Axygen (WE-AX), utilizando una balanza de analítica.

Para la extracción de arabinosilanos solubles en agua (en harina refinada e integral), se añadió 1 mL de agua destilada a los 10 mg de muestra en el tubo y un mini magneto para permanecer en agitación constante durante 45 minutos. Posteriormente, se retiran los magnetos y se centrifugan las muestras a 2500 g durante 10 minutos.

Por otro lado, para extraer los arabinosilanos totales, fue necesario añadir 1 mL solución de ácido sulfúrico 1 M para harinas integrales y 0.1 M para harinas refinadas a las muestras previamente pesadas. Se agitó en vórtex hasta suspender la harina, para ser llevadas a incubación durante 10 minutos a 99 °C y 100 rpm en un Thermomixer. Terminado el tiempo de incubación, se centrifugan a 5000 g durante 5 minutos, separando los residuos sólidos del sobrenadante que contiene los arabinosilanos solubilizados. Para la fracción total en harinas integrales, se diluyeron 300 µL del sobrenadante en un nuevo tubo de 2 mL con 1500 µL de agua destilada y fueron homogenizadas en vórtex.

Concluidas las extracciones de arabinosilanos en cada una de las fracciones y para ambas moliendas, se diluyeron 75 µL de los sobrenadantes en tubos nuevos de 2 mL Safe-Lock Eppendorf con 75 µL de agua destilada, las cuales contenían las fracciones correspondientes de AX reservadas para la cuantificación.

Aparte se preparó la solución de extracción colorimétrica. Dentro de la campana de extracción y usando equipo de protección con las siguientes proporciones: 93% de ácido acético glacial (v/v); 1.7% de ácido clorhídrico (v/v); 0.86% de floroglucinol (p/v); 0.014% de glucosa (p/v).

A cada uno de los tubos reservados con la extracción ácida y acuosa de pentosanos TOT y WE respectivamente, de las harinas integrales y refinadas, se le añadieron 750 µL de la solución de extracción colorimétrica. Fueron sometidos a vórtex para suspender la solución y fueron introducidos a un Thermomixer a 99 °C durante 23 minutos a una velocidad de agitación de 700

rpm. Para detener la reacción, se colocaron los tubos en hielo durante 30 segundos. Se transfirieron 300 μL de cada muestra por duplicado en una microplaca ELISA de 96 pozos para determinar con un espectrofotómetro las absorbancias de longitudes de onda a 552 y 510 nm.

Para asegurar los resultados, se realizó una curva de calibración con diferentes estándares de concentración de xilosa. Partiendo de una solución de xilosa (0.2 mg/mL) se prepararon las diferentes diluciones descritas en la Tabla 1. A los que se les añadieron 750 μL de solución de extracción y fue empleada la metodología antes descrita.

Tabla 1. Volúmenes estándar de xilosa para la curva de calibración

Xilosa, mg	Xilosa, μL	Agua destilada, μL
0	0	150
0.002	10	140
0.005	25	125
0.010	50	100
0.015	75	75

Para el cálculo de las concentraciones de AX, se utilizaron las lecturas de ambas absorbancias, 552 y 510 nm ($\Delta A_{\text{std}} = A_{552-510}$), así como los valores promedio de absorbancia de las réplicas. Fue empleada la ecuación lineal asociada a la curva de calibración con la fórmula 1.

$$(1) \Delta A_{\text{std}} = a * \text{Valor estándar xilosa (mg)} + b$$

Los valores de ΔA_{std} obtenidos fueron graficados con los mg de xilosa de cada valor estándar para obtener la ecuación lineal (R^2).

Para calcular el contenido de arabinoxilanos en las muestras fueron empleadas las absorbancias de cada muestra por duplicado, a 552 y 510 nm. Se restó de cada valor, el valor obtenido de la absorbancia del blanco y luego se restó la absorbancia promedio de 552 nm a la absorbancia promedio en 510 nm para obtener ΔA ($\Delta A_{\text{muestra}} = A_{552-510}$). De esta manera, se estimaron los mg/g de arabinoxilanos presentes en las muestras utilizando la fórmula 2 para la determinación del contenido de TOT-AX y WE-AX en harina refinada e integral.

$$(2) P = \frac{[(\Delta A \text{ muestra} - b) * V1]}{a * F * A1} * 1000$$

Donde:

P = Concentración de arabinosilanos analizados en la muestra (mg/g)

ΔA muestra = Diferencia de absorbancia entre 552 y 510 nm para cada muestra ($A_{552-510}$).

a = Pendiente de la curva de calibración de xilosa (el valor varía según la curva obtenida).

b = Intersección de la curva de calibración de la xilosa (el valor varía según la curva obtenida).

F = masa de la harina pesada (mg).

V1 = Volumen (μL) utilizado para solubilizar los arabinosilanos (en nuestro caso 1000 μL).

A1 = Volumen (μL) utilizado para extraer la muestra (en nuestro caso 75 μL).

1000 = Factor utilizado para pasar los resultados de mg/mg a mg/g.

7.2.2 Capacidad de retención de solventes (CRS)

Empleando la metodología descrita por Guzmán *et al.*, 2015, se aplicó a las 35 muestras en los dos tipos de harina, por duplicado; fueron pesados y registrados los pesos de los tubos vacíos de centrífuga de 2 mL marca Axygen, a los que se les añadieron 0.3 g (± 0.0005 g) de muestra de harina por duplicado. A estos se les añadieron 1.5 mL de cada disolvente, y se empleó Vortex hasta que la harina quedó suspendida. De inmediato fueron colocados los tubos en Thermomixer a 1400 rpm durante 5 minutos a 25 °C. Al terminar la incubación, se centrifugaron a 4000 gravedades por 2 minutos. Se decantó el líquido sobrenadante y cada tubo fue escurrido a temperatura ambiente durante 10 minutos (cuando fue necesario, se empleó papel secante en la tapa de los tubos). Por último, se pesaron los tubos con tapa y el gel resultante. Se aplicó la fórmula 3 para determinar el porcentaje de solvente retenido por la muestra.

$$(3) \%SRC = \left[\frac{\text{Peso del tubo y del gel} - \text{Peso tubo vacío}}{\text{Peso de la harina}} \right] \left[\frac{86}{100 - \%humedad\ de\ harina} \right] * 100$$

7.2.3 Análisis reológico mediante Mixolab

El análisis reológico se realizó utilizando el equipo Mixolab (CHOPIN Technologies, Francia) bajo el protocolo estándar “Chopin+”. Las determinaciones se llevaron a cabo considerando una base de hidratación del 14% y una hidratación objetivo del 60%, ajustada automáticamente por el software en función del contenido de humedad de cada muestra, con el fin de alcanzar una consistencia de referencia de 1.1 Nm. El ensayo se desarrolló durante un ciclo total de 45 minutos, bajo condiciones controladas de mezclado, calentamiento y enfriamiento.

Durante la etapa de absorción, la prueba inició a 30 °C con una velocidad de amasado constante de 80 rpm, registrándose la cantidad de agua necesaria para alcanzar la consistencia estándar, parámetro asociado a la capacidad de hidratación global del sistema. Posteriormente, en la etapa de amasado, se mantuvieron las condiciones de temperatura constante durante aproximadamente 8 minutos, evaluándose el tiempo de desarrollo y la estabilidad de la masa, relacionados con la formación y resistencia de la red de gluten.

En la etapa de formación y debilitamiento del gluten, se inició el calentamiento progresivo desde 30 hasta 60 °C a una tasa aproximada de 4 °C/min, registrándose la disminución del torque hasta el punto mínimo, lo cual refleja la desnaturalización de las proteínas y la estabilidad térmica del gluten frente al esfuerzo mecánico.

A continuación, en la etapa de viscosidad, la temperatura continuó incrementándose hasta alcanzar aproximadamente 90 °C, manteniéndose constante durante varios minutos. En esta fase se registró el aumento del torque asociado al hinchamiento y gelatinización del almidón, fenómeno dependiente de la disponibilidad de agua y de la competencia entre almidón, proteínas y polisacáridos.

Posteriormente, en la etapa de resistencia amilásica, se evaluó la estabilidad del gel de almidón a alta temperatura, observándose la disminución del torque como consecuencia de la acción de enzimas amilolíticas endógenas, lo que permite estimar la susceptibilidad del sistema a la degradación enzimática.

Por último, en la etapa de retrogradación, se llevó a cabo un enfriamiento controlado desde los 90 °C hasta 50 °C, registrándose el incremento del torque asociado a la reorganización de las cadenas de amilosa y amilopectina. Este parámetro se relaciona con la firmeza estructural del sistema y con fenómenos de envejecimiento del producto.

Las condiciones de operación descritas permitieron obtener el perfil completo de la masa, integrando la respuesta funcional de proteínas, almidón, arabinosilanos y otros componentes bajo condiciones térmicas controladas.

7.2.4 Análisis estadístico

Los datos obtenidos de contenido de arabinosilanos (TOT-AX y WE-AX), capacidad de retención de solventes (CRS) y parámetros reológicos de Mixolab fueron organizados y analizados utilizando el software Microsoft Excel. Para las variables de AX y CRS se consideraron tanto harinas integrales como refinadas, mientras que el análisis reológico mediante Mixolab se realizó únicamente en harinas refinadas.

Se calcularon estadísticos descriptivos (promedio y dispersión) para caracterizar la variabilidad de las muestras. Posteriormente, se realizaron análisis de regresión lineal simple con el objetivo de evaluar la relación entre las variables de composición (TOT-AX y WE-AX) y los parámetros funcionales (CRS) y reológicos (Mixolab). La fuerza de estas asociaciones se expresó mediante el coeficiente de determinación (R^2), el cual permitió cuantificar el grado de explicación de una variable sobre otra.

Las regresiones se realizaron de manera independiente para cada tipo de harina y para cada combinación de variables, generando matrices de correlación específicas para harina integral y refinada. En el caso de CRS, se analizaron las relaciones entre los arabinosilanos y cada uno de

los solventes (agua, carbonato de sodio, sacarosa y ácido láctico), así como su relación en ambas entre cada uno de los solventes en ambas matrices. Mientras que para Mixolab se evaluaron las asociaciones entre los parámetros reológicos (C1–C5 y T1–T5) y las variables composicionales.

Este enfoque permitió identificar patrones de asociación diferenciados según el grado de refinamiento y el tipo de variable analizada, facilitando la interpretación del sistema como una red multicomponente donde la funcionalidad resulta de la interacción entre arabinosilanos, proteínas, almidón y disponibilidad de agua, lo cual se refleja en los valores de R^2 reportados en las tablas correspondientes.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 CUANTIFICACIÓN Y VARIABILIDAD DEL CONTENIDO DE ARABINOXILANOS

En el análisis de AX en las 35 muestras evaluadas evidenció diferencias marcadas entre las matrices integral y refinada. Como se muestra en la tabla 2, la harina integral presentó un contenido promedio de 56.3 mg/g para TOT-AX y 8.1 mg/g para WE-AX, mientras que en la harina refinada estos valores disminuyeron 16.1 mg/g y 7.4 mg/g, respectivamente. Este comportamiento responde a la organización estructural del grano. Los AX se distribuyen de manera heterogénea en los tejidos, concentrándose principalmente en las capas externas (pericarpio y aleurona), las cuales son removidas durante la molienda.

En contraste, la fracción soluble se encuentra en mayor proporción en el endospermo, lo que explica su mayor retención tras el refinado (Bach-Knudsen *et al.*, 2025). Adicionalmente, la proporción de WE-AX respecto al total suele representar una fracción minoritaria del contenido total de AX, lo cual se asocia con su grado de ramificación estructural. Los AX más sustituidos presentan mayor solubilidad, mientras que los menos ramificados tienden a formar estructuras insolubles y asociadas a la pared celular (He *et al.*, 2021).

En términos de relación entre fracciones, la asociación más alta se observó entre los WE-AX de ambas matrices ($R^2 = 0.78$), lo que indica que esta fracción mantiene una mayor estabilidad frente al procesamiento. Por el contrario, la correlación entre TOT-AX fue considerablemente menor ($R^2 = 0.33$), lo que refleja la pérdida de proporcionalidad derivada de la eliminación de componentes insolubles durante la molienda (Tabla 3). Este patrón confirma que la relación entre fracciones de AX no es constante, sino dependiente tanto de la fracción analizada como del grado de procesamiento, así como de factores genéticos y ambientales que influyen en su acumulación en el grano (Korge *et al.*, 2023).

Tabla 2. Contenido de arabinosilanos totales (TOT-AX) y solubles en agua (WE-AX) en harinas integrales y refinadas

No. Lab	HARINA INTEGRAL						HARINA REFINADA					
	TOT- AX mg/g	DE	CV%	WE- AX mg/g	DE	CV%	TOT- AX mg/g	DE	CV%	WE- AX mg/g	DE	CV%
72436	63.82	4.79	7.50	10.74	0.06	0.53	21.68	0.08	0.38	9.76	0.10	1.01
72487	64.00	2.30	3.59	10.88	0.48	4.44	22.73	1.62	7.12	9.76	0.49	5.06
72284	63.21	4.43	7.00	9.97	0.00	0.00	22.01	1.75	7.95	10.14	0.36	3.57
72072	55.08	4.34	7.88	9.21	0.57	6.19	20.06	1.17	5.82	9.79	0.72	7.40
72470	63.43	1.50	2.36	9.81	0.51	5.21	19.27	0.97	5.01	9.53	0.10	1.04
72580	53.22	2.89	5.43	8.39	0.43	5.08	16.68	0.25	1.49	8.65	0.36	4.19
72613	57.15	1.56	2.73	11.36	0.43	3.75	20.35	0.01	0.03	11.90	0.56	4.70
72599	54.58	0.89	1.63	9.65	0.34	3.56	17.75	0.53	2.99	9.55	0.72	7.58
72564	57.25	0.25	0.44	7.60	0.28	3.73	16.45	0.25	1.52	7.52	0.24	3.16
72559	54.78	1.03	1.87	10.24	0.26	2.50	17.73	0.69	3.90	9.27	0.07	0.71
72349	66.08	1.74	2.63	7.92	0.75	9.46	16.91	0.29	1.74	8.12	0.02	0.19
72515	55.26	0.00	0.00	6.87	0.16	2.29	17.88	0.58	3.24	5.92	0.00	0.00
72415	60.18	0.00	0.00	10.82	0.45	4.20	15.27	0.93	6.07	9.32	0.79	8.48
72384	56.98	1.49	2.62	9.71	0.20	2.05	17.77	0.05	0.29	7.73	0.07	0.96
72567	54.79	1.53	2.80	7.54	0.20	2.72	16.58	0.44	2.65	6.83	0.23	3.37
72387	58.10	1.62	2.79	9.85	0.11	1.13	16.74	0.06	0.36	7.71	0.23	2.99
72063	55.96	1.18	2.11	7.18	0.26	3.56	16.00	1.36	8.49	5.32	0.46	8.67
72090	55.72	0.63	1.13	9.95	0.60	5.99	15.91	0.84	5.30	8.65	0.63	7.23
72148	58.16	0.86	1.47	7.42	0.65	8.80	14.48	0.13	0.93	7.88	0.07	0.84
72555	54.42	3.24	5.95	5.78	0.41	7.18	13.49	0.23	1.72	6.60	0.43	6.49
72067	54.18	4.60	8.50	5.61	0.05	0.82	13.71	0.35	2.52	4.73	0.36	7.65
72216	53.45	3.58	6.69	9.07	0.14	1.51	14.96	0.07	0.45	6.57	0.33	5.01
72342	58.27	3.92	6.72	8.29	0.62	7.54	15.60	0.04	0.23	8.13	0.43	5.26
72606	55.69	0.25	0.46	6.51	0.02	0.33	15.31	0.23	1.47	5.76	0.23	4.00
72124	54.30	3.58	6.59	5.43	0.46	8.42	13.88	0.74	5.37	4.73	0.03	0.70
72083	55.99	0.52	0.92	8.27	0.08	0.91	13.15	1.26	9.57	7.61	0.51	6.70
72574	51.47	0.25	0.49	7.38	0.71	9.61	12.83	0.80	6.21	6.57	0.13	2.00
72129	52.14	1.46	2.81	5.03	0.45	9.02	12.67	0.94	7.42	3.76	0.10	2.63
72130	53.82	5.28	9.82	5.44	0.40	7.31	12.69	0.05	0.42	5.88	0.00	0.00
72126	44.55	2.21	4.97	8.19	0.03	0.35	14.77	0.30	2.01	8.74	0.16	1.88

72071	53.68	2.19	4.08	7.44	0.51	6.87	12.04	1.26	10.44	6.64	0.36	5.45
72196	55.60	1.15	2.07	6.40	0.00	0.00	13.09	1.13	8.61	6.53	0.33	5.04
72173	55.59	0.16	0.29	5.58	0.09	1.65	14.86	1.20	8.10	4.95	0.06	1.16
72094	52.44	0.77	1.47	6.81	0.03	0.46	14.77	1.09	7.36	4.16	0.08	1.93
72223	58.52	0.17	0.29	6.40	0.57	8.87	12.35	1.37	11.07	4.60	0.23	5.01

Tabla 3. Coeficientes de determinación (R^2) entre arabinosilanos totales (TOT-AX) y solubles en agua (WE-AX) en harinas integral y refinada

Fracción evaluada	TOT-AX (Refinada)	WE-AX (Refinada)
TOT-AX (Integral)	0.33	0.164
WE-AX (Integral)	0.555	0.781

8.2 CUANTIFICACIÓN Y VARIABILIDAD EN LOS VALORES DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE SOLVENTES

El comportamiento de la CRS en harinas integrales (Tabla 4) mostró valores relativamente homogéneos, con coeficientes de variación generalmente menores al 5%, lo que indica buena repetibilidad experimental. La retención en agua destilada osciló entre 75.1 y 83.8%, reflejando una capacidad de hidratación global estable. El solvente carbonato de sodio presentó valores entre 83.6 y 96.0%, lo que podría interpretarse como variabilidad en el contenido de almidón dañado entre muestras. Por su parte, la sacarosa mostró valores entre 96.3 y 110.4%, mientras que el ácido láctico presentó un rango de 80.8 a 92.7%. Este comportamiento sugiere que en harina integral la funcionalidad está gobernada por una matriz compleja donde interactúan fibra, proteínas y almidón. La presencia de salvado incrementa la heterogeneidad estructural y, por tanto, la variabilidad funcional, tal como ha sido reportado en este sistema de harinas a niveles moleculares y físicos (Bressiani *et al.*, 2021).

En harina refinada (Tabla 5), se observó una mayor dispersión en los valores de CRS, particularmente en los solventes sacarosa (91.1-136%) y ácido láctico (103.9-131.8%), lo que indica una mayor heterogeneidad funcional entre muestras. Este comportamiento puede atribuirse a la reducción de componentes estructurales como los AX durante el refinado, lo que incrementa la dependencia funcional del sistema en constituyentes mayoritarios como el almidón y las proteínas del gluten. En consecuencia, la funcionalidad de la harina refinada se encuentra más influenciada por la competencia por agua entre estos componentes, afectando directamente la variabilidad observada en los solventes (Shewry, 2022; Schopf *et al.*, 2021).

Adicionalmente, el análisis de asociación en la tabla 6 entre los valores de CRS obtenidos en harina integral y refinada mostró coeficientes de determinación bajos a moderados ($R^2 = 0.0462-0.3244$), lo que indica que el comportamiento funcional de los solventes cambia considerablemente con el grado de refinación. Las asociaciones más altas se observaron entre agua en harina integral y ácido láctico en harina refinada ($R^2 = 0.3244$), así como entre ácido láctico en harina integral y carbonato de sodio en harina refinada ($R^2 = 0.2891$). Estos resultados sugieren que la capacidad global de hidratación presente en las harinas integrales mantiene cierta

relación con el comportamiento del sistema proteína-almidón en las harinas refinadas. En contraste, las asociaciones relacionadas con sacarosa fueron consistentemente bajas ($R^2 = 0.1019-0.1935$), evidenciando que la retención de este solvente depende de un sistema multicomponente altamente sensible a la eliminación del salvado y a la redistribución del agua dentro de la matriz. En conjunto, estos resultados confirman que el proceso de refinación modifica no solo la composición química de la harina, sino también la interacción funcional entre proteínas, almidón y polisacáridos durante la hidratación (Schopf *et al.*, 2021; Shewry, 2022).

Tabla 4. Capacidad de retención de solventes en harinas integrales

No. Lab	Agua destilada			Carbonato de sodio			Sacarosa			Ácido láctico		
	Promedio	DE	CV%	Promedio	DE	CV%	Promedio	DE	CV%	Promedio	DE	CV%
72436	81.3	1.0	1.2	91.2	0.5	0.5	107.5	2.5	2.4	92.7	4.3	4.7
72487	79.3	3.3	4.2	90.3	3.3	3.6	103.7	1.2	1.2	90.4	3.2	3.5
72284	80.7	1.3	1.6	95.7	1.3	1.4	107.7	1.5	1.4	89.7	3.3	3.7
72072	80.0	0.0	0.0	88.7	3.2	3.6	105.4	0.5	0.5	88.0	1.2	1.4
72470	82.4	0.3	0.3	92.3	2.5	2.8	105.9	4.7	4.5	91.2	3.1	3.4
72580	78.6	0.4	0.5	88.5	1.8	2.1	104.6	1.6	1.5	90.0	4.4	4.9
72613	82.1	0.8	0.9	93.3	2.0	2.1	108.5	0.6	0.6	91.5	1.1	1.2
72599	81.1	0.8	1.0	88.3	4.2	4.8	110.4	0.3	0.3	91.7	3.7	4.0
72564	80.9	0.2	0.3	89.2	1.6	1.7	105.5	3.3	3.2	90.6	2.6	2.9
72559	82.4	2.1	2.5	94.6	0.1	0.1	105.1	1.9	1.8	91.4	3.7	4.1
72349	80.8	1.3	1.6	91.3	2.3	2.5	107.2	0.1	0.1	88.5	3.1	3.5
72515	82.2	1.7	2.1	93.2	0.6	0.6	108.1	4.5	4.2	89.3	2.7	3.0
72415	83.8	2.2	2.6	92.8	1.3	1.4	106.2	0.8	0.8	89.0	0.6	0.6
72384	83.3	1.9	2.3	92.5	0.8	0.9	109.1	3.7	3.4	91.8	1.1	1.2
72567	80.3	2.1	2.6	89.4	0.8	0.9	105.0	2.8	2.6	88.2	0.2	0.2
72387	83.0	3.1	3.7	92.8	1.0	1.1	107.2	2.5	2.4	87.6	1.6	1.9
72063	76.6	1.3	1.8	83.6	3.5	4.2	100.2	3.4	3.4	84.8	3.4	4.0
72090	78.2	1.9	2.4	86.3	0.9	1.1	97.0	1.8	1.9	81.7	2.8	3.4
72148	75.6	0.4	0.6	84.1	0.4	0.5	96.3	0.3	0.3	81.0	1.7	2.1
72555	78.4	2.0	2.5	86.1	2.5	3.0	97.5	0.6	0.6	83.6	1.1	1.3
72067	78.1	2.9	3.7	96.0	3.0	3.2	103.7	1.1	1.1	85.1	3.0	3.5
72216	76.3	0.1	0.1	88.7	0.4	0.4	106.9	1.1	1.0	86.3	2.9	3.4
72342	77.2	2.3	3.0	91.9	2.7	2.9	106.0	0.4	0.3	87.3	1.7	1.9
72606	77.5	1.1	1.5	91.1	3.0	3.3	97.9	1.6	1.7	84.9	1.7	2.0
72124	76.2	1.1	1.4	86.3	1.5	1.7	102.9	0.0	0.0	83.5	2.6	3.1
72083	78.1	1.1	1.4	85.1	0.4	0.4	101.3	1.3	1.3	82.9	0.8	1.0
72574	78.8	0.4	0.4	88.4	1.5	1.7	104.8	1.8	1.7	88.3	0.8	0.9
72129	75.1	0.5	0.7	85.0	2.9	3.4	100.2	1.1	1.1	80.8	1.4	1.8
72130	79.1	0.4	0.4	89.8	1.1	1.2	104.8	2.2	2.1	87.0	0.4	0.5
72126	78.1	0.1	0.1	86.8	1.3	1.5	103.1	2.4	2.3	89.2	0.7	0.8
72071	77.4	1.1	1.4	85.9	1.8	2.1	103.6	0.6	0.5	83.8	1.5	1.8
72196	80.8	1.3	1.7	90.0	0.4	0.5	104.4	2.8	2.6	84.5	0.2	0.3
72173	77.9	0.1	0.2	86.7	0.1	0.1	101.9	0.9	0.9	83.8	0.4	0.4
72094	77.2	1.9	2.5	88.6	1.6	1.8	104.3	1.3	1.3	87.2	0.5	0.6

72223	79.2	0.4	0.4	86.8	0.4	0.4	100.3	4.2	4.2	89.1	3.0	3.3
-------	------	-----	-----	------	-----	-----	-------	-----	-----	------	-----	-----

Tabla 5. Capacidad de retención de solventes en harinas refinadas

No. Lab	Agua destilada			Carbonato de sodio			Sacarosa			Ácido láctico		
	Promedio	DE	CV%	Promedio	DE	CV%	Promedio	DE	CV%	Promedio	DE	CV%
72436	79.7	0.2	0.3	82.2	2.0	2.4	98.9	0.1	0.1	123.9	3.5	2.8
72487	73.3	0.5	0.7	79.6	1.2	1.5	98.0	0.7	0.7	120.4	2.7	2.2
72284	90.1	1.0	1.1	92.0	3.3	3.5	120.9	0.1	0.1	125.5	6.9	5.5
72072	80.6	2.3	2.8	83.3	1.7	2.0	103.5	1.0	1.0	120.3	3.8	3.2
72470	80.1	2.1	2.6	82.5	1.8	2.1	102.2	3.4	3.3	113.3	2.8	2.5
72580	88.1	2.1	2.4	95.7	0.9	0.9	136.2	0.3	0.2	130.7	6.3	4.8
72613	77.2	0.9	1.1	83.9	1.9	2.3	104.2	2.4	2.3	125.2	2.4	1.9
72599	99.2	0.7	0.7	97.3	2.5	2.6	134.0	0.4	0.3	104.3	1.3	1.3
72564	77.3	0.3	0.4	78.6	0.3	0.4	101.9	1.8	1.8	131.8	0.8	0.6
72559	89.4	3.4	3.8	99.4	0.0	0.0	136.1	1.1	0.8	118.2	1.0	0.8
72349	76.1	0.7	0.9	82.3	2.6	3.1	99.3	100.6	100.0	124.3	2.0	1.6
72515	78.0	0.3	0.3	83.4	0.1	0.2	102.0	100.7	101.4	113.4	4.6	4.1
72415	92.5	1.5	1.6	91.7	0.3	0.4	127.6	126.0	126.8	108.2	0.7	0.7
72384	89.5	2.1	2.4	89.9	1.8	2.0	118.1	118.0	118.1	129.6	2.8	2.1
72567	98.9	0.0	0.0	98.1	0.6	0.7	136.7	139.6	138.2	128.9	6.0	4.7
72387	78.9	1.3	1.7	83.6	1.5	1.7	101.5	104.0	102.8	120.5	4.9	4.1
72063	80.6	0.0	0.0	83.6	2.1	2.6	108.1	110.0	109.1	113.5	5.4	4.7
72090	70.8	0.1	0.1	74.2	1.6	2.2	96.3	97.6	97.0	128.5	3.2	2.5
72148	78.6	0.8	1.0	83.4	1.8	2.1	106.4	109.6	108.0	111.4	3.1	2.8
72555	73.4	1.4	1.9	78.8	0.3	0.4	97.5	99.7	98.6	115.4	5.3	4.6
72067	76.3	0.5	0.7	80.3	0.1	0.1	103.6	105.0	104.3	113.5	2.9	2.6
72216	79.8	0.9	1.2	83.5	2.5	3.0	100.4	109.4	104.9	124.2	3.2	2.6
72342	90.9	0.1	0.1	95.8	0.4	0.4	117.1	124.1	120.6	124.3	1.8	1.4
72606	70.7	0.2	0.3	81.8	2.6	3.2	93.8	99.5	96.7	108.3	2.1	1.9
72124	68.6	1.3	1.8	77.4	0.0	0.1	95.4	98.8	97.1	108.0	0.6	0.5
72083	67.1	0.9	1.3	75.1	0.2	0.2	94.8	94.5	94.7	110.0	2.1	1.9
72574	68.7	0.8	1.2	77.1	0.5	0.7	95.7	97.4	96.6	120.0	4.0	3.4
72129	65.3	0.5	0.8	74.6	0.0	0.1	91.1	97.6	94.4	107.2	1.3	1.2
72130	76.4	0.6	0.7	82.0	2.1	2.5	106.8	105.7	106.3	110.3	3.0	2.8
72126	67.1	0.6	0.9	74.2	0.0	0.1	91.1	94.5	92.8	113.7	2.8	2.4
72071	68.6	2.5	3.7	76.1	0.0	0.0	92.3	95.4	93.9	122.3	0.2	0.2
72196	71.3	1.6	2.2	78.9	1.1	1.4	95.1	90.8	93.0	106.0	1.4	1.3
72173	72.6	0.7	1.0	78.6	0.2	0.2	99.5	95.2	97.4	103.9	1.8	1.8
72094	71.3	1.1	1.6	79.3	0.6	0.8	96.0	93.5	94.8	119.5	1.8	1.5
72223	80.7	2.2	2.7	84.0	1.4	1.6	99.6	97.5	98.6	125.9	2.9	2.3

Tabla 6. Coeficientes de determinación (R²) de la capacidad de retención de solventes entre harina refinada y harina integral

		Harina refinada			
		Agua destilada	Carbonato de sodio (5%)	Sacarosa (50%)	Ácido láctico (5%)
Harina integral	Agua destilada	0.2512	0.2083	0.1397	0.0486
	Carbonato de sodio (5%)	0.1863	0.192	0.1065	0.0462
	Sacarosa (50%)	0.1919	0.1724	0.1126	0.1019
	Ácido láctico (5%)	0.3244	0.2891	0.1935	0.1875

8.3 VARIABILIDAD DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO MEDIANTE MIXOLAB

El análisis Mixolab de las 32 muestras de harina refinada evidenció una variabilidad moderada en los parámetros reológicos, lo que refleja diferencias en la calidad proteica, el estado del almidón y la disponibilidad de agua dentro del sistema (Tabla 6). En conjunto, los perfiles obtenidos describen matrices relativamente homogéneas, donde las variaciones observadas responden principalmente a la interacción entre proteínas y almidón más que a la influencia de un solo componente. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura, donde se establece que el perfil Mixolab integra simultáneamente el comportamiento del gluten, la gelatinización del almidón y su retrogradación de un mismo ensayo (García-Molina *et al.*, 2021).

En la etapa inicial de mezclado, representada por el par máximo (C1) y el tiempo de desarrollo (T1), los valores de torque oscilaron alrededor de 1.0-1.2 Nm, mientras que los tiempos de desarrollo variaron aproximadamente entre 4.1 y 9.1 min. Esta dispersión sugiere diferencias en la capacidad de hidratación y formación de la red de gluten entre las muestras. Valores más altos de T1 indican sistemas que requieren mayor tiempo para alcanzar su desarrollo óptimo, lo que puede asociarse con una mayor competencia por el agua entre proteínas y otros componentes. En este sentido, se ha documentado que la formación del gluten regula la disponibilidad de agua para el almidón y condiciona el comportamiento inicial de la masa, ya que ambas compiten por este recurso durante el mezclado (Wang *et al.*, 2021). Este mismo estudio demuestra que la gelatinización del almidón depende directamente de la cantidad de agua disponible, lo que vincula de manera estructural las etapas iniciales y térmicas del perfil.

La estabilidad de la red proteica durante el amasado, evaluada a través del descenso de torque entre C1 y C2 y representada por la pendiente α , mostró valores negativos de baja magnitud (≈ -0.05 a -0.10), indicando un debilitamiento progresivo del gluten bajo condiciones mecánicas y térmicas. Este comportamiento es característico de sistemas con resistencia moderada al amasado, sin colapsos estructurales abruptos. A nivel molecular, este fenómeno ha sido atribuido a cambios dinámicos en las fracciones proteicas durante el procesamiento, los cuales

afectan la cohesión y estabilidad de la red de gluten (Wang *et al.*, 2020). Dichos cambios explican la pérdida gradual de consistencia observada en esta etapa.

Durante la fase de calentamiento, el incremento del torque hasta C3 ($\approx 1.9-2.3$ Nm) reflejó el proceso de gelatinización del almidón. La variabilidad en este parámetro indica diferencias en la disponibilidad de agua y en la intensidad de la competencia entre almidón, proteínas y otros solutos presentes en la harina. Muestras con valores más altos de C3 pueden asociarse con una mayor capacidad de hinchamiento del almidón, lo cual depende directamente de la cantidad de agua libre en el sistema. De acuerdo con Wang *et al.* (2021), el hinchamiento y la gelatinización del almidón están fuertemente condicionados por la formación de la red de gluten, la cual puede limitar o facilitar la absorción de agua por parte del almidón. Este hallazgo respalda la interpretación de que la variabilidad en C3 responde a un equilibrio dinámico entre ambos componentes.

Posteriormente, la disminución del torque hacia C4 ($\approx 1.9-2.6$ Nm) evidenció la estabilidad térmica de la pasta de almidón. Las diferencias observadas entre muestras sugieren variaciones en la resistencia del almidón a la degradación térmica y mecánica, así como en la capacidad del sistema para retener agua durante el calentamiento prolongado. Este comportamiento ha sido descrito como resultado de las interacciones moleculares que ocurren durante el calentamiento, donde tanto proteínas como polisacáridos contribuyen a estabilizar o debilitar la estructura de la masa (Harati *et al.*, 2020). En este contexto, el torque registrado en C4 puede interpretarse como un indicador de la integridad estructural del sistema bajo condiciones térmicas.

En esta etapa de enfriamiento, el aumento del torque hasta C5 ($\approx 2.9-4.1$ Nm) reflejó la retrogradación del almidón, es decir, la reorganización de las cadenas de amilosa y amilopectina. La variabilidad en este parámetro sugiere diferencias en la capacidad del sistema para formar estructuras más rígidas durante el enfriamiento, lo cual depende tanto de la composición del almidón como de la redistribución del agua. Este fenómeno también está influenciado por la interacción con otros componentes de la matriz, particularmente proteínas, que pueden modular la cinética de retrogradación (Cecchini *et al.*, 2021).

En términos generales, los parámetros derivados (pendientes β y γ) mostraron variaciones moderadas, mientras que los tiempos T2-T5 se mantuvieron relativamente constantes entre muestras, lo que sugiere que la cinética global del sistema es comparable. Este comportamiento es consistente con la naturaleza del análisis Mixolab, el cual evalúa simultáneamente los cambios estructurales de la masa durante el mezclado y calentamiento, donde las transiciones reológicas siguen un patrón característico asociado a la gelatinización del almidón y la retrogradación durante el enfriamiento.

En este sentido, se ha reportado que el perfil Mixolab describe un sistema en el que el torque aumenta durante la gelatinización (C3), disminuye en la estabilidad térmica (C4) y vuelve incrementarse durante la retrogradación (C5), reflejando procesos térmicos reproducibles dentro de la matriz de la masa (Cecchini *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2019). Asimismo, la intensidad de estos cambios depende de la interacción entre proteínas, almidón y la disponibilidad de agua, factores que modulan la respuesta del sistema sin alterar la secuencia general del comportamiento reológico.

Tabla 7. Parámetros reológicos obtenidos mediante Mixolab en harinas refinadas

No. Lab	PAR (Nm)					TIEMPO (s)					PENDIENTES			PERFIL					
	C1	C2	C3	C4	C5	T1	T2	T3	T4	T5	α	β	γ	Absorción	Amasado	Gluten +	Viscosidad	Amilas	Retrogradación
72436	1.211	0.727	2.258	2.409	3.778	9.15	16.73	22.67	29.8	45.02	-0.8	0.59	0.056	1	5	9	9	9	4
72487	1.117	0.604	2.118	2.335	3.455	4.55	16.5	24.43	31.1	45.02	-0.06	0.544	0.01	1	6	8	9	9	4
72284	1.059	0.542	2.235	2.288	3.382	6.28	16.32	23.22	29	45.02	-0.06	0.602	0.0406	4	6	7	9	9	4
72072	1.085	0.549	1.902	1.989	2.966	5.82	15.93	23.08	29	45.02	-0.06	0.384	0.004	6	5	8	8	9	4
72470	1.071	0.606	2.064	2.233	3.473	5.53	15.7	23	29	45.02	-0.05	0.598	0.068	2	5	8	9	9	4
72580	1.095	0.511	2.215	2.161	3.376	6.6	16.5	23.23	26	45.02	-0.07	0.636	-0.032	7	6	5	9	9	8
72613	1.086	0.605	1.951	1.895	3.207	6.1	16.98	23.43	26.7	45.02	-0.06	0.606	-0.008	7	6	8	8	9	8
72599	1.053	0.431	2.114	2.044	2.896	4.85	15.7	23.03	26.7	45.02	-0.06	0.336	-0.028	8	3	7	8	9	8
72564	1.149	1.131	0.63	2.129	3.389	8.48	16.7	22.97	28.4	45.02	-0.09	0.632	0.008	4	6	8	9	9	4
72559	1.1	0.5	2.3	2.6	3.2	7.1	16.3	22.3	25.3	45.0	-0.07	0.528	-0.026	3	4	7	8	8	7
72349	1.1	0.5	2.0	2.0	3.3	5.2	15.8	23.6	26.5	45.0	-0.07	0.486	-0.008	4	4	8	9	9	4
72515	1.1	0.7	2.0	2.3	3.5	6.0	15.9	22.5	29.3	45.0	-0.07	0.298	0.024	1	5	6	8	9	4
72415	1.1	0.5	2.2	2.3	3.1	5.2	15.8	23.5	29.4	45.0	-0.06	0.572	0.046	8	5	7	9	9	4
72384	1.1	0.5	2.1	2.2	3.3	6.4	16.2	22.4	30.6	45.0	-0.07	0.52	0.036	8	6	6	9	9	4
72567	1.1	0.6	2.2	2.2	3.4	8.8	15.9	22.3	26.9	45.0	-0.1	0.426	-0.036	8	5	8	5	9	8
72387	1.1	0.6	2.0	2.2	3.4	4.1	15.7	23.0	30.0	45.0	-0.06	0.508	0.04	7	3	7	8	9	8
72063	1.1	0.5	2.3	2.5	3.7	5.0	16.3	22.3	26.5	45.0	-0.06	0.564	0.052	5	3	7	8	9	8
72090	1.1	0.5	2.0	2.2	3.5	5.9	17.2	23.0	30.0	45.0	-0.05	0.498	0.04	4	3	7	7	9	8
72148	1.1	0.4	2.1	2.3	3.7	4.7	16.5	22.6	27.6	45.0	-0.1	0.47	0.052	6	2	8	5	9	8
72555	1.1	0.5	2.1	2.2	3.3	5.6	16.2	23.0	30.0	45.0	-0.06	0.44	0.018	5	3	7	8	8	8
72067	1.1	0.5	2.0	2.1	3.2	3.0	15.6	23.0	30.0	45.0	-0.07	0.464	0.008	6	2	7	8	8	8
72342	1.1	0.5	2.3	2.2	3.0	6.1	16.5	25.5	28.7	45.0	-0.07	0.48	-0.046	8	3	5	8	8	7
72606	1.1	0.5	2.1	2.3	3.9	2.7	15.5	23.0	30.0	45.0	-0.06	0.438	0.052	5	2	8	8	9	8

72124	0.9	0.5	2.1	2.4	3.8	5.0	15.9	23.0	30.0	45.0	-0.05	0.54	0.056	5	4	7	8	9	8
72083	1.1	0.6	2.2	2.6	4.1	2.7	16.7	23.0	30.0	45.0	-0.05	0.404	0.086	2	3	8	8	9	9
72129	1.1	0.5	1.9	2.3	3.7	3.1	16.2	23.0	30.0	45.0	-0.06	0.496	0.038	2	3	7	7	9	8
72130	0.8	0.4	1.9	2.1	3.0	6.4	15.9	21.3	29.8	45.0	-0.1	0.372	0.036	8	4	8	4	8	7
72071	1.1	0.6	2.0	2.1	3.8	5.3	16.6	22.7	26.7	45.0	-0.1	0.422	0.06	3	7	6	5	9	8
72196	1.1	0.5	1.9	2.0	3.4	4.5	15.6	21.4	24.2	45.0	-0.1	0.328	-0.006	3	2	6	5	8	9
72173	1.1	0.5	2.0	1.9	2.7	2.9	15.9	26.1	31.4	45.0	-0.07	0.318	-0.012	6	3	7	7	8	6
72094	1.1	0.6	2.0	2.2	3.3	6.5	16.5	23.0	30.0	45.0	-0.06	0.4	0.006	5	6	6	8	8	8
72223	0.8	0.5	2.2	2.4	3.5	8.6	16.8	23.2	27.2	45.0	-0.1	0.856	0.028	8	4	9	4	8	8

8.4 ASOCIACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE ARABINOXILANOS, LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE SOLVENTES Y EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO

El análisis de correlación (Tabla 7) mostró asociaciones bajas a moderadas ($R^2 \leq 0.48$), lo que indica que el comportamiento de la masa responde a un sistema multicomponente donde diferentes macromoléculas interactúan a través de la distribución del agua. Se ha reportado que la funcionalidad de la masa depende de la redistribución de agua entre sus componentes, lo que afecta directamente sus propiedades reológicas (Meeus *et al.*, 2021).

En harina integral (Tabla 8), las asociaciones entre WE-AX y CRS en agua y ácido láctico sugieren que la fracción soluble de los arabinosilanos contribuye a la hidratación del sistema. Estudios han demostrado que los WE-AX presentan mayor accesibilidad estructural y cambios durante el proceso de panificación, lo que influye en su funcionalidad en la masa (Nishitsuji *et al.*, 2020). Asimismo, se ha reportado que los arabinosilanos solubles modifican las interacciones entre almidón y gluten, promoviendo una estructura más homogénea en la masa y afectando sus propiedades reológicas (Zhu *et al.*, 2023).

En contraste, los TOT-AX mostraron asociaciones bajas en todos los solventes ($R^2 \leq 0.1922$), lo que sugiere una menor contribución funcional de la fracción insoluble. Esto es consistente con estudios que indican que los arabinosilanos no extraíbles permanecen asociados a estructuras de pared celular, lo que limita su accesibilidad e interacción con el agua (De Man *et al.*, 2022).

En harina refinada (Tabla 9), las correlaciones bajas indican que la reducción de componentes de la pared celular disminuye la influencia de los arabinosilanos en la funcionalidad del sistema. Se ha descrito que la funcionalidad de la masa depende en gran medida de las interacciones entre sus componentes y de sus propiedades fisicoquímicas (Pietiäinen *et al.*, 2022). La baja asociación entre AX y la solución de sacarosa puede explicarse por cambios en la disponibilidad de agua. Se ha demostrado que los AX pueden competir con otros componentes por el agua, lo

que afecta la distribución del agua en el sistema y, por lo tanto, su comportamiento funcional (Sun *et al.*, 2022).

En este contexto, la hidratación no depende exclusivamente de los AX, sino de la competencia entre polisacáridos, proteínas y almidón por el agua disponible. Se ha reportado que los AX afectan la reología de la masa a través de interacciones intermoleculares y redistribución del agua (Meeus *et al.*, 2021). Por lo tanto, la sacarosa no mide directamente la contribución de los AX, sino el comportamiento del sistema bajo condiciones de disponibilidad restringida de agua, donde múltiples componentes participan en la hidratación. Este fenómeno está relacionado con la capacidad de retención de agua de los AX y su interacción con otros componentes del sistema (Zhu *et al.*, 2022).

Durante la etapa de gelatinización (C3), las asociaciones observadas reflejan la competencia por el agua entre componentes del sistema. Se ha demostrado que los AX pueden disminuir la disponibilidad de agua para el almidón, afectando su proceso de gelatinización (Yan *et al.*, 2022). Finalmente, la retrogradación (C5) mostró asociación con los AX, lo que sugiere su posible papel en la reorganización estructural del almidón durante el enfriamiento. Se ha reportado que los arabinosilanos pueden interferir en la retrogradación del almidón mediante interacciones con sus cadenas y la modificación de la disponibilidad de agua (Yan *et al.*, 2022).

Tabla 8. Coeficientes de determinación entre harinas refinadas de Mixolab y los parámetros de arabinoxilanos y capacidad de retención de solventes de harinas integrales y refinadas

			MIXOLAB																		
			Par (Nm)					Tiempo (s)					α	B	γ	Absorción	Amasado	Gluten +	Viscosidad	Amilazas	Retrogelación
			C1	C2	C3	C4	C5	T1	T2	T3	T4	T5									
INTEGRAL	A	TOT	0.015	0.052	0.060	0.004	0.001	0.029	0.003	0.069	0.004	6E-07	0.116	0.164	0.027	0.062	0.038	0.178	0.144	0.084	0.424
	X	EX	0.084	0.124	0.087	0.007	0.008	0.077	0.094	0.011	0.006	0.306	0.060	0.093	0.001	0.002	0.182	0.015	0.237	0.206	0.182
	C R S	AD	0.012	0.025	0.012	0.025	0.124	0.128	0.033	0.022	0.024	0.135	0.022	0.027	0.020	0.011	0.13	0.017	0.110	0.022	0.270
		C	0.03	0.036	0.009	0.014	0.11	0.021	0.087	7E-04	4E-04	0.102	0.009	0.011	0.061	0.001	0.055	0.007	0.187	8E-03	0.206
		S	0.038	0.044	0.002	0.086	0.144	0.125	0.028	0.001	0.015	0.185	0.036	4E-04	0.094	0.005	0.315	0.028	0.162	0.021	0.283
		AL	0.002	0.010	0.103	0.002	0.092	0.355	0.004	4E-05	0.031	0.407	0.098	0.131	0.090	0.007	0.339	0.020	0.191	0.025	0.335
REFINADA	A	TOT	0.114	0.151	0.037	0.000	0.024	0.089	0.012	0.030	0.004	0.144	0.111	0.038	0.022	0.048	0.215	0.042	0.365	0.188	0.421
	X	EX	0.043	0.051	0.036	0.007	0.035	0.067	0.063	0.010	0.040	0.301	0.037	0.042	0.020	0.000	0.133	0.025	0.177	0.167	0.173
	C R S	AD	0.006	0.000	0.200	8E-05	0.176	0.262	0.007	1E-06	0.141	0.204	0.022	0.027	0.019	0.215	0.052	0.001	0.019	0.005	0.062
		C	0.008	0.000	0.355	0.001	0.180	0.143	0.019	0.000	0.163	0.129	0.000	0.010	0.061	0.235	0.025	0.049	0.026	0.000	0.017
		S	0.004	0.012	0.330	0.003	0.144	0.120	0.009	0.001	0.147	0.185	0.008	0.000	0.093	0.240	0.027	0.064	0.020	0.005	0.003
		AL	0.007	0.010	0.034	0.003	5E-05	0.476	0.336	0.000	0.022	0.196	0.027	0.131	0.090	0.013	0.348	0.000	0.025	0.034	0.064

Tabla 9. Coeficientes de determinación (R²) entre arabinosilanos totales (TOT-AX y WE-AX) y capacidad de retención de solventes en harina integral

	Agua destilada	Carbonato de sodio (5%)	Sacarosa (50%)	Ácido láctico (5%)
TOT-AX	0.1922	0.1512	0.0616	0.1075
WE-AX	0.382	0.179	0.2392	0.4283

Tabla 10. Coeficientes de determinación (R²) entre arabinosilanos totales (TOT-AX y WE-AX) y capacidad de retención de solventes en harina refinada

	Agua destilada	Carbonato de sodio (5%)	Sacarosa (50%)	Ácido láctico (5%)
TOT-AX	0.2083	0.2346	0.2128	0.1328
WE-AX	0.1942	0.163	0.1337	0.1046

9. CONCLUSIONES

A partir del análisis conjunto de la composición de arabinosilanos, la capacidad de retención de solventes (CRS) y el comportamiento reológico determinado por Mixolab, se confirmó que la funcionalidad de la harina depende de una red compleja de interacciones de fibra, proteínas, almidón y disponibilidad de agua, la cual varía significativamente en función del grado de refinamiento. Los resultados mostraron que los WE-AX mantienen una mayor estabilidad entre harinas integrales y refinadas, mientras que los TOT-AX adquieren mayor relevancia en etapas térmicas avanzadas del perfil termo-mecánico del Mixolab (calentamiento y enfriamiento), particularmente en la estabilidad durante el calentamiento y en la retrogradación, donde se observaron las asociaciones más altas en ambas matrices ($R^2 = 0.42$). Esto sugiere que los TOT-AX actúan principalmente como moduladores indirectos de la redistribución de agua y de la viscosidad residual del sistema, con un efecto más evidente cuando la matriz conserva una mayor proporción de fibra.

Asimismo, la actualización de la matriz de correlaciones permitió consolidar al CRS con ácido láctico como el mejor predictor del comportamiento proteico y de la hidratación del sistema, al presentar las mayores asociaciones con la absorción de agua, los tiempos de desarrollo y estabilización de la masa, así como con la retrogradación. Este comportamiento confirma que la funcionalidad inicial de la masa está fuertemente determinada por la calidad del gluten y su capacidad de interacción con el agua. Por otro lado, los solventes carbonato de sodio y sacarosa mostraron una mayor relación con la etapa de gelatinización del almidón, particularmente con el parámetro C3, lo que confirma que esta fase depende principalmente de la competencia por el agua entre almidón dañado, WE-AX y proteínas.

En conjunto, estos resultados demuestran que la harina integral conserva una mayor participación de los AX en la estabilidad térmica y en la etapa final de enfriamiento, mientras que en la harina refinada el control reológico recae principalmente en el almidón y en el sistema proteína-agua. Desde el punto de vista tecnológico, esta integración entre composición química, CRS y Mixolab aporta una base sólida para anticipar el desempeño de la harina durante el procesamiento, facilitar la selección de materiales con propiedades específicas y optimizar

estrategias de molienda y uso industrial. De esta manera, el estudio confirma que tanto el CRS como el Mixolab son herramientas complementarias que permiten describir distintos niveles de organización del sistema harinero y comprender con mayor precisión la relación entre estructura y funcionalidad.

En este sentido, los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis planteada, ya que evidencian que el contenido y tipo de arabinosidos se relacionan con la capacidad de retención de solventes y, a través de esta, influyen en la absorción de agua y en el desarrollo de la red viscoelástica de la masa, con un comportamiento diferencial según el grado de refinamiento de la harina.

10. REFERENCIAS

- American Association of Cereal Chemists. Approved Methods Committee. (2011). *Approved methods of the American association of cereal chemist* (Vol. 1).
- Bach Knudsen, K., Lærke, H., Hedemann, M., Nielsen, K., Kasprzak, M., Jeppesen, P., . . . Hermansen, K. (2025). Arabinoxylan concentrate from wheat as a functional food ingrediente to improve glucose homeostasis. *Nutrients*, *17*(9), 1561. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/nu17091561>
- Barron, C., Bar-L'Helgouac'h, C., Champ, M., & Saulnier, L. (2020). Arabinoxylan content and grain tissue distribution are good predictors of the dietary fibre content and their nutritional properties in wheat products. *Food Chemistry*, *328*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127111>
- Bressiani, J., Soster-Santetti, G., Oro, T., Esteres, V., Biduski, B., Zavariz-de-Miranda, M., . . . Arocha-Gularte, M. (2021). Hydration properties and arabinoxylans content of whole wheat flour intended for cookie production as affected by particle size and Brazilian cultivars. *LWT - Food Science and Technology*, *150*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111918>
- Cecchini, C., Bresciani, A., Menesatti, P., Pagani, M., & Marti, A. (2021). Assessing the rheological properties of durum wheat semolina: A review. *Foods*, *10*. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/foods10122947>
- Chateigner-Boutin, A.-L., Alvarado, C., Devaux, M.-F., Durand, S., Foucat, L., Geairon, A., . . . Guillon, F. (2021). The endosperm cavity of wheat grains contains a highly hydrated gel of arabinoxylan. *Plant Science*, *306*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.110845>
- Chen, Z., Mense, A., Brewer, L., & Shi, Y.-C. (2024). Wheat bran arabinoxylans: Chemical structure, extraction, properties, health benefits, and uses in foods. *Food Science and Food Safety*, *23*(3). doi:<https://doi.org/10.1111/1541-4337.13366>
- De Man, W., Chandran, C., Wouters, A., Radhakrishnan, S., Martens, J., Breynaert, E., & Delcour, J. (2022). Hydration of wheat flour water-unextractable cell wall material enables structural analysis of its arabinoxylan by high-resolutionsolid-state ¹³C MAS NMR spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *70*(34). Obtenido de <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c04087>
- Dubat, A. (2013). The Mixolab. En A. Dubat, C. Rosell, & E. Gallagher, *Mixolab A New Approach to Rheology* (págs. 3-13). St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists International, Inc.
- FAO. (2026). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Obtenido de <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>
- Fernández-Canto, M.-N., García-Gómez, M. B., Boado-Crego, S., Vázquez-Odériz, M. L., Muñoz-Ferreiro, M. N., Lombardero-Fernández, M., . . . Romero-Rodríguez, M. Á. (2022). Element Content in Different Wheat Flours and Bread Varieties. *Foods*, *12*(11). doi:<https://doi.org/10.3390/foods12203176>
- Gohar, S., Sajjad, M., Zulfiqar, S., Liu, J., Wu, J., & Rahman, M.-u. (2 de 10 de 2022). Domestication of newly evolved hexaploid wheat- A journey of wild grass to cultivated wheat. *Frontiers on Genetics*, *13*, 13. doi:[doi:10.3389/fgene.2022.1022931](https://doi.org/10.3389/fgene.2022.1022931)

- Golea, C., Stroe, S.-G., Gátlan, A.-M., & Codină, G. (2023). Physicochemical Characteristics and Microstructure of Anciente and Common Wheat Grains Cultivated in Romania. *Plants*, 12(11). Obtenido de <https://doi.org/10.3390/plants12112138>
- Gómez, M., Gutkoski, L., & Bravo-Núñez, A. (2020). Understanding whole-wheat flour and its effect in breads: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 3241-3265. doi:10.1111/1541-4337.12625
- Gong, W., Wang, X., Wang, F., & Wang, J. (2023). Correlation Analysis between Wheat Flour Solvent Retention Capacity and Gluten Aggregation Characteristics. *Foods*. doi:<https://doi.org/10.3390/foods12091879>
- Guzmán, C., Posadas-Romano, G., Hernández-Espinosa, N., Morales-Dorantes, A., & Peña, R. (Noviembre de 2015). A new standard water absorption criteria based on solvent retention capacity (SRC) to determine dough mixing properties, viscoelasticity, and bread-making quality. *Journal of Cereal Science*, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.10.009>
- Ha, E., & Kweon, M. (2024). Assessing the Impact of Arabinoxylans on Dough Mixing Properties and Noodle-Making Performance through Xylanase Treatment. *Foods*, 13 (19). doi:<https://doi.org/10.3390/foods13193158>
- Harati, H., Bekes, F., Howell, K., Noonan, S., Florides, C., Beasley, J., . . . Appels, R. (2020). Signatures for torque variation in wheat dough structure are affected by enzymatic treatments and heating. *Food Chemistry*, 316. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126357>
- He, H.-J., Qiao, J., Guo, Q., Ou, X., & Wang, X. (2021). Isolation, structural, functional, and bioactive properties of cereal arabinoxylan-A critical review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Obtenido de <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c04506>
- Hernández-Espinosa, N., Posadas-Romano, G., Dreisigacker, S., Crossa, J., & Ibba, M. (2024). Efficient arabinoxylan assay for wheat: Exploring variability and molecular marker associations in Wholemeal and refined flour. *Journal of Cereal Science*, 117. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.103897>
- Ibba, M., Juliana, P., Hernández-Espinosa, N., Posadas-Romano, G., Dreisigacker, S., Sehgal, D., . . . Guzmán, C. (2021). Genome-wide association analysis for arabinoxylan content in common wheat (*T. Aestivum* L.) flour. *Journal of Cereal Science*, 98. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103166>
- International Grains Council. (2025). Obtenido de Markets for grains: <https://www.igc.int/en/default.aspx>
- Khalid, A., Hameed, A., & Tahir, M. F. (2023). A review on chemical composition, nutritional attributes, grain anatomy, types, classification, and function of seed storage proteins in bread making quality. *Frontiers in Nutrition*. doi:10.3389/fnut.2023.1053196
- Korge, M., Alaru, M., Keres, I., Khaleghdoust, B., Möll, K., Altosaar, I., & Loit, E. (2023). The influence of cropping system, weather conditions and genotype on arabinoxylan content in wheat and barley grains. *Journal of Cereal Science*, 110. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103650>
- Kweon, M., Slade, L., & Levine, H. (2011). Solvent Retention Capacity (SRC) Testin of Wheat Flour: Principles and Values in Predicting Flour Functionality in Different Wheat-Based Food Processes and in Wheat Breeding-A review. *Cereal Chemistry*, 88(6), 537-552. doi:<https://doi.org/10.1094/CCHEM-07-11-0092>

- Lebert, L., Buche, F., Sorin, A., & Aussenac, T. (2022). The wheat aleurone layer: Optimisation of its benefits and application to bakery products. *Foods*, *11*(22). Obtenido de <https://doi.org/10.3390/foods11223552>
- Meeus, Y., Janssen, F., Wouters, A., Delcour, J., & Moldenaers, P. (2021). The role of arabinoxylan in determining the non linear and linear rheology of bread doughs made from blends of wheat (*Triticum aestivum* L.) and rye (*Secale cereale* L.) flour. *Food Hydrocolloids*, *120*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106990>
- Niño-Medina, G., Carvajal-Millán, E., Lizardi, J., Rascón-Chu, A., Marquez-Escalante, J., Gardea, A., . . . Guerrero, V. (2009). Maize processing waste water arabinoxylans: Gelling capability and cross-linking content. *Food Chemistry*, *115*, 1286-1290. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.01.046>
- Nishitsuji, Y., Whitney, K., Nakamura, K., Hayakawa, K., & Simsek, S. (2020). Changes in structure and solubility of wheat arabinoxylan during the breadmaking process. *Food Hydrocolloids*, *109*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106129>
- Paesani, C., Moiraghi, M., & Pérez, G. (2021). Whole-flours from hard and soft wheat genotypes: study of the ability of prediction test to estimate whole flour end-use. *Food Science Technology*, *58*. doi: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04658-1>
- Pietiäinen, S., Moldin, A., Ström, A., Malmberg, C., & Langton, M. (2022). Effect of physicochemical properties, pre-processing, and extraction on the functionality of wheat bran arabinoxylans in breadmaking- A review. *Food Chemistry*, *383*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132584>
- Posadas Romano, G. (Enero de 2020). Capacidad de Retención de Solventes (SRC) Método AACC 56-10 y 56-11 Modificación (Pequeña Escala). *CIMMYT_WQ/PR0011 Capacidad de Retención de Solventes (SRC) Métofo AACC 56-10 y 56-11 Modificación (Pequeña Escala)*. México.
- Schopf, M., Wehrli, M., Becker, T., Jekle, M., & Scherf, K. (2021). Fundamental characterization of wheat gluten. *European Food Research and Technology*, *247*, 985-997. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03680-z>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER]. (2025). *Gobierno de México*. Obtenido de https://nube.agricultura.gob.mx/panorama_dgsiap/
- Shewry, P. (2022). Wheat grain proteins: past, present and future. *Cereal Chemistry*, *100*(1). Obtenido de <https://doi.org/10.1002/cche.10585>
- Sun, J., Si, X., Li, T., Zhao, J., Qian, H., Li, Y., . . . Wang, L. (2022). The influence of water-unextractable arabinoxylan and its hydrolysates on the aggregation and structure of gluten proteins. *Frontiers in Nutrition*, *9*. Obtenido de <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.877135>
- USDA Foreign Agricultural Service. (2026). Obtenido de USDA Foreign Agricultural Service: <https://www.fas.usda.gov/data>
- Wang, X., Appels, R., Zhang, X., Bekes, F., Diepeveen, D., Ma, W., . . . Islam, S. (2020). Solubility variation of wheat dough proteins: A practical way to track protein behaviors in dough processing. *Food Chemistry*, *312*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126038>
- Wang, Z., Ma, S., Sun, B., Wang, F., Huang, J., Wang, X., & Bao, Q. (2021). Effects of thermal properties and behavior of wheat starch and gluten on their interaction: A review. *International journal of biological macromolecules*, *177*, 474-484. doi:10.1016/j.ijbiomac.2021.02.175

Yan, W., Zhang, M., Zhang, M., Yadav, M., Jia, X., & Yin, L. (2022). Effect of wheat bran arabinoxylan on the gelatinization and long-term retrogradation behavior of wheat starch. *Carbohydrate Polym.* Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119581>

Zhu, X.-F., Tao, H., Wang, H.-L., & Xu, X.-M. (2023). Impact of water soluble arabinoxylan on starch gluten interactions in dough. *LWT, 173*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114289>

