



## DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE $\beta$ -GLUCANOS Y VISCOSIDAD EN GENOTIPOS DE AVENA (*Avena sativa* L.) CULTIVADOS EN MÉXICO

### DETERMINATION OF $\beta$ -GLUCAN CONTENT AND VISCOSITY IN OAT (*Avena sativa* L.) GENOTYPES GROWN IN MEXICO

Elie Martínez-Cruz<sup>1</sup>, Yaretzi Luna Carmeño<sup>2</sup>, Teodoro Espinosa Solares<sup>2</sup>, René Hortelano-Santa Rosa<sup>1\*</sup>, Héctor Eduardo Villaseñor-Mir<sup>1</sup> y Julio Huerta Espino<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Valle de México, Programa de Avena, Coatlínchán, Texcoco, Estado de México, México. <sup>2</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Chapingo, Estado de México, México.

\*Autor de correspondencia (hortelano.rene@inifap.gob.mx)

#### RESUMEN

Los  $\beta$ -glucanos son polisacáridos que se encuentran en el grano de avena. Existe una relación positiva entre el contenido de  $\beta$ -glucanos y la viscosidad en agua, la cual se ha asociado con la capacidad de reducción del colesterol arterial reduciendo el riesgo de ataque cardíaco. En las variedades de avena que se cultivan en México se desconoce la concentración de  $\beta$ -glucanos y la viscosidad. El objetivo de la presente investigación fue cuantificar el contenido de  $\beta$ -glucanos y proteína, además de evaluar la viscosidad en la harina del grano de la colección nacional de avena del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de México. Se estimó el porcentaje de  $\beta$ -glucanos y proteína en harina integral del grano; a su vez, se obtuvieron curvas de flujo en muestras de avena (6 % m/m) a 20 °C y una velocidad de deformación de 0.1 a 100 s<sup>-1</sup> durante 60 s. Se realizó análisis de varianza y la comparación de medias para mostrar las diferencias entre genotipos. Los genotipos Avemex y Tarahumara presentaron los mayores porcentajes de  $\beta$ -glucanos (2.8 a 3.0 %). Diamante R-31, Huamantla y Tarahumara fueron los de mayor contenido de proteína (20 %). Con base en el modelo de potencia, todos los genotipos de la colección nacional presentaron valores de índice de comportamiento de flujo menor de 1, lo cual las catalogó como fluidos no Newtonianos, y debido a que la viscosidad disminuyó al incrementarse la velocidad de deformación, se clasificaron como pseudoplásticos. Para una velocidad de deformación de 10 s<sup>-1</sup>, Karma y Babicora presentaron los valores más altos de viscosidad, 82.35 y 61.31 mPa·s. Se identificaron fuentes genéticas para alto contenido de  $\beta$ -glucanos y proteína, así como alta viscosidad, por lo que es posible utilizarlas como progenitoras dentro del programa de mejoramiento de avena para generar líneas que conjunten dichas características apropiadas para consumo humano.

**Palabras clave:** *Avena sativa* L.,  $\beta$ -glucanos, mejoramiento genético, viscosidad.

#### SUMMARY

$\beta$ -glucans are polysaccharides present in oat grains. There is a positive relationship between the content of  $\beta$ -glucan and viscosity in water, which has been associated with the ability to lower arterial cholesterol reducing the risk of heart attack. In oat varieties grown in Mexico, the concentration of  $\beta$ -glucans and viscosity are unknown. The objective of this research was to quantify the content of  $\beta$ -glucans and protein, in addition to evaluating the viscosity in the flour of the grain of the national oat collection of the National Institute for Forest, Agriculture and Livestock Research (INIFAP) of Mexico.

The percentage of  $\beta$ -glucans and protein in whole grain flour was estimated; in turn, flow curves in oat samples (6 % m/m) at 20 °C and a deformation rate of 0.1 to 100 s<sup>-1</sup> for 60 s were obtained. Analysis of variance and comparison of means was performed to detect differences between genotypes. Avemex and Tarahumara genotypes had the largest percentages of  $\beta$ -glucans (2.8 to 3.0 %). Diamante R-31, Huamantla and Tarahumara had the highest protein content (20 %). Based on the power model, all genotypes of the national collection presented flow index values lower than 1, which classified them as non-Newtonian fluids, and because the viscosity decreased with increasing deformation velocity, they were classified as pseudoplastic. For a deformation rate of 10 s<sup>-1</sup>, Karma and Babicora presented the highest viscosity values, 82.35 and 61.31 mPa·s. Genetic sources for high  $\beta$ -glucan and protein content, as well as high viscosity were identified, so they can be used as parents within the oat breeding program to generate lines that combine these characteristics suitable for human consumption.

**Index words:** *Avena sativa* L.,  $\beta$ -glucans, breeding, viscosity.

#### INTRODUCCIÓN

El cultivo de avena (*Avena sativa* L.) ocupó en 2023 en México 512,239 hectáreas, de las cuales el 93 % se destinó para la producción de forraje, mientras que avena para grano representó el 7 %, con una producción de 50,000 t (SIAP, 2024). En este contexto, el programa de mejoramiento genético de avena del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), que históricamente ha liberado todas las variedades de este cultivo en México, se ha enfocado principalmente en la liberación de variedades para forraje que conjunten ciclos vegetativos cortos (precocidad), tolerancia a sequía y a roya del tallo, así como mayor rendimiento de la relación grano-paja (Villaseñor-Mir *et al.*, 2021).

A nivel mundial se han ideado programas de mejoramiento específicos para la obtención de variedades de avena con mayor calidad nutricional para consumo humano, como mayor concentración de  $\beta$ -glucanos, aceite y proteína

en grano (Stewart y McDougall, 2014). Los  $\beta$ -glucanos son polisacáridos formados por monómeros de glucosa unidos por enlaces  $\beta$ -glucosídicos, que se localizan en las paredes celulares del endospermo de los granos de avena (Bai *et al.*, 2019) con contenidos de hasta 8 %, dependiendo de la variedad (Hughes y Grafenauer 2021). Los  $\beta$ -glucanos son reconocidos por ser la principal fibra soluble en agua asociada con la viscosidad de la harina, la cual depende del contenido de la fibra y de su peso molecular (Lazaridou *et al.*, 2007; Sushytskyi *et al.*, 2023). Existen investigaciones que clasifican el grano de avena como nutraceutico, debido principalmente a la presencia de la fibra soluble y a la capacidad de formar soluciones viscosas que disminuyen el vaciamiento gástrico e inhiben el transporte de colesterol y triglicéridos aumentando el colesterol fecal (Amerizadeh *et al.*, 2022; Sterna *et al.*, 2016), lo que se relaciona con la reducción de la concentración plasmática de colesterol en la sangre, disminuyendo el riesgo de enfermedad coronaria (Lante *et al.*, 2023; Paudel *et al.*, 2021); adicionalmente, la mayor viscosidad de los  $\beta$ -glucanos en solución acuosa se asocia con la reducción del índice glucémico, mejora la respuesta a la insulina y modula el sistema inmune (Sofi *et al.*, 2017); también, esta fibra se utiliza como espesante, sustituto de grasas, emulsionante y estabilizador para espumas, lo que diversifica su uso en la industria de bebidas, alimentos y cosméticos (Singla *et al.*, 2024).

Por otro lado, el grano de avena presenta un mayor contenido de proteína y mejor balance de aminoácidos esenciales que los cereales de mayor consumo en México, como maíz y trigo, con un contenido de proteína de hasta 17.3 %, y muestra mayor proporción de aminoácidos esenciales como lisina y triptófano (Sterna *et al.*, 2016). Por ello, el grano de avena es una fuente de proteína barata y de excelente calidad nutricional; además, puede aportar 4 % de  $\beta$ -glucanos, factores nutricionales esenciales en la salud del consumidor (Ruja *et al.*, 2024); sin embargo, el consumo *per cápita* anual de este grano en México es muy bajo, con solamente 2.1 kg (SIAP, 2024).

En México no se ha realizado mejoramiento genético enfocado a la obtención de variedades de avena con características específicas nutricionales del grano para consumo humano, por lo que un primer paso es explorar el germoplasma nacional. La colección de avena del INIFAP concentra todas las variedades que se han liberado en México y es un punto de partida para identificar genotipos con alta concentración de  $\beta$ -glucanos, proteína y alta viscosidad, que se utilicen como progenitores en el plan de cruzamientos y permitan incorporar los caracteres deseados y derivar líneas que conjunten estas características. Por lo anterior, el objetivo

de la presente investigación fue caracterizar la colección nacional de avena del programa de mejoramiento del INIFAP con base al contenido de  $\beta$ -glucanos, proteína y viscosidad de la harina.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Material vegetal

Se utilizó grano de avena de la colección nacional del INIFAP, que la conforman 30 variedades, mismas que fueron cultivadas bajo condiciones de temporal en la localidad de Chapingo, Texcoco, México. Los genotipos fueron: Texas, Nodaway, AB-177, Putnam 61, Perla, Ópalo, Chihuahua, Cuauhtémoc, Guelatao, Tulancingo, Juchitepec, Humantla, Diamante R-31, Tarahumara, Páramo, Gema, Babicora, Cusihuiriachi, Papigochi, Rarámuri, Menonita, Bachiniva, Pampas, Teporaca, Karma, Avemex, Obsidiana, Turquesa, Ágata y Jade.

### Determinación de $\beta$ -glucanos

Se obtuvo harina integral de avena del grano previamente descascarado y libre de impurezas. La molienda se realizó en un molino tipo UDY (UDY Corporation, Fort Collins, Colorado, EUA) utilizando una malla 0.5 y se tamizó a través de una malla 10 XX durante 2 min para homogenizar el tamaño de partícula. Se determinó el porcentaje de humedad de la harina mediante el método de horno con corriente de aire exponiendo 2 g de la muestra a 155 °C durante 1 h. La cuantificación de  $\beta$ -glucanos estuvo basada en la metodología por el método enzimático propuesto por McCleary (2000). Se colocaron en un tubo de ensayo de 17 mL, 100 mg de harina, 0.2 mL de etanol acuoso (50 % v/v) y 4.0 mL de tampón de fosfato de sodio (pH 6.5), se mezcló manualmente el contenido y se colocó el tubo en baño maría por 60 s, se colocó a 100 °C durante 2 min y se agitó nuevamente para incubarse a 50 °C por 5 min. Se agregaron 0.2 mL de liquenasa y se mezcló el contenido del tubo, se selló el tubo con parafilm y se incubó a 50 °C por 1 h con agitación. Se agregaron 5 mL de tampón de acetato de sodio (pH 4.0 y 200 mM) y se mezcló, se reposó a temperatura ambiente por 5 min y se centrifugó a 1000  $\times$  g por 10 min. Se depositaron alícuotas de 0.1 mL en tres tubos de ensayo de 12 mL, se les agregó 0.1 mL de tampón de acetato de sodio pH 4.0 y 0.1 mL de  $\beta$ -glucosidasa a dos de los tubos (estos sirvieron para la reacción), al tercer tubo no se le agregó enzima. Se incubaron por 10 min a 50 °C con 3.0 mL de reactivo GOPOD y se llevaron a 50 °C durante 20 min. Se retiraron los tubos del baño maría y se midió la absorbancia a 510 nm. Los resultados se expresaron en porcentaje.

### Determinación del contenido de proteína

El porcentaje de proteína se estimó utilizando el método Kjeldahl de la AOAC (1984). Se pesaron 0.5 g de harina en el tubo de digestión, se agregó una tableta (Kjeltec®) y 6 mL de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) concentrado, la digestión se realizó en la placa a 400 °C por un período de 1 h y 20 min hasta que el líquido contenido en el tubo tomó una coloración verde transparente. Para su destilación, se dejaron enfriar los tubos a temperatura ambiente y se agregaron 75 mL de agua destilada usando una probeta graduada, las muestras se titularon con ácido clorhídrico 0.1 N en el equipo Kjeltec®, se registraron los mL gastados en la titulación, y se estimó el porcentaje de proteína utilizando el factor de conversión de 6.25.

### Determinación de la viscosidad

El comportamiento reológico se caracterizó en un reómetro de esfuerzo controlado (DHR-3, TA-Instruments, New Castle, Delaware, EUA). Se utilizó una geometría de cono-plato (espacio = 1000 µm, 2°/60 mm de diámetro) de acero inoxidable. Se prepararon dispersiones a una concentración de 6 % p/p y se sometieron a una agitación constante durante 15 min a temperatura de 80 °C. Las propiedades reológicas fueron evaluadas a una temperatura constante de 20 °C y se determinaron en función del incremento de la velocidad de deformación de 0.1 a 100 s<sup>-1</sup> durante 60 s. Se realizaron curvas de flujo de esfuerzo cortante y velocidad de deformación, y para la caracterización de la viscosidad se ajustaron los datos al modelo reológico de Ostwald-de Wael también, conocido como la Ley de Potencia:  $\sigma = k\dot{\gamma}^n$ , donde  $\sigma$  es el esfuerzo de corte,  $k$  es el índice de consistencia del fluido (Pa.s<sup>n</sup>),  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de deformación (s<sup>-1</sup>) y  $n$  el índice de comportamiento de flujo (adimensional) (Martínez-Padilla *et al.*, 2022).

### Análisis de datos

Con la información generada se obtuvo el promedio de tres repeticiones, desviación estándar, valores máximos y mínimos para las variables analizadas. Se realizó análisis de varianza y comparación de medias con la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) para detectar diferencias entre genotipos. El análisis se realizó usando el software estadístico SAS 9.1 (SAS Institute, 2004).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido promedio de  $\beta$ -glucanos en la colección nacional de avena fue de 2.3 %, con una amplitud de 1.5 a 3.0 % (Cuadro 1), los valores mínimos fueron similares a los encontrados por Rauf *et al.* (2019), mientras que los máximos estuvieron por debajo de 6.3 %, reportado por estos mismos autores en una colección mundial de 975 accesiones. En otro estudio Lazaridou *et al.* (2007) obtuvieron valores de 2.0 a 7.0 %. Es importante considerar que el contenido de  $\beta$ -glucanos en avena depende del genotipo, así como de las condiciones de crecimiento del cultivo; por ejemplo, a mayor temperatura y menor precipitación durante el llenado de grano incrementan el contenido (Howarth *et al.*, 2021), por lo cual, puede variar de 1.8 a 5.5 %, y se ha encontrado en algunas variedades de avena hasta un 7 % del peso seco total, aunque lo más habitual es encontrar contenidos de 4.0 a 5.5% (Aparicio y Ortega, 2016); además, la estimación de la concentración de  $\beta$ -glucanos puede ser afectada por el método de extracción (Vásquez *et al.*, 2020).

El contenido de proteína en los 30 genotipos evaluados fue en promedio de 17.5 %, con una variación de 14.2 a 22.2 %. En otra estimación para algunas de estas variedades, cultivadas en Durango, México, Ortiz-Robledo *et al.* (2013) identificaron un rango de 12.8 a 20.7 %. Estos valores son superiores a los indicados por Kriger *et al.* (2018), quienes reportaron valores de 12.0 a 15.0 % en genotipos cultivados

**Cuadro 1. Valores promedio, mínimo y máximo de las variables bioquímicas y reológicas de la colección nacional de avena del INIFAP, México.**

| Variable                               | Media | Desviación estándar | Mínimo | Máximo |
|----------------------------------------|-------|---------------------|--------|--------|
| $\beta$ -glucanos (%)                  | 2.37  | 0.45                | 1.55   | 3.08   |
| Proteína (%)                           | 17.54 | 2.08                | 14.26  | 22.25  |
| Viscosidad (mPa·s) 10 s <sup>-1</sup>  | 25.93 | 15.67               | 11.26  | 82.35  |
| Viscosidad (mPa·s) 50 s <sup>-1</sup>  | 18.50 | 12.12               | 5.81   | 53.04  |
| Viscosidad (mPa·s) 100 s <sup>-1</sup> | 16.14 | 11.01               | 4.37   | 44.12  |

en Rusia. La diferencia en concentración de proteína se debe al uso de diferentes genotipos y a las condiciones de cultivo de las localidades de evaluación (Perez *et al.*, 2016; Köse, 2022).

El valor promedio para la velocidad de deformación de  $10 \text{ s}^{-1}$  fue  $25 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , con una amplitud de 11.26 a  $82.35 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ . La variación en la viscosidad depende de la concentración de  $\beta$ -glucanos y de su peso molecular, de acuerdo con lo señalado por Sushytskyi *et al.* (2023); así mismo, se observó que la viscosidad disminuyó en función del incremento en la velocidad de deformación de 10 a  $100 \text{ s}^{-1}$ .

Los genotipos Avemex, Tarahumara, Putnam y Turquesa presentaron los mayores porcentajes de  $\beta$ -glucanos, de 2.8 a 3.0 %, mientras que Huamantla, Guelatao y Texas se asociaron con los más bajos, de 1.5 a 1.6 %, dichos valores son menores que los encontrados por Perez *et al.* (2016), quienes reportaron porcentajes de 4.0 a 6.0 en ocho genotipos cultivados en diferentes localidades de Canadá. En México, Hernández-Campuzano *et al.* (2018) reportaron valores de 4.6 % en la variedad Obsidiana y de 3.3 % en Menonita, dichos porcentajes superan a los indicados en esta publicación. Lo anterior se puede deber a que durante el proceso de generación de las harinas, en el presente estudio, se eliminó el salvado del grano de avena donde proporcionalmente es posible encontrar hasta 12 % de  $\beta$ -glucanos en las paredes celulares de las capas de aleurona y subaleurona, con base en lo indicado por Grundy *et al.* (2018). Para el caso de Avemex y Turquesa, son variedades que se liberaron por presentar alto potencial de rendimiento de grano (Villaseñor *et al.*, 2009) y que, de acuerdo con estos resultados, presentan alta concentración de  $\beta$ -glucanos, por lo que se proponen como fuentes genéticas para aportar ambas características. Para contenido de proteína, Diamante R-31, Huamantla y Tarahumara mostraron los valores mayores de 20 % mientras, Karma, Babicora y Gema presentaron los porcentajes menores. Tarahumara presentó valores altos de  $\beta$ -glucanos y proteína por lo que se debe utilizar como fuente genética para estos caracteres; así mismo, se encontraron niveles de proteína para Chihuahua de 18.3, Cuauhtémoc de 17.4, Karma de 14.1 y Avemex de 15.3 %, mientras que Ortiz-Robledo *et al.* (2013) indicaron que estas mismas variedades cultivadas en el norte de México presentaron valores de 12.8, 15.6, 19.8 y 20.7 %, respectivamente; dichas diferencias en el contenido de proteína se deben a las condiciones de producción y la interacción de las localidades con el genotipo, de acuerdo con lo señalado por Köse (2022).

En el Cuadro 3 se presenta la comparación de medias por genotipo del índice de consistencia (k) y comportamiento

de flujo (n), así como de las viscosidades ordenadas de mayor a menor, a diferentes velocidades de deformación. El índice de consistencia (k) que indica la viscosidad aparente presentó los valores más altos en las variedades Karma y Babicora.

Con base en el modelo de potencia, todas las variedades presentaron valores de n menores de 1, lo que los clasifica como fluido no Newtoniano, y debido a que la viscosidad de los genotipos disminuyó al incrementarse la velocidad de deformación, las soluciones de harina de avena se clasificaron como fluidos pseudoplásticos (Cuadro 3); es decir, existe un adelgazamiento del fluido debido a la velocidad, lo que concuerda con lo indicado por Zarzycki y Sobota (2015), Paz *et al.* (2021) y Lante *et al.* (2023). El comportamiento de fluido pseudoplástico de la colección nacional de avena de México se presenta en la Figura 1, donde se observa que la velocidad de deformación se incrementó de manera no lineal; así mismo, en la Figura 2 se representa la viscosidad de los 30 genotipos, misma que se caracterizó por tener un pico alto cuando se tienen bajas velocidades de deformación, mientras que cuando la velocidad de deformación aumentó la viscosidad disminuyó, esta tendencia se prolongó hasta llegar a un comportamiento asintótico con respecto al eje de las abscisas. La variedad Karma mostró el valor más alto de viscosidad y presentó valores altos de concentración de  $\beta$ -glucanos, por lo que puede declararse como apropiada para el consumo humano y utilizarse como fuente genética para estas características en el programa de mejoramiento. Las variedades Ópalo y Avemex presentaron un valor de viscosidad similar ( $29.75 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ), pero Ópalo presentó un contenido bajo de  $\beta$ -glucanos (1.7 %) y Avemex el valor más alto (3.0 %) (Cuadros 2 y 3), lo que puede explicarse por lo indicado por Wang *et al.* (2016) y Sun *et al.* (2020), quienes mencionaron que la viscosidad depende del contenido y peso molecular de los  $\beta$ -glucanos, por lo que es probable que Ópalo presente alto peso molecular en dicha fibra soluble.

## CONCLUSIONES

Se encontró variación para contenido de  $\beta$ -glucanos y proteína, así como para viscosidad en la harina de los granos de la colección nacional de avena del INIFAP. Las variedades Avemex y Tarahumara se identificaron por su alto contenido de  $\beta$ -glucanos. Diamante R31, Huamantla y Tarahumara se asociaron a los valores más altos de proteína. Para el caso de alta viscosidad destacaron los genotipos Karma y Babicora. Estos genotipos se proponen como fuentes genéticas para utilizarse como progenitores dentro del programa de cruzamientos para generar líneas que conjunten estas características y liberar variedades de grano con calidad nutricional. La variedad Karma debido

**Cuadro 2. Comparación de medias del contenido de  $\beta$ -glucanos y proteína por genotipo de la colección nacional de avena del INIFAP, México.**

| Genotipo       | $\beta$ -glucanos (%) | Proteína en harina (%) |
|----------------|-----------------------|------------------------|
| Avemex         | 3.0 a                 | 15.3 jk                |
| Tarahumara     | 3.0 a                 | 20.4 b                 |
| Putnam 61      | 2.8 ab                | 17.4 efg               |
| Turquesa       | 2.8 ab                | 18.1 def               |
| Nodaway        | 2.8 abc               | 18.3 d                 |
| Bachiniva      | 2.8 abc               | 15.2 k                 |
| Rarámuri       | 2.8 abc               | 15.2 k                 |
| Karma          | 2.7 abc               | 14.1 m                 |
| Obsidiana      | 2.6 abcd              | 15.2k                  |
| Juchitepec     | 2.6 abcd              | 17.4 efg               |
| AB-177         | 2.6 abcd              | 18.1 de                |
| Gema           | 2.5 bcde              | 14.3 lm                |
| Paramo         | 2.4 bcde              | 16.1 jl                |
| Babicora       | 2.4 bcde              | 14.2 lm                |
| Cuahutemoc     | 2.4 bcde              | 17.4 efg               |
| Cusihuriachi   | 2.4 bcde              | 15.0 kl                |
| Chihuahua      | 2.4 bcde              | 18.3 d                 |
| Pampas         | 2.3 cdef              | 17.4 fg                |
| Papigochi      | 2.2 defg              | 15.4 jk                |
| Menonita       | 2.2 defg              | 16.2 i                 |
| Perla          | 2.2 defg              | 19.2 c                 |
| Jade           | 2.1 efgh              | 17.1 gh                |
| Teporaca       | 2.0 efghi             | 18.2 d                 |
| Ágata          | 1.8 fghij             | 18.1 def               |
| Diamante R -31 | 1.7 ghij              | 22.1 a                 |
| Tulancingo     | 1.7 hij               | 19.2 c                 |
| Ópalo          | 1.7 hij               | 16.2 i                 |
| Texas          | 1.6 hij               | 16.4 hi                |
| Guelatao       | 1.6 ij                | 19.2 c                 |
| Huamantla      | 1.5 j                 | 21.4 a                 |
| DSH 0.05       | 0.4                   | 0.7                    |

Medias con letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes. DSH: diferencia significativa honesta.

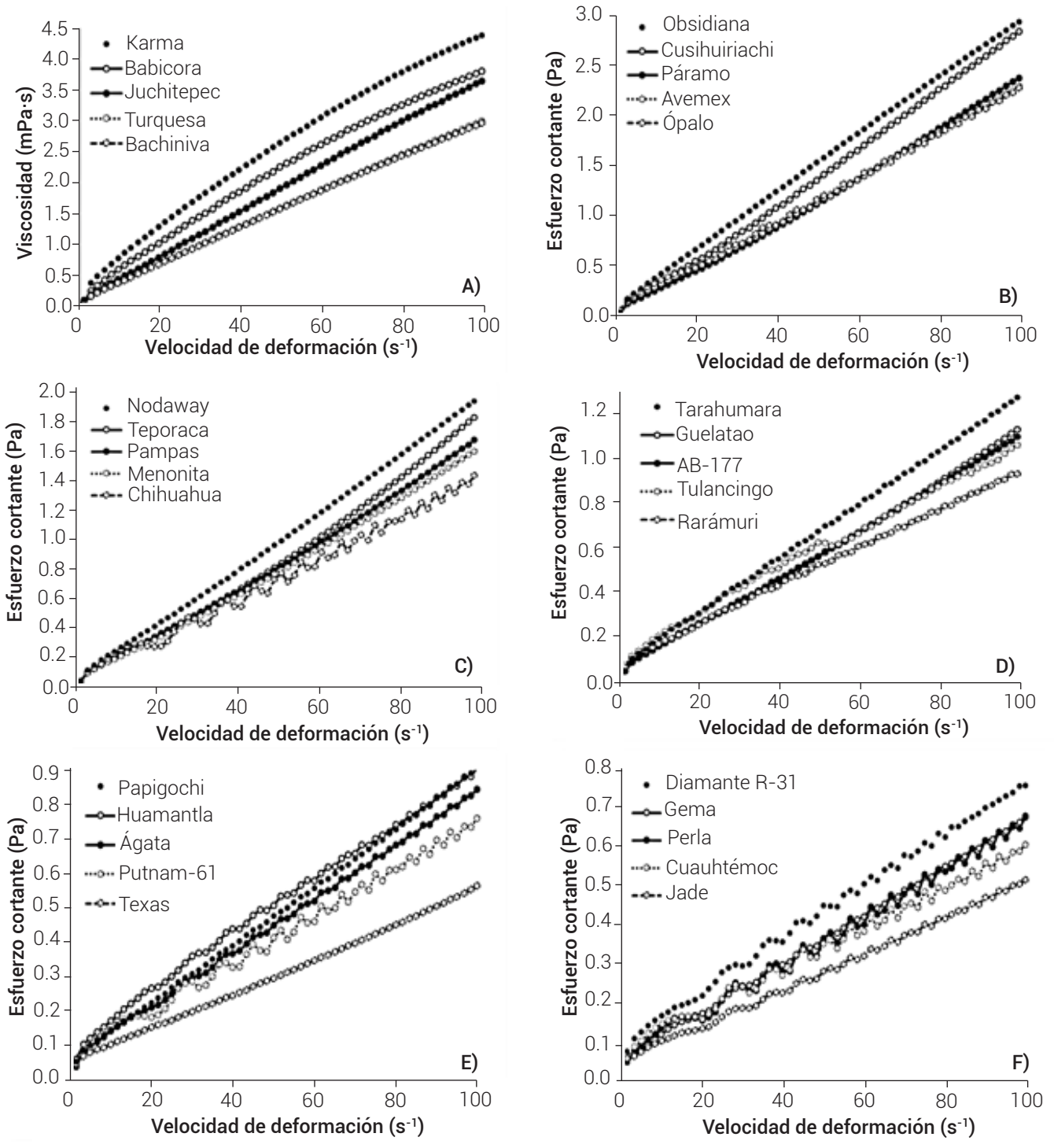


Figura 1. Curvas de flujo, esfuerzo cortante y velocidad de deformación en genotipos de la colección nacional de avena del INIFAP.

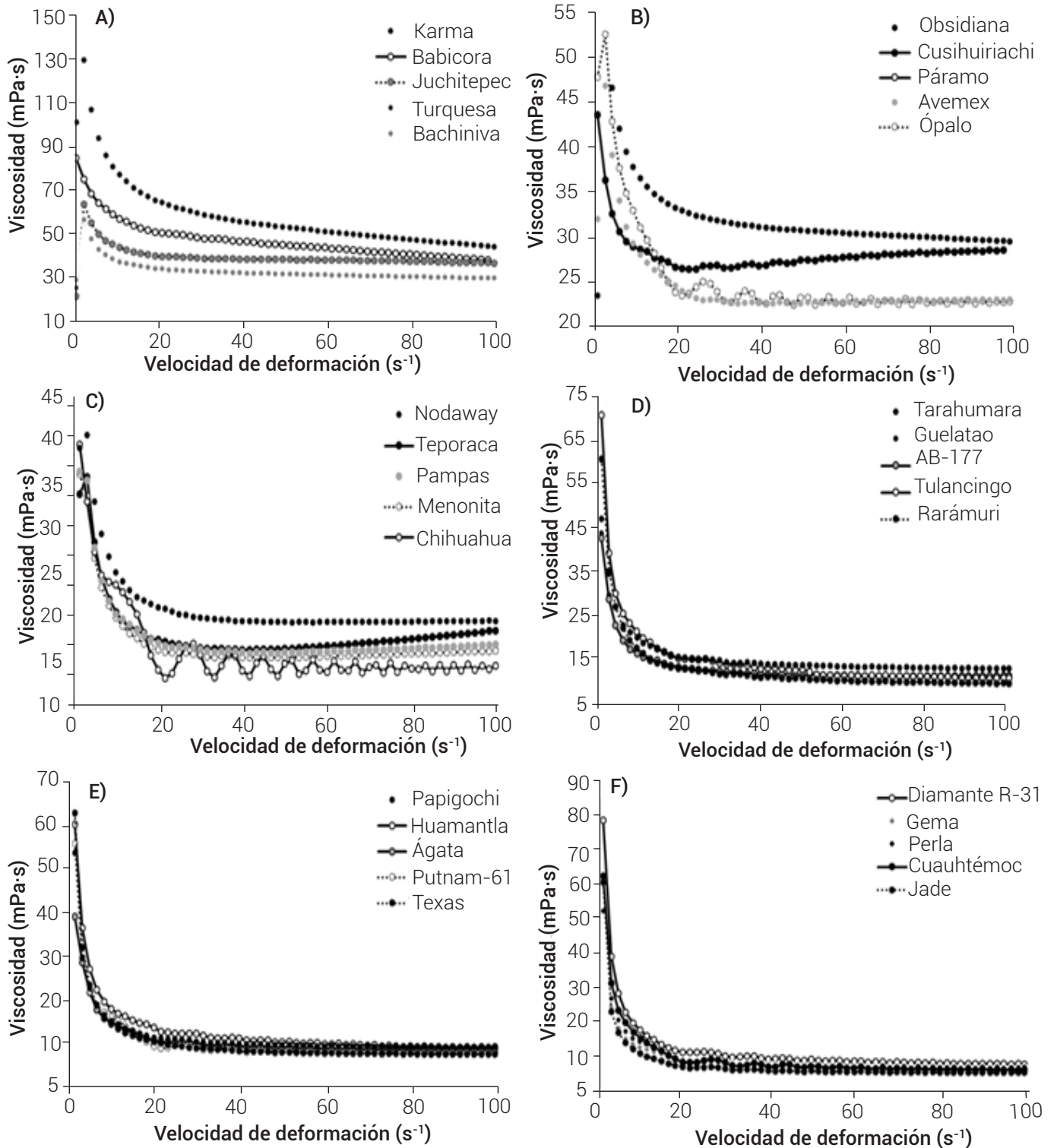


Figura 2. Curva de viscosidad de 30 genotipos de la colección nacional de avena del INIFAP a diferentes velocidades de deformación.

**Cuadro 3. Comparación de medias de las variables reológicas por genotipo a diferentes velocidades de deformación de la colección nacional de avena del INIFAP, México.**

| Genotipo       | k (Pa·s <sup>n</sup> ) | n            | R <sup>2</sup> | Velocidad de deformación (s <sup>-1</sup> )/Viscosidad (mPa·s) |             |            |
|----------------|------------------------|--------------|----------------|----------------------------------------------------------------|-------------|------------|
|                |                        |              |                | 10                                                             | 50          | 100        |
| Karma          | 0.15 a                 | 0.73 bcdefgh | 0.98           | 82.35 a                                                        | 53.04 a     | 44.12 a    |
| Babicora       | 0.09 b                 | 0.79 abcde   | 0.98           | 61.31 b                                                        | 44.26 b     | 38.46 b    |
| Juchitepec     | 0.06 bc                | 0.88 ab      | 0.79           | 46.53 c                                                        | 38.54 c     | 35.54 c    |
| Turquesa       | 0.05 bc                | 0.85 ab      | 0.92           | 40.48 cd                                                       | 32.12 d     | 29.09 d    |
| Bachiniva      | 0.05 bc                | 0.85 ab      | 0.90           | 40.11 cd                                                       | 31.85 d     | 28.85 de   |
| Obsidiana      | 0.05 bc                | 0.86 ab      | 0.86           | 38.87 cd                                                       | 31.04 de    | 28.19 de   |
| Cusihuiriachi  | 0.03 c                 | 0.93 a       | 0.86           | 31.06 de                                                       | 27.80 e     | 26.51 e    |
| Avemex         | 0.04 c                 | 0.85 abc     | 0.71           | 29.75 def                                                      | 23.34 fg    | 21.07 f    |
| Ópalo          | 0.04 c                 | 0.87 ab      | 0.78           | 29.42 def                                                      | 23.64 f     | 21.63 f    |
| Paramo         | 0.03 c                 | 0.93 a       | 0.77           | 25.48 efg                                                      | 22.91 fg    | 21.90 f    |
| Nodaway        | 0.03 c                 | 0.84 abc     | 0.72           | 25.45 efg                                                      | 19.93 gh    | 17.95 g    |
| Tulancingo     | 0.05 bc                | 0.65 efghi   | 0.90           | 21.85 efgh                                                     | 12.25 jkl   | 95.85 kl   |
| Pampas         | 0.03 c                 | 0.83 abcd    | 0.76           | 21.56 efgh                                                     | 16.56 hi    | 14.80 hi   |
| Teporaca       | 0.03 c                 | 0.87 ab      | 0.80           | 21.20 efgh                                                     | 17.29 hi    | 15.85 gh   |
| Chihuahua      | 0.03 c                 | 0.78 abcdef  | 0.76           | 20.79 efgh                                                     | 14.80 ij    | 12.8 ij    |
| Menonita       | 0.03 c                 | 0.85 ab      | 0.88           | 20.18 efgh                                                     | 15.95 i     | 14.43 hi   |
| Tarahumara     | 0.03 c                 | 0.77 bcdefg  | 0.87           | 20.07 efgh                                                     | 13.83 ijk   | 11.80 jk   |
| Huamantla      | 0.04 c                 | 0.64 fgghi   | 0.95           | 18.84 efgh                                                     | 10.54 klmn  | 8.21 lmn   |
| Rarámuri       | 0.04 c                 | 0.65 efghi   | 0.92           | 18.44 efgh                                                     | 10.65 klmn  | 8.41 lm    |
| Diamante R -31 | 0.04 bc                | 0.57 i       | 0.92           | 18.08 fgh                                                      | 9.06 lmnop  | 6.72 mnop  |
| AB-177         | 0.03 c                 | 0.76 bcdefg  | 0.86           | 17.07 fgh                                                      | 11.65 jklm  | 9.89 kl    |
| Guelatao       | 0.03 c                 | 0.76 bcdefg  | 0.82           | 17.01 fgh                                                      | 11.68 jklm  | 9.94 kl    |
| Papigochi      | 0.03 c                 | 0.69 defghi  | 0.88           | 16.17 gh                                                       | 9.89 lmno   | 8.00 lmn   |
| Putnam 61      | 0.03 c                 | 0.63 gih     | 0.89           | 15.39 gh                                                       | 8.51 mnop   | 6.60 mnop  |
| Ágata          | 0.03 c                 | 0.70 defghi  | 0.89           | 15.11 gh                                                       | 93.17 lmnop | 75.72 lmno |
| Cuauhtémoc     | 0.04 c                 | 0.55 i       | 0.92           | 14.60 gh                                                       | 7.10 nop    | 5.22 op    |
| Perla          | 0.03 c                 | 0.62 ghi     | 0.88           | 13.71 gh                                                       | 7.44 nop    | 5.72 nop   |
| Texas          | 0.03 c                 | 0.55 i       | 0.89           | 12.94 gh                                                       | 6.61 op     | 5.02 op    |
| Gema           | 0.03 c                 | 0.67 efghi   | 0.90           | 12.82 gh                                                       | 7.55 nop    | 6.03 mnop  |
| Jade           | 0.03 c                 | 0.59 hi      | 0.88           | 11.26 h                                                        | 5.81 p      | 4.37 p     |
| DSH 0.05       | 0.04                   | 0.15         |                | 12.9                                                           | 3.6         | 2.5        |

Medias con letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes. k: índice de consistencia, n: índice de comportamiento, R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación, DSH: diferencia significativa honesta.

a sus valores altos de  $\beta$ -glucanos y viscosidad se puede declarar como variedad apta para consumo humano. Es importante estandarizar un método práctico y económico para seleccionar líneas experimentales por alta viscosidad, así como explorar el efecto del peso molecular de los  $\beta$ -glucanos sobre la viscosidad en harina integral del grano de avena.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento parcial de las investigaciones que dieron origen a esta publicación a los proyectos con recursos fiscales del INIFAP denominados "Generación de tecnología para incrementar la productividad del cultivo de avena en México" y "Generación de variedades de avena para aumentar la productividad en México". También se agradece el apoyo técnico y científico de manera póstuma al Dr. Ramón Huerta Zurita.

### BIBLIOGRAFÍA

- Amerizadeh A., H. S. Ghaheh, G. Vaseghi, Z. Farajzadegan and S. Asgari (2022) Effect of oat (*Avena sativa* L.) consumption on lipid profile with focus on triglycerides and high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C): an updated systematic review. *Current Problems in Cardiology* 48:101153, <https://doi.org/10.1016/j.cpcardiol.2022.101153>
- AOAC, Association of Official Analytical Chemists (1984) Official Methods of Analysis. Kjeldahl method (2.062) 14th edition. Association of Official Analytical Chemists Washington D.C., USA.
- Aparicio V. A. y R. M. Ortega A. (2016) Efectos del consumo del beta-glucano de la avena sobre el colesterol sanguíneo: una revisión. *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética* 20:127-139, <https://doi.org/10.14306/renhyd.20.2.183>
- Bai J., Y. Ren, Y. Li, M. Fan, H. Qian, L. Wang, ... and Z. Rao (2019) Physiological functionalities and mechanisms of  $\beta$ -glucans. *Trends in Food Science & Technology* 88:57-66, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.023>
- Grundt M. M. L., A. Fardet, S. M. Tosh, G. T. Rich and P. J. Wilde (2018) Processing of oat: the impact on oat's cholesterol lowering effect. *Food & Function* 9:1328-1343, <https://doi.org/10.1039/C7FO02006F>
- Hernández-Campuzano A. V., C. G. Martínez-Rueda, G. Estrada-Campuzano y A. Domínguez-López (2018) Efecto de la fertilización nitrogenada y del genotipo sobre el rendimiento y el contenido de nitrógeno y  $\beta$ -glucanos en el grano de la avena (*Avena sativa* L.). *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 44:88-95.
- Howarth C. J., P. M. J. Martinez-Martin, A. A. Cowan, I. M. Griffiths, R. Sanderson, S. J. Lister, ... and A. H. Marshall (2021) Genotype and environment affect the grain quality and yield of winter oats (*Avena sativa* L.). *Foods* 10:2356, <https://doi.org/10.3390/foods10102356>
- Hughes J. and S. Grafenauer (2021) Oat and barley in the food supply and use of beta glucan health claims. *Nutrients* 13:2556, <https://doi.org/10.3390/nu13082556>
- Köse Ö. D. E. (2022) Multi-environment analysis of grain yield and quality traits in oat (*Avena sativa* L.). *Journal of Agricultural Sciences* 28:278-286, <https://doi.org/10.15832/ankutbd.893517>
- Kruger O. V., E. V. Kashirskikh, O. O. Babich and S. Y. Noskova (2018) Oat protein concentrate production. *Foods and Raw Materials* 6:47-55, <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-47-55>
- Lante A., E. Canazza and P. Tessari (2023) Beta-glucans of cereals: functional and technological properties. *Nutrients* 15:2124, <https://doi.org/10.3390/nu15092124>
- Lazaridou A., C. G. Biliaderis and M. S. Izdorczyk (2007) Cereal glucans: structures, physical properties, and physiological functions. In: *Functional Food Carbohydrates*. C. G. Biliaderis and M. S. Izdorczyk (eds.). CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. pp:1-72.
- Martínez-Padilla L. P. (2022) Tratamiento de datos de alimentos fluidos para la determinación experimental de viscosidad. *Educación Química* 33:21-32, <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2022.3.81406>
- McCleary B. V. (2000) Importance of enzyme purity and activity in the measurement of total dietary fiber and dietary fiber components. *Journal of AOAC International* 83:997-1005, <https://doi.org/10.1093/jaoac/83.4.997>
- Ortiz-Robledo F., I. Villanueva-Fierro, B. D. Oomah, I. Lares-Asef, J. B. Proal-Nájera and y J. J. Nívar-Chaidez (2013) Avenanthramides and nutritional components of four Mexican oat (*Avena sativa* L.) varieties. *Agrociencia* 47:225-232.
- Paudel D., B. Dhungana, M. Caffè and P. Krishnan (2021) A review of health-beneficial properties of oats. *Foods* 10:2591, <https://doi.org/10.3390/foods10112591>
- Paz R. D., A. C. Landázuri and M. G. Vernaza (2021) Development of a cereal-based product using residual *Moringa oleifera* Lam. seed powder biomass and pseudo-plastic behavior of the dough mixtures. *Nutrition & Food Science* 51:594-603, <https://doi.org/10.1108/NFS-05-2020-0161>
- Perez H. M., J. Gao, T. Vasanthan, F. Temelli and K. Henderson (2016)  $\beta$ -Glucan content, viscosity, and solubility of Canadian grown oat as influenced by cultivar and growing location. *Canadian Journal of Plant Science* 96:183-196, <https://doi.org/10.1139/cjps-2014-0440>
- Rauf M., H. Yoon, S. Lee, M. J. Shin, H. C. Ko, M. C. Lee, ... and Y. M. Choi (2019) Evaluation of major dietary ingredients in diverse oats (*Avena sativa* L.) germplasm. *Journal of Crop Science and Biotechnology* 22:495-507, <https://doi.org/10.1007/s12892-019-0274-0>
- Ruja A., A. Cozma, B. Cozma, N. M. Horablaga, C. Dinulescu, E. Alexa, ... and I. M. Imbrea (2024) Nutritional, phytochemical, and rheological profiles of different oat varieties and their potential in the flour industry. *Agronomy* 14:1438, <https://doi.org/10.3390/agronomy14071438>
- SAS Institute (2004) SAS/STAT® 9.1 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 5121 p.
- SIAP, Servicio Información Agroalimentaria y Pesquera (2024) Panorama Agroalimentario 2018-2024. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. 207 p.
- Singla A., O. P. Gupta, V. Sagwal, A. Kumar, N. Patwa, N. Mohan, ... and G. Singh (2024) Beta-glucan as a soluble dietary fiber source: origins, biosynthesis, extraction, purification, structural characteristics, bioavailability, biofunctional attributes, industrial utilization, and global trade. *Nutrients* 16:900, <https://doi.org/10.3390/nu16060900>
- Sofi S. A., J. Singh and S. Rafiq (2017)  $\beta$ -glucan and functionality: a review. *Econicon Nutrition* 10:67-74.
- Sterna V., S. Zute and L. Brunava (2016) Oat grain composition and its nutrition benefice. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 8:252-256, <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.100>
- Stewart D. and G. McDougall (2014) Oat agriculture, cultivation and breeding targets: implications for human nutrition and health. *British Journal of Nutrition* 112:S50-S57, <https://doi.org/10.1017/S0007114514002736>
- Sun T., J. Li, Y. Qin, J. Xie, B. Xue, X. Li, J. ... and Z. Shao (2020) Rheological and functional properties of oat  $\beta$ -glucan with different molecular weight. *Journal of Molecular Structure* 1209: 127944, <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.127944>
- Sushytskiy L., A. Synytsya, J. Čopíková, P. Lukáč, L. Rajsíglóvá, P. Tenti and L. E. Vannucci (2023) Perspectives in the application of high, medium, and low molecular weight oat  $\beta$ -D-glucans in dietary nutrition and food technology—a short overview. *Foods* 12:1121, <https://doi.org/10.3390/foods12061121>
- Vásquez M. S. M., A. de Francisco and B. M. Bohrer (2020) A comprehensive review on cereal  $\beta$ -glucan: extraction, characterization, causes of degradation, and food application. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 60:3693-3704, <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1706444>
- Villaseñor M. H. E., E. Espitia R., J. Huerta E., L. Osorio A. y J. López H. (2009) Turquesa, nueva variedad de avena para la producción de grano

y forraje en México. *Agricultura Técnica en México* 35:487-492.  
**Villaseñor-Mir H. E., J. Huerta-Espino, M. F. Rodríguez-García, R. Hortelano S. R., E. Espitia-Rangel y E. Martínez-Cruz (2021)** Mejoramiento genético de avena en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12(Esp. 25):21-25, <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i25.2808>  
**Wang X., J. Storsley, S. J. Thandapilly and N. Ames (2016)** Effects of

processing, cultivar, and environment on the physicochemical properties of oat  $\beta$ -glucan. *Cereal Chemistry* 93:402-408, <https://doi.org/10.1094/CHEM-12-15-0245-R>  
**Zarzycki P. and A. Sobota (2015)** Effect of pH on apparent viscosity of wholemeal oat flour water dispersions. *International Journal of Food Properties* 18:303-315, <https://doi.org/10.1080/10942912.2013.809538>