

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

**EVALUACIÓN DE LA COMPACTACIÓN DE LOS GRANOS DE TRIGO ALMACENADOS
EN SILOS INDUSTRIALES**

*Trabajo Final de Graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas*

Modalidad
Práctica dirigida

ALLISON PÉREZ ESQUIVEL
B75775

Comité asesor:

Director
Ing. Guillermo Vargas Elías, D. Sc.

Lectores
Ing. Matías Chaves Herrera, M. Sc.
Ing. Agr. Andrés Antonio Monge Vargas, D. Sc.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio San José, Costa Rica

2025

**Acta de la Presentación Oral del Trabajo Final de Graduación ante el Tribunal
Examinador para Optar por el Grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de
Biosistemas**

Modalidad: Práctica Dirigida

Lugar: Sala de Audiovisuales 2	Fecha: 04/08/2025	Hora: 09:00 am	Consecutivo: 15-2025
Artículo 1: Presentación de los miembros del Tribunal del Trabajo Final y de la estudiante. Se explica el procedimiento que consiste en la presentación oral de 45 min, el espacio para preguntas, la deliberación del Tribunal y la comunicación del acuerdo, según los artículos 26 y 27 del Reglamento de Trabajos Finales de Graduación.			
Tribunal Examinador			
MIEMBROS DEL TRIBUNAL		ROL	
D.Sc. Guillermo Vargas Elías		Director TFG	
M.Sc. Matías Chaves Herrera		Miembro del Comité Asesor	
D.Sc. Andrés Monge Vargas		Miembro del Comité Asesor	
Dra. Kattia Solís Ramírez		Lectora Invitada	
Ph.D. Alejandra Rojas González		Presidenta	
Artículo 2: Exposición oral del estudiante Se realiza presentación en un tiempo entre 30 a 45 min máximo.			
Nombre del Trabajo Final de Graduación: EVALUACIÓN DE LA COMPACTACIÓN DE LOS GRANOS DE TRIGO ALMACENADOS EN SILOS INDUSTRIALES			
NOMBRE DEL POSTULANTE		CARNÉ	
Allison Pérez Esquivel		B75775	
Artículo 3: Sesión de preguntas sobre aspectos propios del trabajo presentado. Cada uno de los miembros del Tribunal realizan preguntas a la persona sustentante.			

Artículo 4: Deliberación del Tribunal.

Sale de la sala de sesiones el sustentante para la deliberación del Tribunal. Se le avisará a la persona sustentante vía llamada telefónica o medio acordado.

Observaciones:

Realizar un análisis comparativo con las dos fechas del silo B2 para evaluar la correlación en cada punto de medición.

En el apartado de conclusiones especificar más con los valores obtenidos para el caso de estudio.

Producto de la deliberación se realiza la votación pública:

Votación pública obteniendo: 5 votos a favor y
0 votos en contra.

Voto disidente: Ninguno

Calificación del Trabajo Final de Graduación:	Aprobado	X	No aprobado	
Aprobación con distinción el Trabajo Final de Graduación:	Sí		No	X

Artículo 5: Comunicación del resultado de la deliberación a la persona sustentante

La persona que preside el Tribunal comunica a la persona postulante el resultado de la deliberación y se le declara acreedora al grado de **Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas**. Se le indica la obligación de presentarse al acto público de graduación, para ser juramentada y recibir el diploma correspondiente.

Se da por concluida la sesión y firma la persona que preside el Tribunal Examinador a las once horas y quince minutos.

 Ph.D. Alejandra Rojas González, persona que preside

Nota: De conformidad con los artículos 28, 29 y 36, el estudiante deberá entregar las copias con la versión final, incluyendo las modificaciones formuladas en ocasión de la presentación pública, un resumen de 200-500 palabras y la autorización de publicación del trabajo en el repositorio Kérwá. El director del trabajo final de graduación será responsable de que se realicen las correcciones propuestas en la presentación pública y de que la versión final del documento quede debidamente confeccionada.

Dedicatoria

A mi mamá María Elena por ser mi mayor inspiración, motivación, ejemplo de esfuerzo y superación, este trabajo y futuro título es suyo. A Jorshua Rubio por ser mi apoyo incondicional en este proceso. Por último y no menos importante, a mi gran y preciada amiga Hazel Quirós por apoyarme siempre, motivarme a lo largo de la carrera y celebrar mis logros como si fueran suyos.

Agradecimientos

Al profesor Guillermo Vargas Elías, quien me guío y apoyo en todo este proceso.

*A mis lectores Andrés Monge y Matías Chaves por su colaboración, a quienes también
extiendo mi agradecimiento.*

*A la Empresa Fábrica de Harinas de Centroamérica, quienes amablemente me abrieron sus
puertas para realizar mi trabajo final de graduación.*

*A José Arcadio Loría, quien me facilitó todos los materiales y colaboró en todo lo que
necesite para desarrollar los muestreos.*

*A mis compañeros Stephanie Peraza, Oscar Durán, Sebastián Villalobos y Ariel Solano,
quienes fueron excelente compañía y apoyo a lo largo de la carrera.*

Resumen

El presente trabajo final de graduación tuvo como objetivo principal determinar el nivel de compactación de los granos de trigo (*Triticum aestivum* L.) durante el almacenamiento en silos industriales, con el fin de estimar el volumen real disponible en los inventarios. La investigación respondió a la necesidad de mejorar la gestión del almacenamiento y la calidad del grano en contextos agroindustriales, específicamente en la Fábrica de Harinas de Centroamérica (FHACASA), empresa costarricense que importa trigo de Canadá y Estados Unidos. Se aplicaron metodologías experimentales basadas en la medición semanal del cambio de altura en cuatro puntos por silo, la determinación de la curva de equilibrio higroscópico en adsorción mediante soluciones salinas con actividad de agua controlada (a_w), y el análisis de propiedades físicas del grano como densidad real, densidad aparente, masa y humedad. El estudio se realizó en dos silos metálicos (B2 y B4), donde se evaluó la variación de altura y volumen mediante una ecuación exponencial decreciente que permitió calcular la tasa de compactación en distintos puntos. Los resultados evidenciaron una compactación progresiva durante los primeros 23 días de almacenamiento, seguida de una estabilización. La ecuación exponencial mostró un ajuste adecuado a los datos experimentales ($R^2 > 0,97$). Además, la ecuación de Caurie presentó el mejor ajuste para describir el equilibrio higroscópico. Este estudio constituyó un aporte técnico para el monitoreo de la compactación en silos industriales y ofreció herramientas útiles para la gestión de inventarios y la calidad del grano almacenado.

PALABRAS CLAVE

Compactación, trigo, silos industriales, ecuación exponencial, contenido de humedad.

Abstract

The present graduation thesis had as its main objective to determine the compaction level of wheat grains (*Triticum aestivum* L.) during storage in industrial silos, in order to estimate the actual available volume in inventories. The research addressed the need to improve storage management and grain quality in agro-industrial contexts, specifically at the *Fábrica de Harinas de Centroamérica* (FHACASA), a Costa Rican company that imports wheat from Canada and the United States. Experimental methodologies were applied based on the weekly measurement of height changes at four points per silo, the determination of the hygroscopic equilibrium curve in adsorption using saline solutions with controlled water activity (a_w), and the analysis of physical properties of the grain such as true density, bulk density, mass, and moisture content. The study was carried out in two metallic silos (B2 and B4), where the variation of height and volume was evaluated through a decreasing exponential equation that allowed the calculation of the compaction rate at different points. The results showed a progressive compaction during the first 23 days of storage, followed by stabilization. The exponential equation presented a good fit to the experimental data ($R^2 > 0.97$). Furthermore, the Caurie equation showed the best fit to describe the hygroscopic equilibrium. This study represented a technical contribution to the monitoring of compaction in industrial silos and provided useful tools for inventory management and the quality of stored grain.

KEYWORDS

Compaction, wheat, industrial silos, exponential equation, moisture content.

Índice General

1. Introducción	4
2. Objetivos	7
2.1 Objetivo General	7
2.2 Objetivos Específicos	7
3. Marco Teórico	8
3.1. Antecedentes	8
3.2. Marco conceptual	10
3.2.1. Generalidades	10
3.2.1. Almacenamiento	10
3.2.2. Propiedades Físicas	11
3.2.3. Compactación en granos	13
3.2.4. Control de Calidad	15
3.2.5. Equilibrio higroscópico	16
4. Metodología	21
4.1 Materiales y Métodos	21
4.1.1. Descripción general	21
4.1.2. Sitio de Estudio	22
4.1.3. Materia Prima	22
4.4.1. Objetivo 1: Evaluación del rango máximo de variación de la altura de los granos.	23
4.1.5. Objetivo 2: Elaborar la curva de equilibrio higroscópico.	24
4.1.6. Objetivo 3: Cuantificación de las propiedades físicas a nivel vertical	27
4.1.6.1. Muestreo por trasiego.	27
4.1.7. Análisis estadístico	32
5. Resultados y Discusión	33
5.1. Variación Máxima de la Altura de los Granos de Trigo	33
5.2. Equilibrio Higroscópico	56
5.3. Propiedades físicas	65
6. Conclusiones	73
7. Recomendaciones	74
8. Apéndices	75
9. Referencias Bibliográficas	88

Índice de Figuras

Figura 1.	Morfología de granos de trigo observados al estereoscopio.....	p.9
Figura 2.	Contenido de humedad en equilibrio para granos de arroz, maíz y trigo.....	p.14
Figura 3.	Isotermas de adsorción y desorción de la humedad.....	p.15
Figura 4.	Diseño experimental propuesto para el desarrollo de la investigación.....	p.17
Figura 5.	Ubicación de la Fábrica de Harinas de Centroamérica (FHACASA).....	p.18
Figura 6.	Granos de trigo utilizados como materia prima en la investigación.....	p.19
Figura 7.	Ambientes controlados de NaCl y KNO ₃ para equilibrio higroscópico.....	p. 21
Figura 8.	Sensor MX2301A para medir las propiedades psicométricas de los silos en estudio.....	p. 22
Figura 9.	Diagrama de muestreo por trasiego durante la investigación.....	p. 23
Figura 10.	Separador de granos marca Seedburo.....	p. 24
Figura 11.	Picnómetro para granos marca KIMAX.....	p. 25
Figura 12.	Densímetro OHAUS para la determinación de la densidad aparente.....	p. 26
Figura 13.	Balanza semianalítica utilizada para la medición de la masa.....	p. 26
Figura 14.	Equipo AQUALAB 4TE utilizado en la medición de actividad de agua.....	p. 27
Figura 15.	Configuración de los sensores dentro de los silos B2 y B4.....	28
Figura 16.	Ubicación de las calles colindantes a los silos B2 y B4.....	p. 29
Figura 17.	Ubicación de las calles colindantes a la ubicación de los silos B2 y B4.....	p. 30
Figura 18.	Configuración de los puntos de muestreo para los silos B2 y B4.....	p. 31
Figura 19.	Comparación de la compactación en diferentes puntos de muestreo del trigo en el silo B2 para dos repeticiones.....	p. 32

Figura 20. Compactación teórica en los cuatro puntos de muestreo del silo B4.....	p. 33
Figura 21. Ajuste de la ecuación exponencial al cambio en la altura del trigo almacenado en los puntos 1, 2, 3 y 4 del silo B2 durante 24 días en la primera repetición.....	p.35
Figura 22. Ajuste de la ecuación exponencial al cambio en la altura del trigo almacenado en los puntos 1, 2, 3 y 4 del silo B2 durante 24 días en la segunda repetición.....	p. 37
Figura 23. Ajuste de la ecuación exponencial al cambio en la altura del trigo almacenado en los puntos 1, 2, 3 y 4 del silo B4 durante 24.....	p. 39
Figura 24. Ajuste de la ecuación exponencial al cambio de volumen en función del tiempo para el trigo almacenado en el silo B2 durante 24 días en la primera repetición.....	p. 43
Figura 25. Ajuste de la ecuación exponencial al cambio de volumen en función del tiempo para el trigo almacenado en el silo B2 durante 24 días en la primera repetición.....	p. 45
Figura 26. Ajuste de la ecuación exponencial al cambio de volumen en función del tiempo para el trigo almacenado en el silo B4.....	p. 47
Figura 27. Variación de la humedad relativa (%) y temperatura (°C) externa en función del tiempo (minutos), registradas en las tolvas 2 y 3.....	p. 51
Figura 28. Variación de la temperatura (°C) y humedad relativa (%)externa en función del tiempo (minutos), registradas en los silos B2 y B4.....	p. 52
Figura 29. Evolución de la masa del grano en función del tiempo durante el proceso de adsorción, con tres repeticiones experimentales.....	p. 53
Figura 30 Isotherma de adsorción a 25 °C en granos de trigo por el método estático y ajustado con la ecuación de Caurie.....	p. 56

Índice de Tablas

Tabla 1. Descripción de las dimensiones de los silos utilizados en el presente estudio.....	p.16
Tabla 2. Temperatura, contenido de humedad y actividad de agua del trigo en equilibrio tras exposición a soluciones salinas en ambientes controlados.....	p.21
Tabla 3. Descripción de las dimensiones de los silos utilizados en el presente estudio.....	p.30
Tabla 4. Ajuste de la ecuación exponencial al cambio en la altura del trigo almacenado en los puntos 1, 2, 3 y 4 del silo B2 durante 24 días en la primera repetición.....	p.36
Tabla 5. Parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para el cambio de altura del trigo almacenado en el silo B2.....	p.38
Tabla 6. Parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para el cambio de altura del trigo almacenado en el silo B4.....	p.40
Tabla 7. Parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para la altura del trigo almacenado en diferentes puntos del silo B2 en la primera repetición.....	p.44
Tabla 8. Parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para la altura del trigo almacenado en diferentes puntos del silo B4.....	p. 48
Tabla 9. Propiedades psicométricas del aire ambiente en el sitio de estudio.....	p.50
Tabla 10. Parámetros del ajuste de la ecuación exponencial y calidad estadística del ajuste en cada punto de medición.....	p.55
Tabla 11. Promedio de las pruebas físicas para trigo de calidad suave.....	p.58
Tabla 12. Promedio de las pruebas físicas en Dickey John para trigo de calidad suave.....	p.58
Tabla 13. Promedio de las pruebas físicas para trigo de calidad media.....	p.60
Tabla 14. <i>Promedio de las pruebas físicas en Dickey John para trigo de calidad media.....</i>	p.61
Tabla 15. Promedio de las pruebas físicas para trigo de calidad dura.....	p.62
Tabla 16. <i>Promedio de las pruebas físicas en Dickey John para trigo de calidad dura.....</i>	p.63

1. Introducción

Según el Boletín Estadístico Agropecuario N° 34 de SEPSA (publicado en junio de 2024 con datos hasta el primer semestre de 2023), en el primer semestre de 2020 Costa Rica importó trigo por un valor de 39 914 mil USD, lo que representó un 3,1 % del total de insumos agropecuarios, y constituyó el 9,7 % de las importaciones agrícolas del periodo.

A nivel mundial el trigo es una fuente única de gluten, lo cual le otorga las características adecuadas para formar masas destinadas a la producción de panes, pastas, galletas, pasteles y diversos ingredientes alimentarios de alto consumo (Kibar, 2014).

Según la Cámara Costarricense de la Industria Alimentaria (2023), la importación de trigo en Costa Rica está concentrada principalmente en la Fábrica de Harinas de Centroamérica, S.A. (FHACASA) y Molinos de Costa Rica S.A., debido a que el país no produce este cereal a nivel comercial. Al arribar al territorio nacional, los granos secos y fríos provenientes del exterior se enfrentan a un clima tropical húmedo, caracterizado por humedades relativas superiores al 80 % (Instituto Meteorológico Nacional, 2022). Esta condición ambiental favorece procesos indeseados como la rehidratación, el aumento en la temperatura del grano y la aceleración de su tasa respiratoria, lo que compromete su estabilidad física y biológica. Dado que el consumo del trigo es continuo, mientras que su producción responde a ciclos estacionales, el almacenamiento prolongado en condiciones controladas se vuelve una necesidad estratégica. Para preservar su calidad durante estos periodos, es fundamental mantener un contenido de humedad cercano al 12 %, ya que niveles superiores pueden desencadenar deterioro físico, pérdidas de calidad panadera y riesgos de infestación por insectos y hongos (Keskin & Ozkaya, 2015). Durante el almacenamiento el grano experimenta un aumento de su densidad aparente causado por la compresibilidad sujeta al peso del material suprayacente, en donde las principales variables que afectan dicho fenómeno son el contenido de humedad, peso específico, geometría y dimensiones del silo (Boac et al., 2015). La temperatura, humedad relativa y concentración de oxígeno en el silo caracterizan de forma indirecta la pérdida de materia seca y la reducción del peso del grano almacenado (Menezes et al., 2023).

El conocimiento de las propiedades físicas del grano, la gestión adecuada de las instalaciones y el control eficaz de plagas son factores clave para minimizar las pérdidas de calidad durante el almacenamiento. En este proceso, las condiciones de conservación juegan un papel determinante en la calidad final del grano, junto con el genotipo y los factores asociados al manejo agronómico previo a la cosecha (Kibar, 2014). Diversas investigaciones han señalado que la interacción entre la temperatura y la humedad relativa del ambiente

constituye la principal causa del deterioro del grano, provocando incumplimientos con los estándares de calidad establecidos y afectando los productos obtenidos a partir del mismo (Trejo, 2020). En algunos países, se han reportado pérdidas de hasta un 50 % del inventario de granos durante el almacenamiento, lo cual evidencia la necesidad de garantizar condiciones óptimas y controladas que aseguren su conservación (Keskin & Ozkaya, 2015).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la compactación de los granos de trigo (*Triticum aestivum*) almacenados en silos industriales, fenómeno que puede comprometer el volumen útil del almacenamiento y las condiciones de aireación. La materia prima utilizada proviene de Canadá y Estados Unidos, y actualmente se encuentra almacenada en silos pertenecientes a la Fábrica de Harinas de Centroamérica (FHACASA), lo cual ofrece un escenario representativo para el análisis de las condiciones físicas del grano durante el almacenamiento prolongado.

La empresa en estudio es de origen latinoamericano y genera inversión, empleo y desarrollo en el país, esta pertenece a la Compañía Multi Inversiones (CMI) en donde se producen y comercializan más de 60 marcas de harinas de trigo y de maíz, así como premezclas industriales y familiares, mediante su línea Molinos Modernos. Dicha línea se enfoca en el desarrollo de la cadena de valor de trigo y cereales con más de 85 años de presencia en el mercado en países como Guatemala, El Salvador, Costa Rica, Nicaragua, México y República Dominicana. Su alcance es toda la industria panadera costarricense. Dicha compañía también es conocida por su aporte a iniciativas de seguridad alimentaria como Produce for Hunger y el Banco de Alimentos, beneficiando a comunidades y organizaciones sociales de San José, Desamparados, Puriscal, Goicoechea, Alajuelita, Tibás, Curridabat, Pérez Zeledón, Alajuela, San Ramón, Naranjo, Paraíso, Turrialba, San Rafael, Barva, Carrillo, Parrita, Limón, Pococí, Siquirres y Matina.

Para efectos de producción y comercialización, la empresa almacena los granos durante un periodo aproximado de dos meses. Posteriormente, en el transcurso del mes siguiente, se realizan descargas graduales con el fin de procesar la materia prima para la producción de harina de trigo destinada a fines industriales, utilizada principalmente en la elaboración de productos como panes, galletas y pastas. Cabe destacar que la logística de la empresa está condicionada por variables como la demanda del mercado, la disponibilidad de materia prima, la capacidad instalada de producción y la disponibilidad del recurso humano. Por lo tanto, el alcance del presente proyecto está sujeto a dichas condiciones operativas, las cuales podrían influir en el cumplimiento de los objetivos planteados.

Surge la necesidad de estudiar si existe compactación en los granos durante el tiempo de almacenamiento, ya que esto afectaría sus propiedades físicas y, por ende, la calidad del

producto terminado. Es importante determinar si el grado de compactación es significativo. Además, se identifica la necesidad de evaluar las propiedades físicas del grano y su interacción con el equilibrio higroscópico del material. La solución a estas necesidades ayudaría a tener una mayor certeza de la cantidad real de granos existentes en inventarios en un momento específico durante el período de almacenamiento, la condición en la que se encuentran y las recomendaciones de almacenamiento producto de los resultados de la investigación.

Este proyecto contempla el análisis de los factores que inciden en la determinación del grado de compactación de los granos almacenados, considerando tanto las condiciones psicrométricas del entorno como las características físicas internas del grano. Asimismo, se propone el desarrollo de una herramienta predictiva que permita estimar el nivel de compactación en función del tiempo de almacenamiento, brindando un valor agregado para la toma de decisiones técnicas en la gestión de inventarios. En este contexto, se reconoce la necesidad y relevancia de este estudio, dado que en Costa Rica existe escasa o nula documentación técnica sobre el comportamiento del trigo durante su almacenamiento en silos industriales. Este trabajo busca sentar las bases para futuras investigaciones en el ámbito del almacenamiento de granos, aportando conocimientos aplicables a la agroindustria nacional y fortaleciendo las capacidades para una mejor planificación y conservación de materias primas esenciales.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Determinar el nivel de compactación de los granos de trigo durante el almacenamiento en silo industrial para la estimación del volumen existente en los inventarios.

2.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar el rango máximo de variación de la altura de los granos durante el almacenamiento para la determinación de la tasa de compactación.
2. Elaborar la curva de equilibrio higroscópico para la predicción de la adsorción de humedad del trigo durante el almacenamiento mediante el contacto de los granos con aire a alta humedad relativa.
3. Cuantificar las propiedades físicas a nivel vertical del grano almacenado para el aseguramiento de la calidad mediante el muestreo por trasiego.

3. Marco Teórico

3.1. Antecedentes

La compactación de materiales granulares en silos es un fenómeno de gran relevancia en el contexto del almacenamiento industrial, ya que influye directamente en la distribución de cargas, el aprovechamiento del volumen y la eficiencia de descarga. Diferentes investigaciones han abordado este tema desde diversas perspectivas experimentales y teóricas, considerando variables como la vibración, la humedad, la forma y tamaño de las partículas, y las condiciones estructurales del silo. A continuación, se resumen algunos de los estudios más representativos que han contribuido a comprender el comportamiento de los granos en condiciones de almacenamiento y vibración.

El estudio realizado por Hao et al. (1994) en Canadá se centró en analizar el efecto de la vibración sobre la distribución de cargas en un silo de acero corrugado de 1,5 m de alto y 1 m de diámetro, lleno con trigo con un contenido de humedad del 12%. Luego de someterlo a vibración durante 20 minutos, se observó un aumento del 39 % en la presión lateral en la parte inferior del silo y un incremento del 22 % en la fuerza vertical resultante. Estos hallazgos evidencian el impacto directo de la vibración en la redistribución de las cargas internas del silo.

En Serbia, Zivković et al. (2013) desarrollaron un enfoque teórico para estudiar la compactación dinámica por vibración en materiales granulares, basándose en una ecuación exponencial cinético fraccional. Permitió predecir la tendencia de compactación en contextos donde los granos están en constante movimiento o sometidos a vibraciones, como en el transporte, almacenamiento o procesamiento industrial. La herramienta desarrollada facilita la simulación del reacomodo de los granos en función del tiempo.

De forma complementaria, Suaza-Montalvo et al. (2023) analizaron el comportamiento de cuatro materiales granulares industriales (harina de trigo, sericita, celulosa microcristalina y microesferas de vidrio) sometidos a vibración vertical. Los resultados indicaron que las partículas tienden a reacomodarse, incrementando su densidad aparente. Este proceso de compactación, lejos de ser lineal, puede modelarse mediante funciones exponenciales, y se ve influenciado por las características físicas del material, como la forma y el tamaño de las partículas.

En cuanto al efecto de la compactación en condiciones de almacenamiento, Guan y Zhang (2009) llevaron a cabo una investigación utilizando harina de trigo almacenada en una tolva de 475 mm de altura y 600 por 375 mm de sección transversal. Se emplearon dos niveles de humedad (8,6 % y 14,2 %) y diferentes presiones de compactación. Se observó que los ángulos de fricción interna permanecieron constantes para ambas condiciones, y aunque la resistencia del material aumentó proporcionalmente con la presión aplicada, la compactación tuvo una incidencia limitada una vez alcanzado un punto de equilibrio.

Por su parte, Chen et al. (2019) en China, utilizaron un sistema automatizado para pruebas geotécnicas (Geocomp Shear Trac-II) con el fin de evaluar la resistencia al esfuerzo de partículas de vidrio, polvo de maíz y antracita durante la descarga en un silo de 500 mm de altura y 390 mm de diámetro. Se concluyó que a mayor contenido de humedad, la presión horizontal aumentó, y se destacó el potencial de este tipo de ensayos para apoyar el diseño y mantenimiento de silos industriales, particularmente en lo relacionado con la compactación y la distribución de cargas internas.

Jakšić et al. (2012), también en Serbia, investigaron la compactación dinámica de arroz basmati (grano largo) y arroz redondo (grano corto) bajo condiciones de vibración. Se evidenció un aumento progresivo en la densidad de ambos materiales, indicando un proceso gradual de compactación que puede ser descrito mediante la ley de Mittag-Leffler. El estudio propone una ecuación fraccional de compactación que considera la relación entre tiempo y relajación del material, sugiriendo su aplicación como herramienta predictiva en otros tipos de granos.

Finalmente, Pascot et al., (2021) en Francia, analizaron el flujo de partículas de vidrio esféricas en un silo de 300 mm de altura y 100 mm de diámetro bajo vibraciones mecánicas. Utilizaron el método de elementos discretos (DEM) para describir el comportamiento dinámico de las partículas durante la descarga. Los resultados mostraron un aumento de densidad en zonas cercanas a la base y las paredes del silo, fenómeno atribuido a una compactación intermitente generada por las vibraciones.

3.2. Marco conceptual

3.2.1. Generalidades

El trigo continúa siendo uno de los cultivos más relevantes a nivel mundial tanto por su valor nutricional como por su peso económico en los mercados internacionales. Según proyecciones del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 2023), la producción mundial de trigo alcanzará los 45 millones de toneladas en 2023, con Argentina, Canadá, China, la Unión Europea e India como los principales países productores. A pesar de este volumen, el consumo global estimado asciende a 791,7 millones de toneladas, lo cual evidencia una fuerte demanda. Sin embargo, debido al incremento en la producción de otros cereales forrajeros, se espera una reducción en la competitividad del trigo en el mercado internacional, proyectándose un comercio global de 209,7 millones de toneladas.

Más allá de su relevancia económica, el trigo, al ser un material granular de origen orgánico, presenta particularidades físicas que lo distinguen de los materiales minerales. Una de las más importantes es su susceptibilidad a absorber humedad del ambiente, lo que puede provocar cambios significativos en sus propiedades físicas y afectar su comportamiento durante el almacenamiento. Este fenómeno debe considerarse cuidadosamente al momento de desarrollar ecuaciones predictivas, metodologías experimentales y aplicaciones tecnológicas relacionadas con su manipulación, como lo señalan Horabik y Molenda (2015).

3.2.1. Almacenamiento

Los cereales constituyen una fuente fundamental para satisfacer los requerimientos calóricos de la población humana y animal. Sin embargo, su deterioro está estrechamente vinculado a las condiciones de almacenamiento, las cuales deben ser óptimas y eficaces para garantizar su conservación y pleno aprovechamiento (Nagnath et al., 2020).

En la industria agroalimentaria, los granos son comúnmente almacenados en silos, los cuales pueden presentar geometría cilíndrica o cónica y se clasifican, según el tipo de descarga, en silos de flujo másico o de flujo en embudo (Oldal & Safranyik, 2015). Durante el almacenamiento, es indispensable mantener condiciones estables de temperatura y humedad, ya que estas influyen directamente en la inactivación de procesos microbianos y metabólicos, lo cual permite extender la vida útil del grano y preservar sus propiedades organolépticas (Trejo, 2020).

En este sentido, el control adecuado de la temperatura, el contenido de humedad y la presencia de plagas es esencial para garantizar la calidad del trigo almacenado. Además,

previo al ingreso del grano al silo, deben realizarse labores básicas de limpieza y mantenimiento de la infraestructura, con el fin de reducir los riesgos de contaminación o deterioro. La implementación de estas medidas antes y durante el almacenamiento contribuye a ralentizar los procesos de respiración y de intercambio gaseoso del grano, prolongando su conservación (Trejo, 2020).

Asimismo, diversos factores físicos influyen directamente en la calidad del grano durante el almacenamiento, tales como la geometría del silo, la fuerza normal de contacto entre partículas, las fuerzas internas entre los granos y el esfuerzo transmitido por las paredes del silo (Feng et al., 2022). Por otra parte, la ventilación natural que ingresa por el techo, puertas o ventanas del silo también tiene un impacto considerable en la temperatura y humedad relativa del ambiente interno, especialmente en periodos de almacenamiento prolongado, pudiendo afectar negativamente la calidad del grano (Kibar, 2014).

Desde el punto de vista operativo, el tamaño del silo también condiciona el diseño del sistema de recuperación. En silos de gran escala, se construye un túnel en la parte inferior que alberga un transportador de recuperación de alta velocidad; en cambio, en silos pequeños, dicho transportador se ubica en la cámara de distribución, justo debajo del suelo y sin necesidad de túnel (Rosentrater, 2022).

Finalmente, para lograr un almacenamiento eficiente, es crucial prevenir la pérdida excesiva de humedad y regular el intercambio de ésta entre el grano y el ambiente. El trigo, como otros materiales granulares, tiende a absorber o liberar humedad dependiendo de las condiciones ambientales, lo que puede alterar sus propiedades físicas a lo largo del tiempo (Kibar, 2014).

3.2.2. Propiedades Físicas

Las dimensiones de los granos de trigo (Figura 1) corresponden aproximadamente a 0,05 m, 0,035 m y 0,03 m, de largo, ancho y alto, respectivamente (Zhao et al., 2022). Su densidad aparente debe estar en un rango de 801-684 kg/m³, y la real 1.339-1.170 kg/m³ (Ordóñez et al., 2012). El contenido de humedad óptimo de los granos secos durante la recepción debe ser de 10,5 a 12,5 % y en almacenamiento alrededor de 14,5 %, ambos a 25 °C (Trejo, 2020).

Figura 1.

Morfología de granos de trigo observados al estereoscopio (aumento 10×).



Se ha determinado que, para un periodo de 180 días de almacenamiento, la composición del grano de trigo relacionada con su calidad posee mayor estabilidad durante condiciones de baja temperatura (15 °C y 20 °C) en comparación con almacenarlo a 30 °C. Las bajas temperaturas, desaceleran las reacciones químicas dentro del grano (cambios comunes en las vías metabólicas de carbohidratos, ácidos grasos, nucleótidos y aminoácidos), se evita la pérdida de nutrientes y el daño estructural, se retrasa la oxidación y se mantiene la estabilidad de su estructura (Zhao et al., 2024).

El trasiego de trigo hacia un clima tropical húmedo puede exponer al grano a efectos como la adsorción y desorción de agua, estos son un medio adecuado para interpretar la tendencia del agua dentro del grano, mediante las interacciones de sus componentes, se brinda información sobre la vida útil y el nivel crítico de la humedad en el grano, así como la correcta selección de material de embalaje que se debe utilizar (Escobar et al, 2020).

Los modelos empleados para la hidratación de productos agrícolas emplean ecuaciones de balance para describir la tendencia del proceso a partir de las leyes basadas en principios de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento, y las relaciones entre variables de interés (Pramiu et al., 2019).

Se planteó un modelo de hidratación para granos de frijol, el cual describe la forma en la que ocurre absorción de agua mediante curvas que representan la cinética de dicho parámetro, determinando que sucede en un periodo comprendido entre 540 a 600 minutos a una temperatura de hidratación de 30-40 °C; el valor del contenido de humedad de equilibrio en masa seca se mantuvo entre 1.25 y 1.30, aumentando entre 54 y 58 % en el área superficial del grano y entre 90 y 99 % de su volumen en comparación con sus condiciones iniciales (Pramiu et al., 2019).

Por otra parte, las propiedades mecánicas como, presión dinámica de descarga en silos, asimetría de descarga y el impacto en la estructura de los granos, se han estudiado mediante la implementación de métodos de elementos discretos y métodos analíticos, para evaluar el impacto del aumento incontrolado del contenido de humedad del grano en las distintas presiones del silo (Horabik & Molenda, 2014)

En este contexto, parámetros como el peso hectolitro, el porcentaje de proteína cruda y el contenido de humedad del grano adquieren especial relevancia, ya que su variación durante el almacenamiento incide directamente en la calidad tecnológica del trigo. El peso hectolitro, ampliamente utilizado en el comercio internacional y en la industria molinera por su correlación con el rendimiento harinero, junto con el contenido de proteína, está influenciado por factores como las condiciones ambientales y la variedad del grano, los cuales resultan difíciles de controlar (Olán, 2012). Diversos estudios han demostrado que, tras cinco meses de almacenamiento, estos parámetros tienden a disminuir (Kibar, 2014). Asimismo, la interacción entre humedad, temperatura y densidad aparente favorece la aparición de insectos, que tienden a concentrarse en el centro del silo (Athanassiou & Buchelos, 2020). El aumento simultáneo de temperatura y contenido de humedad incrementa la tasa de respiración (CO_2), lo cual puede servir como un indicador del deterioro del grano y del riesgo de infestaciones (Raudienė et al., 2017).

3.2.3. Compactación en granos

Además de los factores ambientales, las propiedades físicas del grano también desempeñan un papel determinante en su comportamiento durante el almacenamiento. Características como el tamaño de partícula y la porosidad inciden directamente en la localización de zonas compactadas dentro del silo. En este contexto, se ha observado que los granos finos requieren mayores tensiones para iniciar la compactación inelástica en comparación con los de mayor tamaño. Asimismo, porosidades inferiores al 30 % resultan especialmente susceptibles a este fenómeno (Rice-Birchall et al., 2022).

Para evaluar esta dinámica, se han desarrollado modelos matemáticos que permiten estimar la densidad de la materia seca almacenada, mediante el cálculo del coeficiente de susceptibilidad a la compactación. Dicho coeficiente se determina a partir de la relación entre el trabajo específico aplicado y el aumento en la densidad, considerando variables como la presión, el número de capas, el tiempo de compactación, el tamaño de partícula y el contenido de materia seca (Lisowski et al., 2020).

Algunos estudios han analizado estas relaciones en otros tipos de granos. En el caso del café, por ejemplo, se ha utilizado la expansión volumétrica como indicador de los cambios en volumen asociados al incremento de masa. Se ha observado que, a medida que aumenta la masa, la expansión volumétrica disminuye. Paralelamente, se ha reportado que una mayor densidad aparente se asocia con una menor capacidad de expansión en granos tostados (Abarca, 2017).

De forma complementaria, los modelos de predicción para la expansión volumétrica han sido aplicados en frijol Matambú (*Phaseolus vulgaris*), demostrando que pueden adaptarse para describir la expansión másica de otros granos, considerando parámetros como la concentración de agua, el volumen y el área superficial (Valerio et al., 2020). En el caso de los granos de café tostados, se encontró que su expansión aparente aumenta cuando se reduce la temperatura. Si los granos se exponen a temperaturas más bajas, requieren un mayor tiempo de calentamiento para alcanzar la máxima pérdida de masa. Cuando la expansión aparente supera el 20 %, se produce un aumento lineal de la pérdida de masa, con una tasa de expansión del 4,5 % (Vargas-Elías, 2014).

Por otra parte, los estudios sobre contracción volumétrica han permitido optimizar procesos de secado. En granos de soya, por ejemplo, se reportó una reducción en el volumen inicial del 9,23 %, 11,83 % y 11,94 % a temperaturas de 40, 50 y 60 °C, respectivamente, lo que facilita la predicción del volumen final ocupado por la masa de grano (Viana et al., 2017). En el caso del café, se encontró que la pérdida de masa durante el secado está directamente relacionada con la contracción volumétrica aparente, siendo de un 49 % para café natural y 9,8 % para café lavado (Barrantes, 2022).

Además, diversos estudios han abordado el impacto de la vibración en el comportamiento de los granos almacenados. Hao, Zhang y Britton (1994) señalaron que la aplicación de vibraciones provoca incrementos significativos en la presión lateral estática en la parte inferior del silo, lo que sugiere que este fenómeno puede inducir la compactación de los granos al modificar las cargas internas sobre la estructura. En esta misma línea, Suaza-Montalvo et al. (2023) encontraron que la vibración genera un aumento en la densidad aparente de las partículas, induciendo un proceso de compactación con una tendencia

exponencial a lo largo del tiempo. Por su parte, Rondet et al. (2017) indicaron que la densificación progresiva de un medio granular sometido a vibraciones verticales permite el reordenamiento interno de las partículas, lo que conduce directamente a la compactación del material.

3.2.4. Control de Calidad

La calidad del grano es un factor clave en los procesos de almacenamiento y comercialización. Según Rosentrater (2022), este aspecto no solo sirve como base para establecer acuerdos de precio entre comprador y vendedor, sino que también permite anticipar posibles pérdidas de materia prima durante el almacenamiento.

Diversos factores pueden afectar negativamente la calidad del grano, entre ellos, condiciones climáticas adversas como lluvias durante la maduración, sequías, la presencia de hongos o el rebrote del grano. Estas condiciones pueden reducir significativamente el peso hectolítrico, impidiendo que el grano cumpla con los estándares exigidos para su comercialización (Olán et al., 2012). Además, los granos almacenados deben mantener características esenciales como pureza genética, sanidad y propiedades físicas adecuadas, entre las que destacan el peso hectolítrico, el peso de mil granos, el tamaño, la forma y la dureza (Olán, 2012).

A nivel técnico, Guiné (2016) identifica otros estándares de calidad relevantes para el almacenamiento: contenido y dispersión de humedad, temperatura interna, estado bioquímico del grano, así como parámetros de calidad alimentaria y tecnológica. Estas variables son esenciales para garantizar la conservación de las propiedades funcionales y nutricionales del trigo y otros cereales.

Dentro de los indicadores más sensibles al deterioro por almacenamiento se encuentra la proteína cruda, especialmente en granos de trigo. Este parámetro se ve afectado con rapidez bajo condiciones desfavorables, como aquellas propias de silos con ventilación natural. En estos casos, se han observado diferentes tasas de degradación en variables clave como la proteína cruda, el peso hectolítrico, el peso de mil granos, la sedimentación, y los niveles de gluten húmedo y seco (Kibar, 2014).

En este contexto, se han implementado herramientas analíticas avanzadas para predecir la pérdida de calidad durante el almacenamiento. Menezes et al., (2023) demostraron que modelos basados en redes neuronales artificiales y regresión lineal múltiple ofrecen alta precisión para predecir el deterioro del trigo almacenado en silos verticales. La combinación

de variables como temperatura, humedad relativa y concentración de dióxido de carbono permitió caracterizar de forma indirecta las pérdidas de materia seca y la disminución del peso del grano, logrando resultados satisfactorios mediante un monitoreo temporal de 20 horas.

De manera similar, Zeymer et al., (2021) evaluaron cinco modelos predictivos para estimar la pérdida de masa seca en granos de soya, utilizando datos provenientes de sistemas dinámicos de respiración bajo distintos niveles de humedad (12 %, 14 %, 18 % y 22 % b.h.) y temperaturas (25 °C, 30 °C y 35 °C). Los resultados confirmaron la efectividad de estos modelos para la gestión del riesgo de calidad durante el almacenamiento.

Finalmente, Quemada-Villagómez et al., (2020) destacaron la utilidad de los modelos matemáticos de cambio másico para predecir gradientes térmicos y evaluar los efectos de las fluctuaciones ambientales sobre los patrones de flujo de aire, las isotermas internas y la distribución de la humedad en el grano. Se concluyó que los cambios ambientales tienen una influencia significativa sobre la temperatura interna y el contenido de humedad del grano almacenado, lo cual refuerza la importancia del monitoreo y modelado de estos parámetros para preservar su calidad.

3.2.5. Equilibrio higroscópico

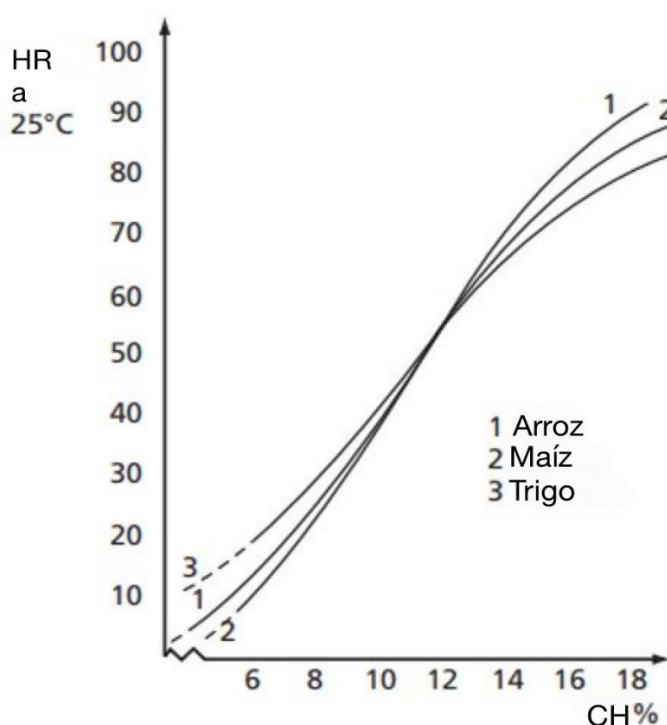
La estabilización de la masa en los granos de trigo frente a las condiciones del ambiente circundante se conoce como equilibrio higroscópico, el cual se alcanza cuando la presión de vapor interna del grano se iguala con la presión de vapor del aire circundante. En este punto de equilibrio, ya no se produce una transferencia neta de humedad entre el grano y el ambiente, y se considera que el grano ha alcanzado su contenido de humedad de equilibrio para esa condición específica (Chen, 2005).

Uno de los métodos más aceptados para estudiar este fenómeno es el uso de soluciones saturadas de sales, ya que permiten generar condiciones constantes y controladas de actividad de agua. Este enfoque es valorado por su sencillez y capacidad de reproducibilidad en estudios experimentales sobre comportamiento higroscópico (Labuza, 1984). Asegurar la correcta estabilización de las muestras es fundamental para garantizar que los datos utilizados en la construcción de las curvas de adsorción correspondan realmente a condiciones de equilibrio, y no a etapas transitorias del proceso, lo cual resulta clave para la validez y precisión de la ecuación ajustada.

Cada tipo de grano presenta un equilibrio propio y característico entre la humedad interna que contiene y el vapor de agua del aire con el que entra en contacto. Este equilibrio, conocido como humedad de equilibrio, ocurre cuando se establece un balance entre la cantidad de agua que migra del grano al aire o viceversa, dependiendo de las condiciones ambientales (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1994). De acuerdo con la FAO (1994), cada grano alimenticio presenta una curva de equilibrio característica, que puede construirse graficando el contenido de humedad de la muestra en función de la humedad relativa y la temperatura del aire. Estas curvas se utilizan como guías de referencia, aunque pueden variar según el tipo, la variedad del grano y las condiciones experimentales específicas (ver Figura 2).

Figura 2

Contenido de humedad en equilibrio para granos de arroz, maíz y trigo (HR: Humedad Relativa y CH: Contenido de Humedad)



Nota. Adaptado de *Grain storage techniques: Evolution and trends in developing countries*, por Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1994, FAO.

Según Bougayr et al., (2017) las isotermas de sorción tienden a reflejar la higroscopicidad de los productos, la cual es determinada por las relaciones físicas y fisicoquímicas entre el agua y los demás componentes que integran el producto. Este tipo de

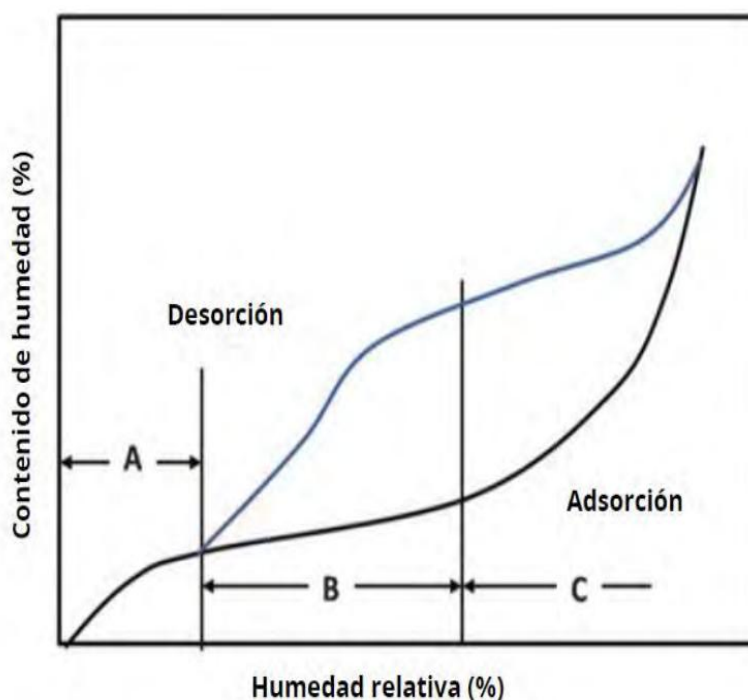
isotermas describen que para una humedad relativa constante, el contenido de humedad de desorción fue mayor que el de adsorción.

En productos como el café, el comportamiento higroscópico varía significativamente según el estado de procesamiento del grano. De acuerdo con Correa et al. (2012), si se mantiene constante la actividad de agua, el contenido de humedad de equilibrio aumenta al disminuir la temperatura. Por el contrario, si la temperatura permanece constante, el contenido de humedad de equilibrio aumenta conforme se incrementa la actividad de agua. Estas relaciones confirman la sensibilidad del producto a las condiciones ambientales durante su almacenamiento y manipulación.

Para describir este comportamiento, se utilizan las isotermas de sorción, las cuales muestran una forma sigmoidea típica en productos alimenticios higroscópicos. Estas curvas se dividen en tres regiones principales que reflejan el estado del agua presente en el alimento (ver Figura 3). La primera región corresponde a la adsorción de una capa monomolecular de agua, fuertemente ligada a los sitios activos del material. La segunda región representa la adsorción de capas adicionales de agua menos fuertemente ligadas, mientras que la tercera región describe la condensación de agua en los poros y capilares del material. No existen valores precisos de humedad relativa que delimiten estas regiones de manera estricta; sin embargo, es posible identificarlas a partir de la tendencia general de la curva (deMan et al., 2018).

Figura 3

Isotermas de adsorción y desorción de la humedad



Nota. Adaptado de *Principles of food chemistry*, por J. M. deMan, J. W. Finley, W. J. Hurst, & C. Y. Lee, 2018, Springer.

En la literatura científica se han propuesto diversos modelos matemáticos para describir el comportamiento higroscópico de los productos agrícolas, a través del ajuste de curvas de equilibrio. Estas ecuaciones permiten predecir el contenido de humedad de equilibrio en función de la actividad de agua y, en algunos casos, de variables termodinámicas como la temperatura. Su uso es esencial para entender los mecanismos de adsorción y desorción de agua en materiales higroscópicos durante el almacenamiento.

En el presente estudio se seleccionaron y evaluaron siete ecuaciones matemáticas, tanto empíricas como semiempíricas, que han sido ampliamente aplicadas en productos alimentarios y granos almacenados, entre ellas: Oswin, Smith, Chung–Pfoest, Caurie, Iglesias y Chirife, White–Eyring y Huhn. La selección se basó en su frecuencia de uso en la literatura científica y en su reconocida capacidad para ajustarse a diversas condiciones de temperatura y humedad relativa de equilibrio.

En la Tabla 1 se presentan las ecuaciones utilizadas, acompañadas de sus referencias bibliográficas. Posteriormente, fueron ajustadas a los datos experimentales obtenidos en el

laboratorio, con el objetivo de evaluar su precisión predictiva y su grado de adecuación a la tendencia del equilibrio higroscópico de los granos de trigo almacenados en silos industriales.

Tabla 1

Ecuaciones matemáticas utilizados para el ajuste del equilibrio higroscópico en trigo almacenado en silos industriales

Nombre	Ecuación	Referencia
Oswin	$y = b_1 * \left(\frac{x}{1-x}\right)^{b_2}$	Oswin (1946)
Smith	$y = b_1 + b_2 * \ln(1-x)$	Smith (1947)
Chung-Pfost	$y = b_1 + b_2 * \ln(-\ln \ln(x))$	Chung & Pfost (1967)
Caurie	$y = \exp(b_1 + b_2 * x)$	Caurie (1970)
Iglesias	$y = b_1 + b_2 * \left(\frac{x}{1-x}\right)$	Iglesias (1982)
White-Eyring	$y = \frac{1}{b_1 + b_2 * x}$	White & Eyring (1941)
Huhn	$y = \frac{b_1}{\ln(x)} + b_2$	Huhn et al. (1996)

Nota: y: actividad de agua (adim), x: Porcentaje de contenido de humedad en base seca y b_1 y b_2 son constantes.

4. Metodología

4.1 Materiales y Métodos

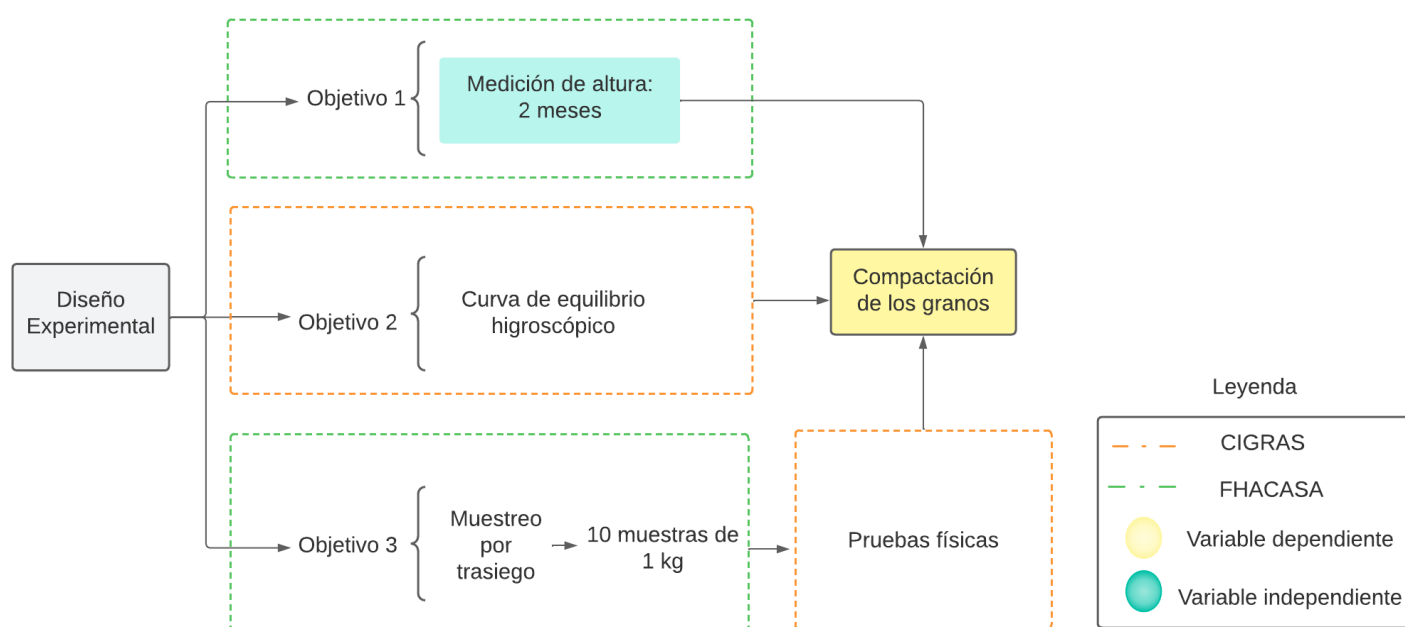
4.1.1. Descripción General

Para la determinación de la compactación de los granos de trigo, se llevó a cabo un estudio basado en el análisis de sus propiedades físicas y de las variables que interactúan durante el periodo de almacenamiento en el silo industrial. Esta metodología permitió evaluar los cambios estructurales del grano a lo largo del tiempo, considerando factores como la densidad aparente, el contenido de humedad y la altura de la masa almacenada, los cuales influyen directamente en el proceso de compactación.

El diseño experimental propuesto para la presente investigación se detalla en la Figura 4.

Figura 4

Diseño experimental propuesto para el desarrollo de la investigación



4.1.2. Sitio de Estudio

El estudio se desarrolló en el Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) ubicado en $9^{\circ}56'23.249''\text{N}$ $84^{\circ}2'54.608''\text{W}$, perteneciente a la Facultad de Ciencias Agroalimentarias de la Universidad de Costa Rica y en la empresa Fábrica de Harinas de Centroamérica (FHACASA), ubicada en Barranca, Puntarenas, Costa Rica ($9^{\circ}59'23''\text{N}$ y $84^{\circ}43'22''\text{W}$). El proyecto se inició desde agosto del 2023 hasta mayo del 2025.

Figura 5

Ubicación de la Fábrica de Harinas de Centroamérica (FHACASA). (Google Earth, 2025)



Se realizó en conjunto con el proyecto de la Vicerrectoría de Investigación C1246 *Control de Inventario y Calidad de Granos Almacenados en Silos*, utilizando únicamente la materia prima del proyecto para realizar la presente investigación.

4.1.3. Materia Prima

Se utilizó trigo (*Triticum aestivum*) como materia prima facilitada por la empresa FHACASA (ver Figura 6). Los granos utilizados estaban enteros, sanos y sin defectos. Los granos se encontraban almacenados en silos cilíndricos y metálicos, los cuales almacenaron únicamente trigo en grano. La empresa maneja tres variedades distintas de trigo (suave, media y dura), las cuales provienen de Canadá y Estados Unidos y se almacenan según la disponibilidad de los silos en la empresa.

Figura 6

Granos de trigo utilizados como materia prima en la investigación



4.4.1. Objetivo 1: Evaluación del Rango Máximo de Variación de la Altura de los Granos.

Se midió el cambio en la altura del contenido en dos silos de estudio ubicados en la empresa FHACASA, se niveló previamente los granos y se conocía su geometría. Se colocó una marca inicial en el interior del silo y se registró el cambio volumétrico medido en tres puntos de la superficie del silo semanalmente, en un periodo de 24 días. Sabiendo que la geometría del silo es cilíndrica, se estimó el volumen de los granos almacenados con la ecuación (1):

$$V = \pi(r)^2h \quad [1]$$

Donde:

r : Diámetro del silo (m).

h : Altura de los granos de trigo desde la base del silo (m).

Para calcular la altura de los granos de trigo se utilizó la siguiente ecuación exponencial decreciente:

$$h = h_e + (h_i - h_e)e^{-kt} \quad [2]$$

Donde:

h : Altura de los granos de trigo desde la base del silo (m).

h_i : Altura inicial de los granos de trigo (m).

h_e : Altura de estabilización de los granos de trigo (m).

t : Tiempo de almacenamiento (día).

k : Rapidez de compactación (día^{-1}).

Para calcular el índice de compactación teórico, se propone utilizó la ecuación (3):

$$C = \left(\frac{h_i - h_e}{h_i}\right)(100) \quad [3]$$

Donde:

C : Índice de compactación de los granos de trigo (%).

h_i : Altura inicial de los granos de trigo (m).

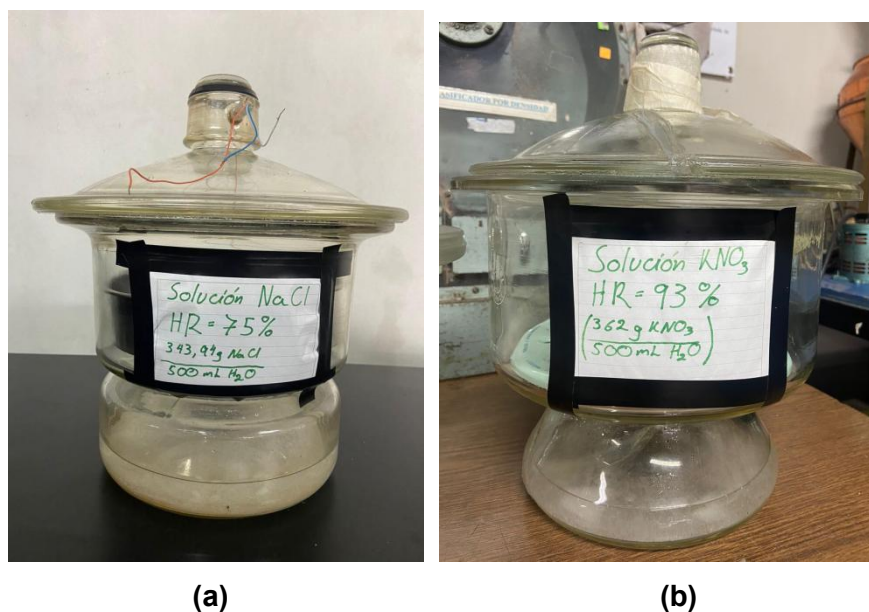
h_e : Altura de equilibrio de los granos de trigo (m).

4.1.5. Objetivo 2: Elaborar la Curva de Equilibrio Higroscópico.

Durante el desarrollo experimental, las muestras de trigo fueron expuestas a ambientes con humedad relativa controlada, generados mediante soluciones saturadas de nitrato de potasio (KNO_3) y cloruro de sodio (NaCl) (Figura 7). Estas soluciones permiten establecer valores constantes de actividad de agua (a_w), lo cual es fundamental para determinar la tendencia higroscópica del grano en condiciones específicas. Se colocaron tres muestras de 7 g de trigo hasta que alcanzaron el equilibrio higroscópico con la humedad relativa del aire. El peso de las muestras se registró de forma periódica con una balanza digital marca Optika (Figura A.6), se establecieron cinco puntos de control para el análisis del proceso de adsorción de humedad.

Figura 7

Ambientes controlados de NaCl (a) y de KNO₃ (b) para equilibrio higroscópico



En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos a partir de la exposición de granos de trigo a diferentes niveles de actividad de agua, generados mediante soluciones salinas saturadas en condiciones de temperatura controlada. La solución saturada de NaCl se utilizó para generar una actividad de agua de 0,75, mientras que el nitrato de potasio (KNO₃) con una humedad relativa del 93% se empleó para establecer dos condiciones: 0,81 y 0,88. La condición de 0,66 no requirió exposición a ninguna solución, ya que fue utilizada únicamente como punto de medición inicial.

Tabla 2

Temperatura, contenido de humedad y actividad de agua del trigo en equilibrio tras exposición a soluciones salinas en ambientes controlados

Punto	Temperatura (°C)	Contenido de Humedad (% b.h.)	Actividad de agua (adim.)
1	25,00 ± 0,02	18,23 ± 0,25	0,8778 ± 0,0034
2	24,87 ± 0,47	16,69 ± 0,23	0,8117 ± 0,0013
3	25,15 ± 0,08	14,22 ± 0,09	0,7563 ± 0,0015
4	25,02 ± 0,08	12,11 ± 0,14	0,6591 ± 0,0042

En particular, las muestras sometidas a una actividad de 0,81 mediante KNO_3 permanecieron en este ambiente por cuatro días, tras lo cual fueron retiradas y expuestas a un proceso de secado pasivo mediante ventilación forzada y almacenamiento en un desecador con zeolita. Durante todo el experimento, la temperatura ambiente se mantuvo estable, con un promedio de $25\text{ }^\circ\text{C} \pm 0,17$.

Para monitorear la temperatura y la humedad relativa en los silos, se utilizó un sensor modelo MX2301A (Figura 8)

Figura 8

Sensor MX2301A para medir las propiedades psicométricas de los silos en estudio



Para el contenido de humedad inicial, se pesó la muestra y se colocó en un horno de convección a una temperatura de $130 \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$, durante $120 \pm 5\text{ min}$ y con la finalidad de medir la masa posterior al secado. Se calculó el contenido de humedad con la ecuación (4):

$$\text{CH} = \left(1 - \frac{M_1}{M_0}\right)(100) \quad [4]$$

Donde:

CH: Contenido de humedad (% b.h.)

M_0 : Masa del grano antes del proceso de secado (g).

M_1 : Masa del grano posterior al proceso secado (g).

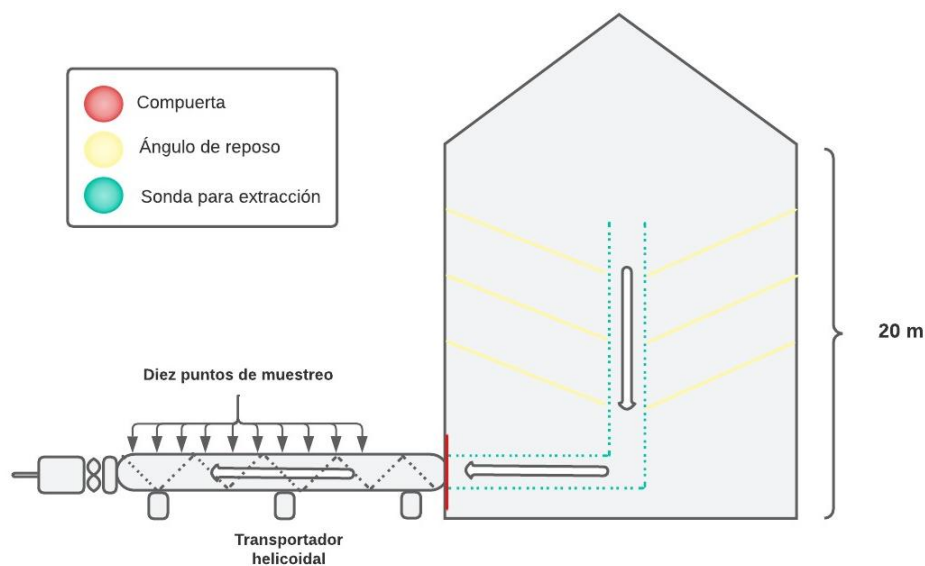
4.1.6. Objetivo 3: Cuantificación de las Propiedades Físicas a Nivel Vertical.

4.1.6.1. Muestreo por Trasiego.

Se extrajo una columna de granos en un punto de muestreo central de cinco silos de estudio ubicados en la empresa FHACASA, por medio de una compuerta de descarga en la base operada por un transportador helicoidal. Durante el procedimiento se tomaron 10 puntos de muestreo de la columna extraída, la cual estuvo distribuida uniformemente por la altura y cada punto tuvo una separación de 2 metros. (ver Figura 9).

Figura 9

Diagrama de muestreo por trasiego durante la investigación



Posteriormente, las muestras se trasladaron al CIGRAS para realizarles las pruebas físicas correspondientes, las cuales se detallan en los siguientes apartados. Se compararon y analizaron las 3 calidades de trigo, considerando que las muestras son representativas, por lo que se mezclaron y dividieron mediante el separador de granos por densidad marca Seedburo Quality (ver Figura 10).

Figura 10*Separador de granos marca Seedburo***4.1.6.2. Determinación de la Densidad Real**

Se utilizó un picnómetro de 22,554 mL a 24 °C (ver Figura 11), se siguió el procedimiento descrito por Valerio (2016) en frijol. Se registró la masa de los granos y se introdujeron hasta que desbordo el aceite por el orificio superior de la tapa. Se registró nuevamente la masa y se calculó el volumen de aceite desplazado con la ecuación (5):

$$V_s = \frac{(M_{p+f+M_p}) - (M_{p+f+s} - M_{p+s})}{\rho_f} \quad [5]$$

Donde:

V_s : Volumen de aceite desplazado (m^3).

M_p : Masa del picnómetro (kg).

M_{p+s} : Masa del picnómetro y granos (kg).

M_{p+f} : Masa del picnómetro y fluido (kg).

M_{p+f+s} : Masa del picnómetro, fluido y granos (kg).

ρ_f : Densidad del fluido ($\frac{kg}{m^3}$)

Figura 11

Picnómetro para medir densidad real en granos de trigo marca KIMAX



Como fluido de control, se utilizó aceite de girasol (*Helianthus annuus L.*) con una densidad relativa entre 990,0-921,5 kg/m³ a temperatura ambiente (Food and Agriculture Organization of the United Nations & World Health Organization, 2023).

4.1.6.3. Determinación de la Densidad Aparente

Se determinó la densidad aparente de los granos de trigo mediante un densímetro con volumen de 1 litro como se observa en la Figura 12, por medio de la norma *INTE/ISO 6669:2019 Café Oro-Determinación de la densidad a granel por caída libre de los granos enteros*, en donde se vierten los granos en el embudo hasta que se desborden, se elimina el exceso con una paleta de bordes planos.

Figura 12

Densímetro OHAUS para la determinación de la densidad aparente



4.1.6.4. Determinación de la Masa del Grano

Se utilizó una balanza semianalítica marca Optika (ver Figura 13), para medir la masa de los granos, la cual posee una capacidad máxima de 310 g y desviación estándar de $\pm 0,003$.

Figura 13

Balanza semianalítica utilizada para la medición de la masa en los granos de trigo



4.1.6.5. Determinación del Contenido de Humedad

Se siguió el procedimiento de la norma *ISO 712:2009 Cereals and cereal products-Determination of moisture content* considerada en la sección 5.5.

4.1.6.6. Actividad de agua.

Se utilizó el medidor de actividad de agua modelo AQUALAB 4TE (Figura 14). Se molieron los granos de trigo y se insertaron dentro de un molde de plástico que se insertó en el equipo para su medición.

Figura 14

Equipo utilizado en la medición de actividad de agua modelo AQUALAB 4TE.



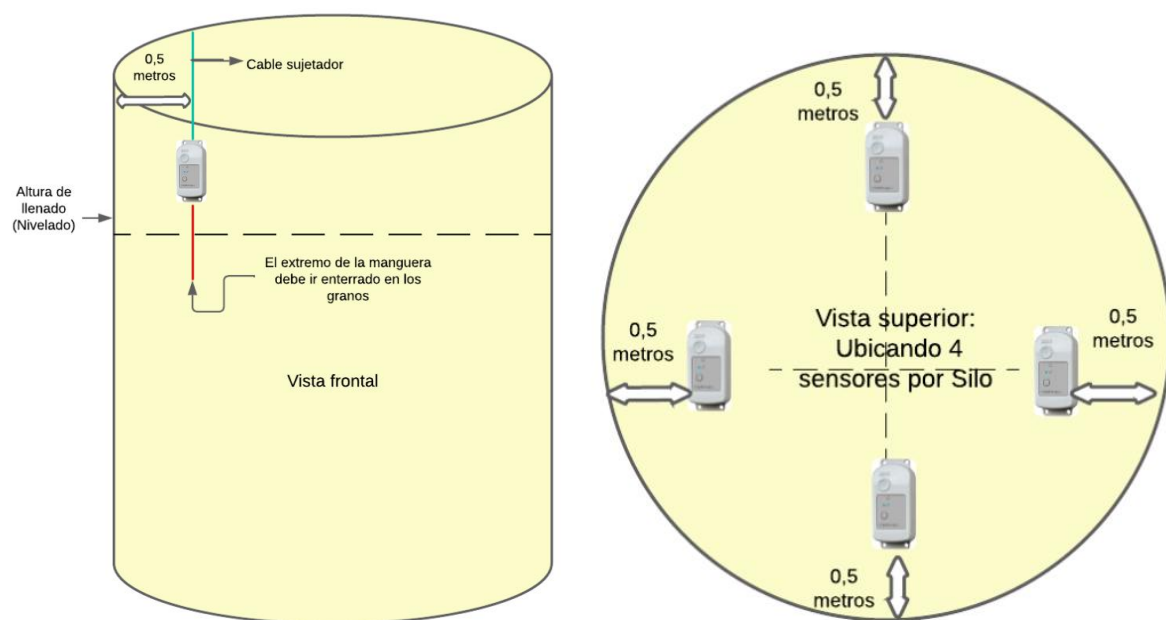
4.1.6.7. Propiedades Psicrométricas del Aire Durante el Almacenamiento

Se utilizó el sensor modelo MX2301A (ver Figura 9), para medir la temperatura y humedad relativa dentro de los silos. El sensor se colocó durante 2 meses en el interior del silo de control, se asumió que los demás se encontraban en condiciones ambientales similares.

En la Figura 15 se presenta la configuración empleada para la instalación de los sensores dentro de los silos B2 y B4. Se colocaron cuatro sensores distribuidos en forma de cruz, ubicados en las esquinas y a una distancia de 0,5 m de las paredes del silo. Los equipos fueron suspendidos mediante un cable, de modo que el extremo inferior de la manguera quedó insertado en el grano, así se configuró la correcta ubicación del sensor de medición de humedad y temperatura. Es importante señalar que los sensores se colocaron justo por debajo de la altura de llenado de los granos.

Figura 15

Configuración de los sensores utilizados para medir el aire intergranular dentro de los silos



4.1.7. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de regresión no lineal en el Software SigmaPlot v.16. para relacionar la altura de llenado de los granos con el tiempo de almacenamiento y para ajustar la curva de equilibrio higroscópico por adsorción.

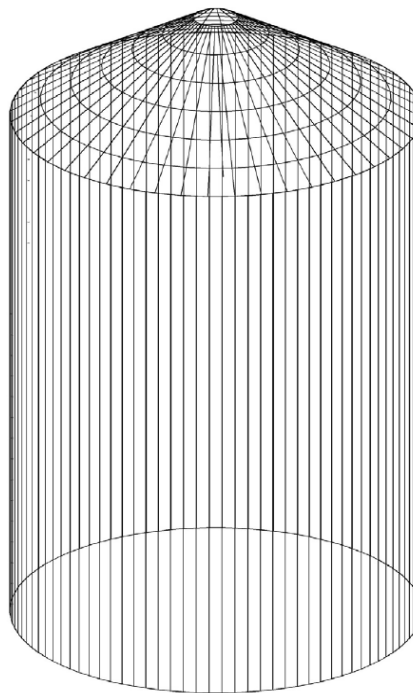
5. Resultados y Discusión

5.1. Variación Máxima de la Altura de los Granos de Trigo

Se analizaron dos silos de base plana y de estructura metálica, con láminas corrugadas como se observa en Figura 16, presentan similitud en la geometría cilíndrica, la principal diferencia entre los silos es que están constituidos por dimensiones distintas, el silo B2 es 3,5 veces más grande que el silo B4 (ver tabla 2).

Figura 16

Representación tridimensional por modelado topográfico de los silos estudiados (Rodríguez y Lara, 2009)



La tabla 3 presenta las dimensiones estructurales de los silos industriales evaluados en el presente estudio, identificados como B2 y B4. Ambos silos presentan configuraciones cilíndricas verticales, cuyas dimensiones influyen directamente en la tendencia del trigo almacenado, especialmente en relación con su compactación a lo largo del tiempo. El silo B2 posee una capacidad de 2800 toneladas, una altura de 19,47 metros y un radio de 7,235 metros, lo que se traduce en un volumen estimado de 3206,79 m³. Por su parte, el silo B4, de menor capacidad (800 toneladas), tiene una altura de 9,76 metros y un radio de 5,450 metros, con un volumen aproximado de 911,03 m³.

Tabla 3

Descripción de las dimensiones de los silos utilizados en el presente estudio.

Silo	Capacidad (ton)	Altura	Radio (m)	Volumen (m^3)
B2	2800	19,470	7,235	3206,79
B4	800	9,760	5,450	910,275

En la figura 17, la línea verde representa la Ruta Nacional Primaria 23, una vía principal que conecta la Gran Área Metropolitana con la zona norte del país y en la cual se ubican diversas plantas de producción que utilizan maquinaria pesada para el manejo de sus productos. Las líneas azules indican calles internas de la fábrica: la más próxima a la Ruta 23 corresponde a la calle interna frontal de la planta, mientras que la otra representa la calle interna lateral, utilizada específicamente para la circulación de maquinaria pesada. En el caso del silo B2, los puntos de medición 3 y 4 se encuentran aproximadamente a 40 metros de la calle principal y adyacente a la calle interna frontal. Por su parte, el silo B4 está ubicado a 7,93 metros de la calle interna lateral, a 21,90 metros de la calle interna frontal y a 50 metros de la Ruta Nacional Primaria 23.

Figura 17

Ubicación de las calles colindantes a la ubicación de los silos B2 y B4

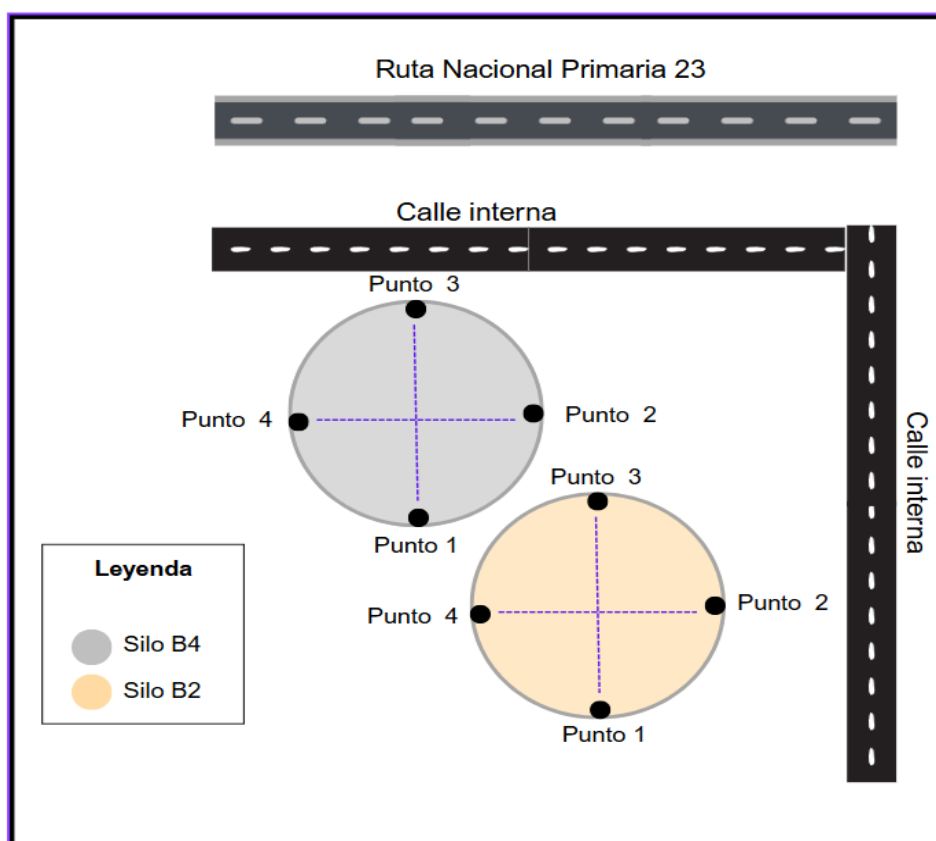


Nota. Tomado de *Google Earth* (imagen satelital del 1 de agosto de 2025).

En la Figura 18 se muestra la configuración de los puntos de muestreo en los silos B2 y B4. Cada silo cuenta con cuatro puntos de evaluación ubicados de forma equidistante, representando las posiciones cardinales (norte, sur, este y oeste) dentro de la estructura cilíndrica. Esta distribución permite analizar posibles variaciones en la densidad del grano como resultado de factores externos, como la cercanía a calles internas utilizadas por maquinaria pesada o la proximidad a la Ruta Nacional Primaria 23. La ubicación relativa de los silos respecto a estas vías también se indica en la figura, lo cual facilita el análisis de los resultados experimentales en función de la influencia del entorno.

Figura 18

Configuración de los puntos de muestreo para los silos B2 y B4

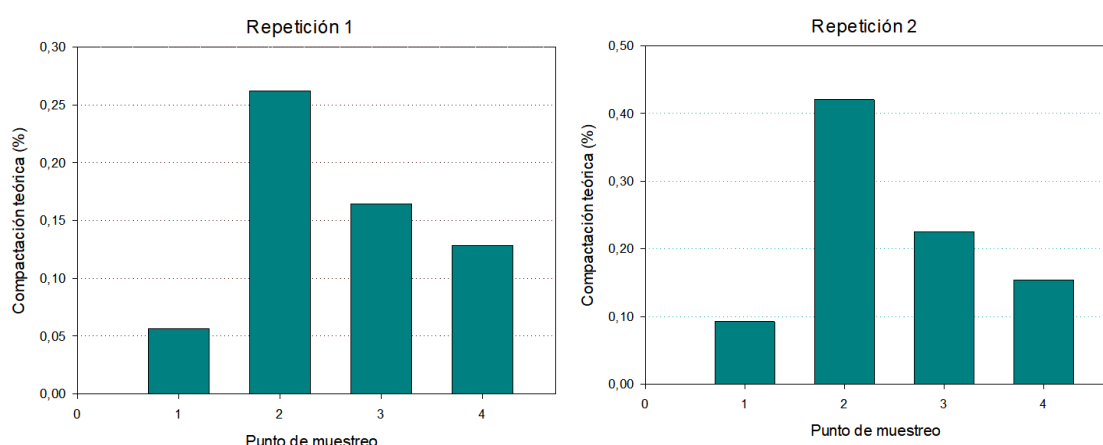


Las mediciones de altura de granos dependen de la disponibilidad del silo, materia prima, necesidad de producción y del personal capacitado que cumpliera con todos los requerimientos y capacitaciones de seguridad para escalar e ingresar al silo de forma semanal. El silo se llenó completamente en su parte cilíndrica y en la parte superior, se aplanó (niveló) para medir la disminución de la altura.

En la figura 19 se observan los valores de compactación teórica (%) calculados con la ecuación 2 y obtenidos en cuatro puntos del silo B2 durante dos repeticiones. Se evidencia que en ambas repeticiones el punto 2 muestra los valores más altos de compactación, mientras que el punto 1 tiene los valores más bajos. Esta variabilidad espacial puede atribuirse a las diferencias en la distribución de carga y en la forma en que el grano se acomoda durante el almacenamiento.

Figura 19.

Comparación de la compactación en diferentes puntos de muestreo del trigo en el silo B2 para dos repeticiones



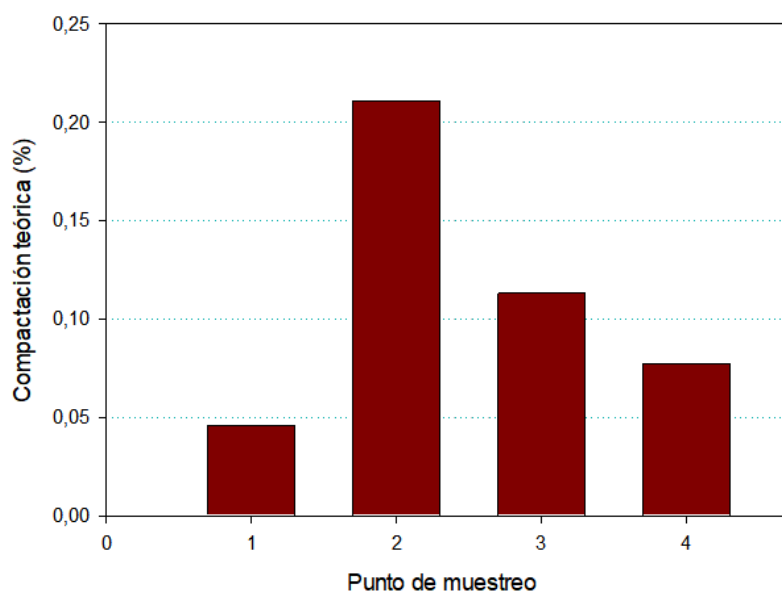
La mayor compactación en el punto 2 podría estar relacionada con zonas de mayor presión vertical y menor ventilación, lo cual favorece el asentamiento de los granos. Este fenómeno ha sido reportado por Pasha et al. (2012), quienes mencionan que la compactación tiende a incrementarse en zonas cercanas al centro de descarga o donde la acumulación de peso es mayor. Asimismo, según los hallazgos de Molenda et al. (2006), la consolidación en silos puede verse afectada por la forma del silo, el tiempo de almacenamiento y las características del grano, factores que probablemente influyeron en los resultados observados.

Además, el estudio de Montross et al. (2002) destaca que incluso pequeñas diferencias en humedad y tamaño de partícula pueden alterar significativamente los patrones de densificación en el grano almacenado, lo que podría explicar las variaciones observadas entre puntos y repeticiones en este caso.

En la Figura 20 se presentan los valores de compactación teórica (%) en los cuatro puntos de muestreo del silo B4, se consideró una repetición por punto. Al igual que en el silo B2, se observa una mayor compactación en el punto 2, seguido del punto 3, lo cual sugiere un patrón común en la distribución de la densificación dentro de los silos industriales.

Figura 20

Compactación teórica en los cuatro puntos de muestreo del silo B4



Esta coincidencia en la tendencia entre silos distintos refuerza la hipótesis de que la compactación no ocurre de manera uniforme, sino que está influenciada por variables estructurales y operativas del sistema de almacenamiento. La literatura señala que estos patrones de compactación pueden estar relacionados con la geometría del silo, el flujo de aire, la carga vertical y las propiedades del grano almacenado. Por ejemplo, según Molenda et al. (2006), las fuerzas de consolidación no se distribuyen de manera homogénea, se generaron zonas de mayor presión vertical en puntos específicos del silo, lo cual coincide con los resultados observados.

Además, el estudio de Chen et al. (2019) evidencia que la compactación estática y dinámica del grano puede incrementarse en zonas centrales del silo debido al peso del material en reposo y a la disminución del ángulo de reposo, se promovió una mayor densificación. Esto puede explicar por qué el punto 2 muestra los mayores valores de compactación en ambos silos.

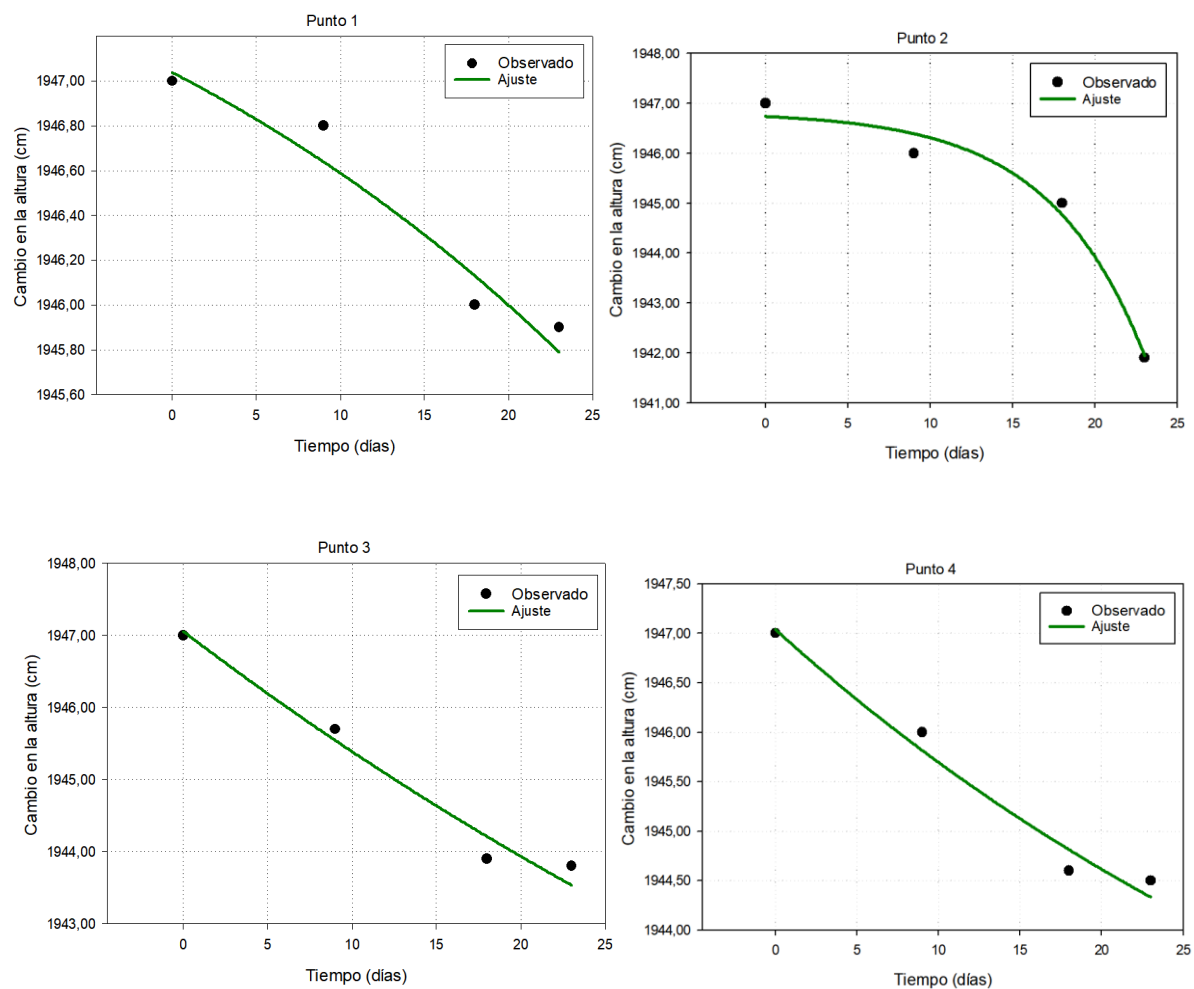
En ambos silos, la compactación alcanza un estado de equilibrio aproximadamente a los 23 días de medición. Este resultado sugiere que, transcurrido ese periodo, la densidad aparente de los granos deja de presentar variaciones significativas, se indicó que las fuerzas internas entre los granos y las condiciones de almacenamiento han alcanzado una distribución estable. Durante las primeras mediciones, la disminución en la altura del grano es más acelerada, producto de la reacomodación natural de las partículas debido al peso propio y a la consolidación progresiva. Sin embargo, una vez que las partículas encuentran una configuración estable, el sistema tiende a estabilizarse, se redujo gradualmente la tasa de compactación. Esta tendencia es descrita adecuadamente por la ecuación exponencial decreciente 2, el cual presentó el mejor ajuste a los datos experimentales, se reflejó la tendencia de estabilización conforme avanza el tiempo de almacenamiento.

De acuerdo con Sigrimis, Bartzanas y Panagakis (2010), durante el almacenamiento los granos experimentan una consolidación progresiva a causa de la carga estática, lo que conlleva una disminución de la porosidad y una compactación natural que tiende a estabilizarse con el tiempo.

Durante la primera repetición del experimento (Figura 21), se observa una Tendencia decreciente en la altura del trigo almacenado en los cuatro puntos de muestreo del silo B2, a lo largo de un periodo de 25 días. En el punto 1, la tendencia decreciente es más lineal, lo cual indica que es más estable y uniforme, posiblemente influido por una presión homogénea en esa sección del silo. En el punto 2, el cambio de altura presenta una ligera elevación inicial seguida por una caída progresiva, lo que puede asociarse a una redistribución inicial del grano antes de iniciar el proceso de asentamiento. Por otro lado, los puntos 3 y 4 presentan una disminución más pronunciada en los primeros días, con curvas descendentes más marcadas, lo que evidencia una fase inicial de compactación acelerada seguida de una estabilización. Este patrón sugiere que en estas zonas del silo las condiciones físicas favorecen un reacomodo más rápido de los granos, probablemente por mayores cargas verticales o una mayor densidad de grano desde el inicio del almacenamiento.

Figura 21

Ajuste de la ecuación exponencial al cambio en la altura del trigo almacenado en los puntos 1, 2, 3 y 4 del silo B2 durante 24 días en la primera repetición



La Tabla 4 presenta los parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para la variación del volumen del trigo almacenado en función del tiempo, desglosados por punto de medición en el silo B4. Los coeficientes de determinación R^2 muestran un buen nivel de ajuste, con valores que oscilan entre 0,910 y 0,998. Para el error estándar de la estimación (EEE), se obtuvieron valores bajos en general, sobresale el punto 2 con el menor error (0,028), lo que sugiere consistencia entre los datos experimentales y la ecuación utilizada.

Tabla 4

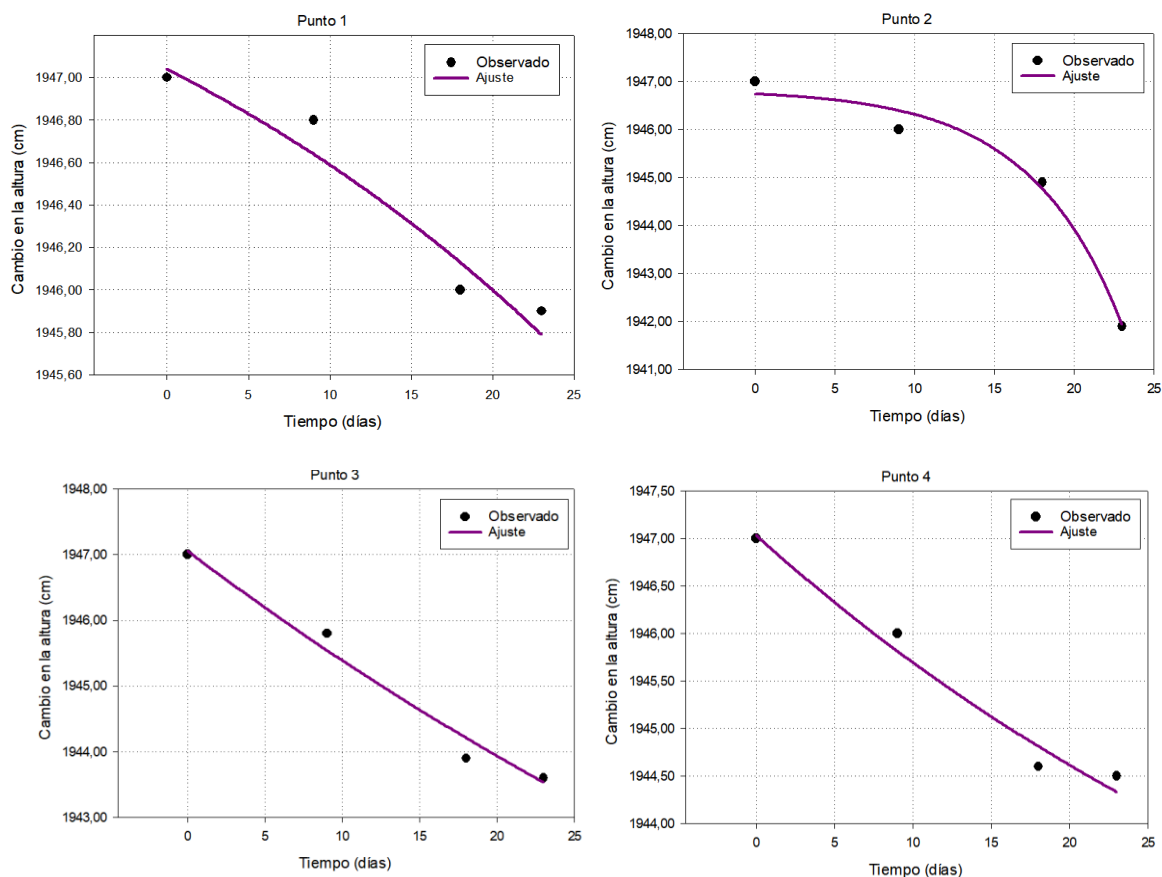
Parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para el cambio de altura del trigo almacenado en el silo B2

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coeficiente de regresión				
hi (m)	1947,039	1946,740	1947,057	1947,040
he (m)	1948,492	1946,832	1934,064	1940,161
k (adim)	0,027	0,180	0,014	0,022
Parámetros estadísticos				
R²	0,959	0,982	0,976	0,981
EEE	0,126	0,323	0,269	0,182

En la segunda repetición del experimento (Figura 22), la tendencia observado mantiene la tendencia general de disminución de la altura en los cuatro puntos de muestreo, aunque con algunas diferencias importantes respecto a la repetición anterior. En el punto 1, se repite el patrón de ligera elevación inicial seguido por una caída sostenida, aunque la magnitud del cambio es mayor. En el punto 2, la línea de ajuste muestra una pérdida más marcada en altura en comparación con la primera repetición, se indica una posible variación en las condiciones de almacenamiento, como mayor humedad o diferente grado de llenado. En los puntos 3 y 4, se destaca una mayor pendiente negativa en las curvas durante los primeros días, lo cual refleja una compactación más intensa y acelerada. La curva ajustada mediante la ecuación de Midilli se adapta adecuadamente a la tendencia no lineal de los datos, especialmente en los puntos con descensos abruptos. La concordancia entre los datos observados y sugiere que el fenómeno responde a una dinámica de compactación compleja, donde intervienen tanto factores internos del material como condiciones externas del sistema de almacenamiento.

Figura 22

Ajuste de la ecuación exponencial al cambio en la altura del trigo almacenado en los puntos 1, 2, 3 y 4 del silo B2 durante 24 días en la segunda repetición



La Tabla 5 presenta los parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para la variación de la altura del trigo almacenado en función del tiempo, desglosados por punto de medición en el silo B2. Los coeficientes de determinación R^2 indican un buen nivel de ajuste, con valores que varían entre 0,976 y 0,982. En cuanto al error estándar de la estimación (EEE), los valores son en general aceptables.

Tabla 5

Parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para el cambio de altura del trigo almacenado en el silo B2

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coeficiente de regresión				
hi (m)	1946,740	1947,058	1947,036	1947,036
he (m)	1946,832	1934,063	1940,161	1940,161
k (adim)	0,025	0,014	0,022	0,0217
Parámetros estadísticos				
R^2	0,982	0,976	0,981	0,981
EEE	0,323	0,014	0,182	0,182

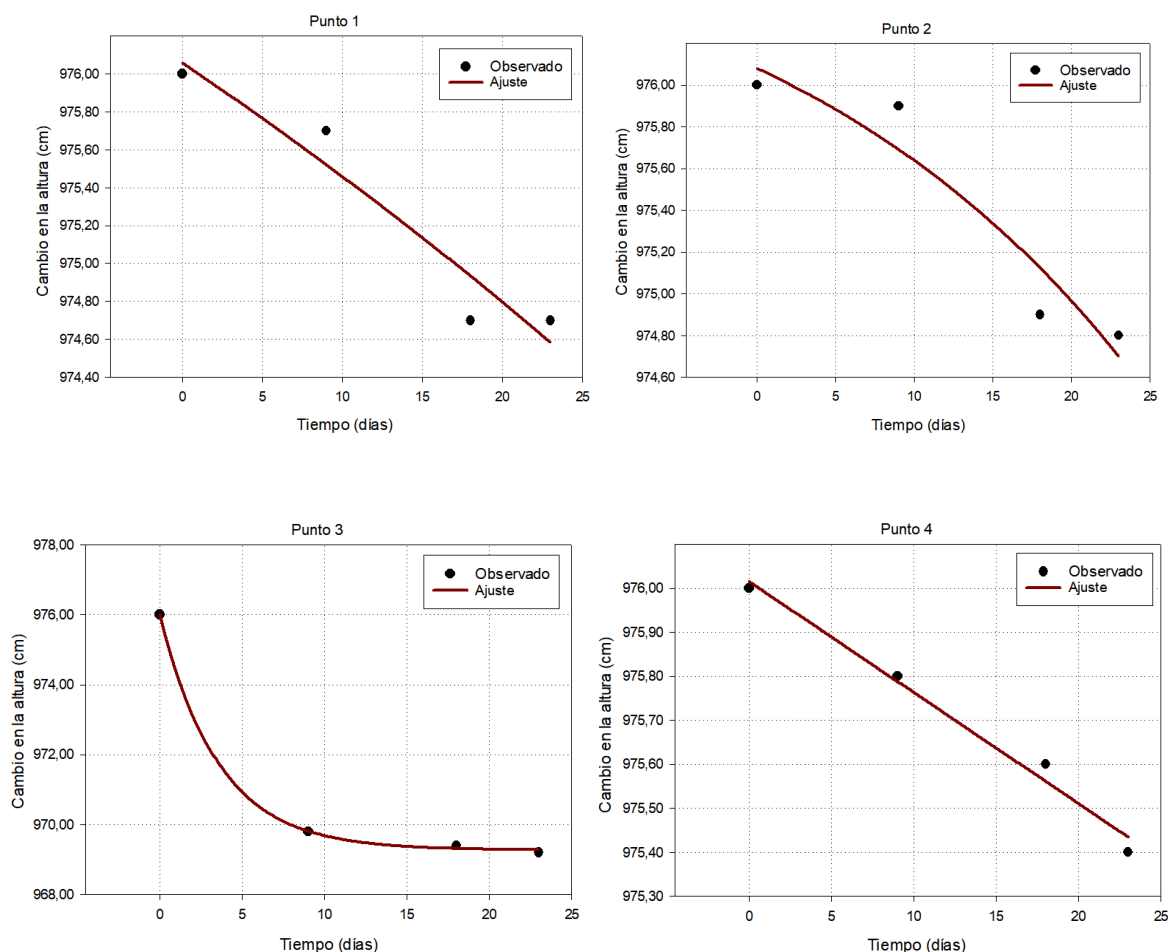
Al comparar ambas repeticiones, se evidencia que la tendencia general de disminución de altura del trigo se mantiene en todos los puntos de muestreo, lo que confirma que los granos almacenados están sujetos a un proceso sistemático de compactación que puede explicarse por la influencia de factores adicionales como la compactación inducida por vibraciones, variaciones en el contenido de humedad o cambios en la densidad de carga inicial.

Según Srivastava et al. (2006), la presión vertical ejercida por el peso propio del grano genera un asentamiento progresivo en capas inferiores, lo cual es consistente con los patrones observados. Asimismo, Molenda y Horabik (2005) indican que la exposición del grano a vibraciones externas, como las causadas por maquinaria o tráfico vehicular cercano, puede acelerar la compactación en materiales granulares al facilitar el reacomodo de las partículas. Adicionalmente, Thompson y Ross (1983) concluyen que el contenido de humedad afecta la fricción interna del grano, se disminuyó su resistencia mecánica y favoreció su compactación.

Adicionalmente, se evaluó la tendencia del trigo almacenado en un segundo silo (Figura 23) bajo condiciones similares, con el objetivo de comparar el fenómeno de compactación en distintas estructuras de almacenamiento. En la Figura 23, se presenta la variación de la altura del grano durante un periodo de 24 días en los puntos de muestreo 1, 2, 3 y 4 del nuevo silo. Al igual que en el silo B2, se observa una tendencia descendente en todos los puntos, evidenciando un proceso progresivo de compactación. En el Punto 1, la curva muestra un incremento inicial seguido por una estabilización en el descenso de la altura, Tendencia que sugiere una redistribución temporal del grano antes de asentarse.

Figura 23

Ajuste de la ecuación exponencial al cambio en la altura del trigo almacenado en los puntos 1, 2, 3 y 4 del silo B4 durante 24 días



El punto 2 presenta una disminución continua y más lineal, lo que indica una compactación sostenida con menor variabilidad. Por su parte, los Puntos 3 y 4 exhiben descensos más pronunciados, especialmente en las primeras dos semanas, lo cual podría estar asociado a una mayor carga vertical o a zonas del silo más expuestas a vibraciones.

estructurales. Este conjunto de resultados refuerza la hipótesis de que la compactación del trigo es un proceso dinámico influenciado tanto por las propiedades físicas del material como por factores externos al grano, y cuya magnitud puede variar entre diferentes silos a pesar de mantener condiciones experimentales similares.

La Tabla 6 presenta los parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para la variación de la altura del trigo almacenado en el silo B4, desglosados por punto de medición. Los coeficientes de determinación R^2 indican un buen nivel de ajuste general, con valores que van desde 0,910 hasta 0,999. En cuanto al error estándar de la estimación (EEE), también se obtuvieron valores aceptables en la mayoría de los puntos.

Tabla 6

Parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para el cambio de altura del trigo almacenado en el silo B4

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coeficiente de regresión				
hi (m)	976,058	975,999	976,016	976,082
he (m)	981,737	969,268	962,180	976,917
k (adim)	0,117	0,279	0,126	0,142
Parámetros estadísticos				
R^2	0,924	0,999	0,984	0,910
EEE	0,322	0,119	0,056	0,331

El análisis de los cuatro puntos de muestreo en este segundo silo muestra un patrón de compactación desuniforme a lo largo del tiempo. Si bien todos los puntos muestran una disminución progresiva en la altura del trigo almacenado, existen diferencias importantes en la forma y pendiente de las curvas. Por ejemplo, en el punto 2 se aprecia un descenso más constante y sostenido, típico de una compactación más estable, probablemente en una zona con carga distribuida uniformemente. En contraste, los puntos 3 y 4 presentan una reducción

más abrupta durante los primeros días, seguida de una desaceleración, lo cual sugiere una compactación inicial acelerada posiblemente inducida por una mayor presión vertical localizada, cercanía a las paredes del silo, o zonas con mayor exposición a vibraciones mecánicas. Esta Tendencia desuniforme indica que el silo no compacta de forma homogénea en todas sus secciones, lo cual coincide con estudios previos que destacan la influencia del diseño estructural del silo, la granulometría del trigo, la humedad del grano y las condiciones externas de operación (Srivastava et al., 2006; Molenda & Horabik, 2005).

Para el silo B4, la ecuación exponencial ajustado a los datos experimentales mostró un buen Tendencia predictivo, especialmente en los puntos 1, 2 y 4, donde la reducción fue gradual. En contraste, el punto 3 presentó una caída en los primeros días, seguida de una estabilización, lo que podría indicar una redistribución más rápida del material granular en esa zona. Estos resultados respaldan la aplicabilidad de la ecuación exponencial para describir la densificación vertical del trigo almacenado en función del tiempo.

Thompson y Ross (1983) reportaron una reducción promedio de 1,2 cm en la altura de trigo duro almacenado durante 21 días, valor semejante al observado en el presente estudio, lo que valida la tendencia física observado. Por su parte, Molenda et al. (2006) encontraron una compactación más acelerada en los primeros días de almacenamiento bajo condiciones de vibración, con una reducción cercana a los 2 cm en los primeros 10 días, resultado que coincide con lo observado en el punto 3 del presente trabajo. Asimismo, según la investigación de Karunarathna et al. (2019), el asentamiento vertical de granos de trigo en silos metálicos puede variar hasta un 1,5% del total de la altura inicial, depende de la humedad y densidad inicial de carga, lo cual concuerda con los valores obtenidos experimentalmente en el silo B4.

Diversos autores han destacado que la reducción en la altura del grano almacenado está estrechamente relacionada con el aumento de la presión vertical y la redistribución interna del material, factores que influyen directamente en la compactación (Molenda et al., 2006; Raji & Favier, 2004). Además, la razón de altura proporciona una herramienta visual y cuantitativa que facilita la comparación entre diferentes puntos de muestreo y silos, valida y fortalece los resultados obtenidos mediante el cálculo de la compactación teórica. Según Montross et al. (2002), el monitoreo de este tipo de variables estructurales permite una mejor comprensión de la tendencia mecánico del grano, especialmente en condiciones prolongadas de almacenamiento, donde se acentúan los efectos de asentamiento y compresión.

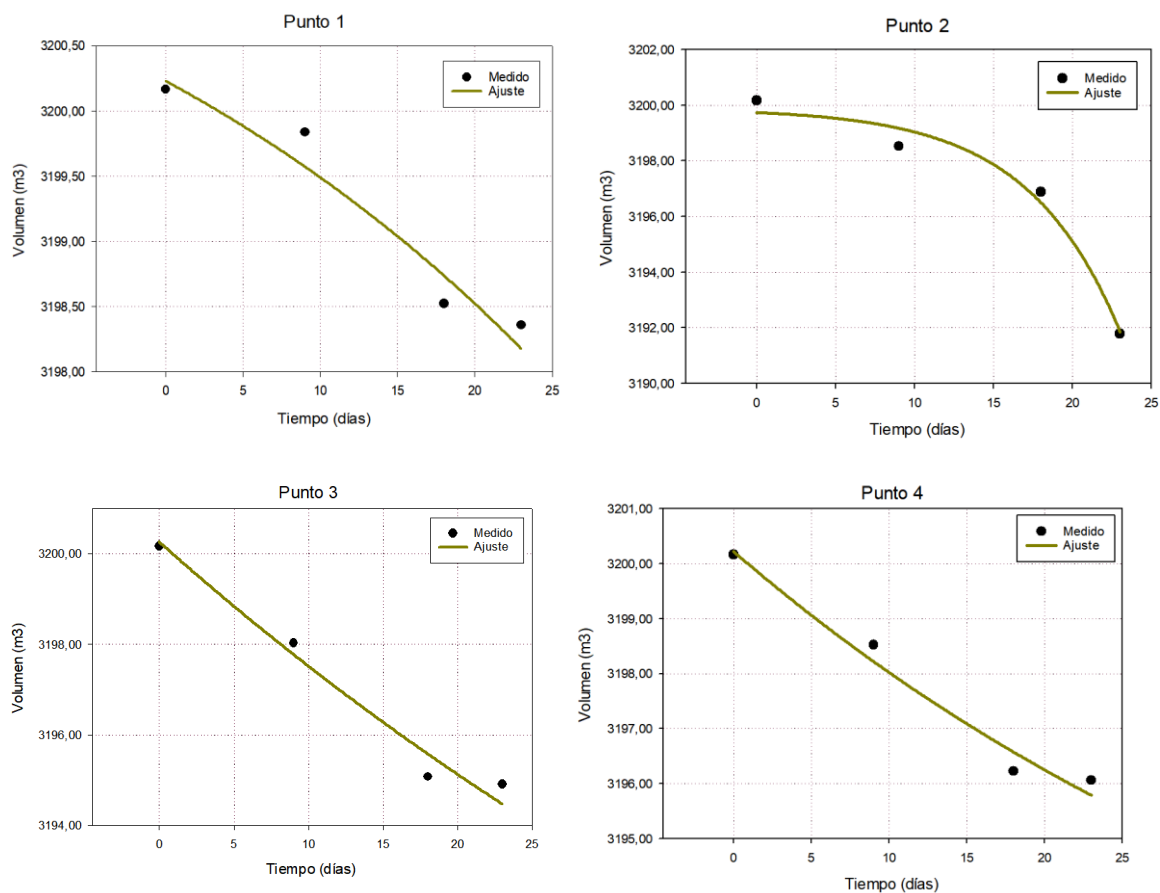
En contextos industriales, el trigo generalmente se almacena por períodos de dos a seis semanas, tiempo suficiente para que se establezcan los procesos de compactación sin generar cambios significativos posteriores. Esto implica que las mediciones realizadas durante ese intervalo son representativas de la estructura del grano en condiciones reales de operación. Por lo tanto, el análisis de compactación en trigo debe centrarse en las fases iniciales del almacenamiento, donde ocurren los ajustes más importantes en la estructura del lecho granular.

A partir de la evaluación inicial basada en la disminución de la altura del trigo almacenado, se evidenció un patrón de compactación que seguía una tendencia exponencial decreciente en todos los puntos analizados, independientemente de las condiciones locales del silo o de las variaciones propias del llenado. Para fortalecer esta observación y validar la consistencia la tendencia mecánica del grano, se realizó un análisis complementario en función del volumen. Este enfoque volumétrico permite integrar de forma más completa el efecto tridimensional de la compactación dentro del silo, ya que considera no solo la altura, sino también la redistribución interna de masa granular. Los resultados obtenidos mantienen la coherencia de los resultados ya que el volumen del trigo disminuye con el tiempo, se sigue una forma exponencial similar, lo que refuerza la hipótesis de que la compactación ocurre de forma sistemática en todos los puntos de almacenamiento, con independencia de las condiciones operativas.

La Figura 24 muestra el ajuste de la ecuación exponencial al cambio de volumen del trigo almacenado en el silo B2 durante un periodo de 24 días en la primera repetición, evaluado en cuatro puntos diferentes dentro del silo. En todos los casos se observa una tendencia decreciente del volumen con el tiempo, en donde ocurre un proceso de compactación progresiva. Para el punto 2, la reducción de volumen parece acelerarse hacia el final del periodo, mientras que en los puntos 1, 3 y 4 la tendencia es más uniforme. Esta diferencia puede estar relacionada con condiciones locales dentro del silo, como redistribuciones de carga, pequeñas variaciones en la densidad inicial o diferencias en la ventilación y humedad, tal como lo han reportado Russo et al. (2011).

Figura 24

Ajuste de la ecuación exponencial al cambio de volumen en función del tiempo para el trigo almacenado en el silo B2 durante 24 días en la primera repetición



La Tabla 7 presenta los parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para la variación del volumen del trigo almacenado, desglosados por punto de medición. Todos los coeficientes de R^2 son superiores a 0,97, con un valor máximo de 0,989 en el punto 1, lo que indica un buen ajuste en todos los casos. El error estándar de la estimación (EEE) también se mantiene bajo, especialmente en el punto 1 (0,181), lo cual refuerza la validez de la ecuación empleada.

Tabla 7

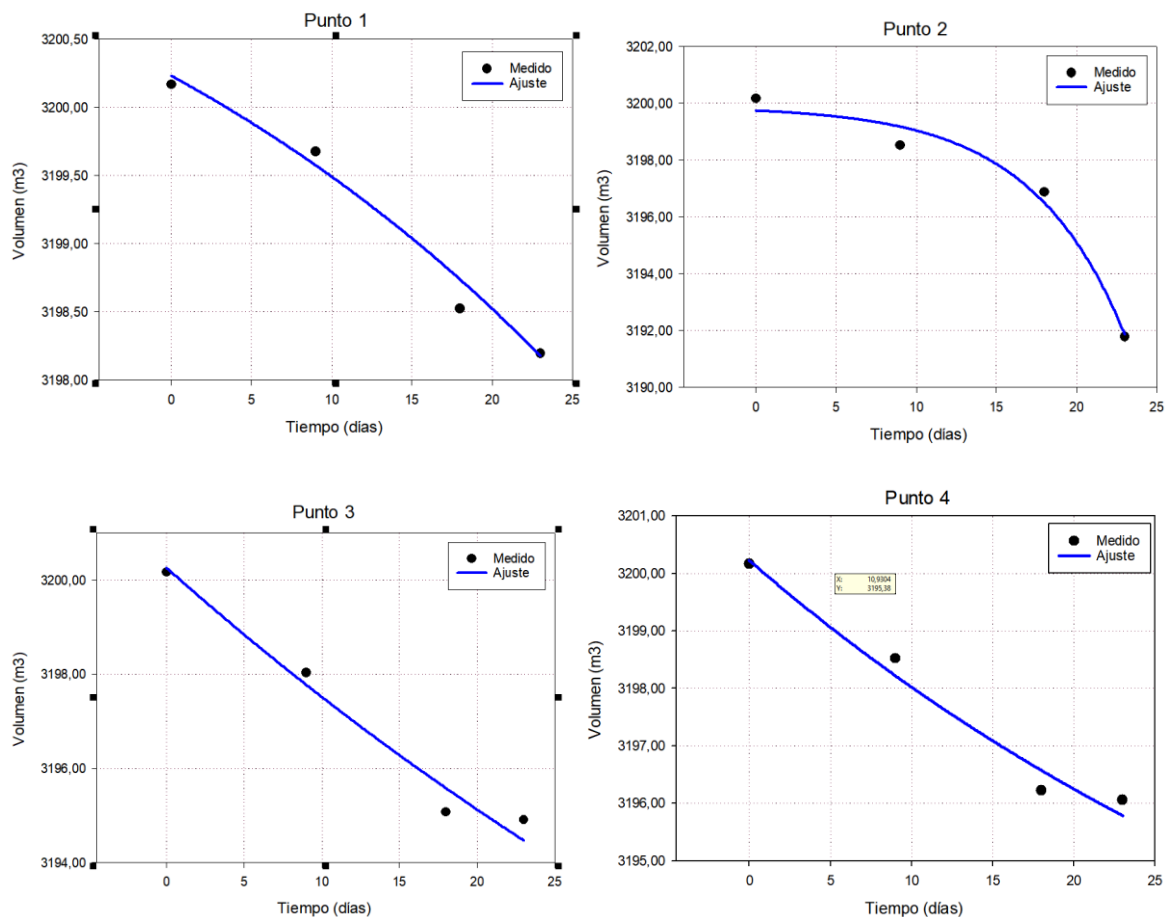
Parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para la altura del trigo almacenado en diferentes puntos del silo B2 en la primera repetición

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coefficiente de regresión				
vi (m)	3200,232	3199,739	3200,261	3200,226
ve (m)	3202,619	3199,891	3178,901	3188,926
k (adim)	0,027	0,013	0,014	0,022
Parámetros estadísticos				
R^2	0,989	0,982	0,976	0,981
EEE	0,181	0,531	0,442	0,299

La Figura 25 muestra el ajuste de la ecuación exponencial al volumen del trigo almacenado en el silo B2 durante 24 días en la segunda repetición. En los cuatro puntos evaluados se observa una tendencia decreciente del volumen, lo que confirma nuevamente el proceso de compactación. El ajuste es adecuado en todos los casos, con una trayectoria similar a la observada en la primera repetición. El punto 2 intensifica su descenso en la parte final, posiblemente por una redistribución interna del grano.

Figura 25

Ajuste de la ecuación exponencial al cambio de volumen en función del tiempo para el trigo almacenado en el silo B2 durante 24 días en la segunda repetición



La Tabla 8 presenta los parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para la variación del volumen del trigo almacenado en función del tiempo, desglosados por punto de medición durante la primera repetición. Los coeficientes de determinación R^2 muestran un buen nivel de ajuste, con valores que oscilan entre 0,959 y 0,982. En cuanto al error estándar de la estimación (EEE), los valores son en su mayoría aceptables, destacando nuevamente el punto 1 con el menor error (0,181).

Tabla 7

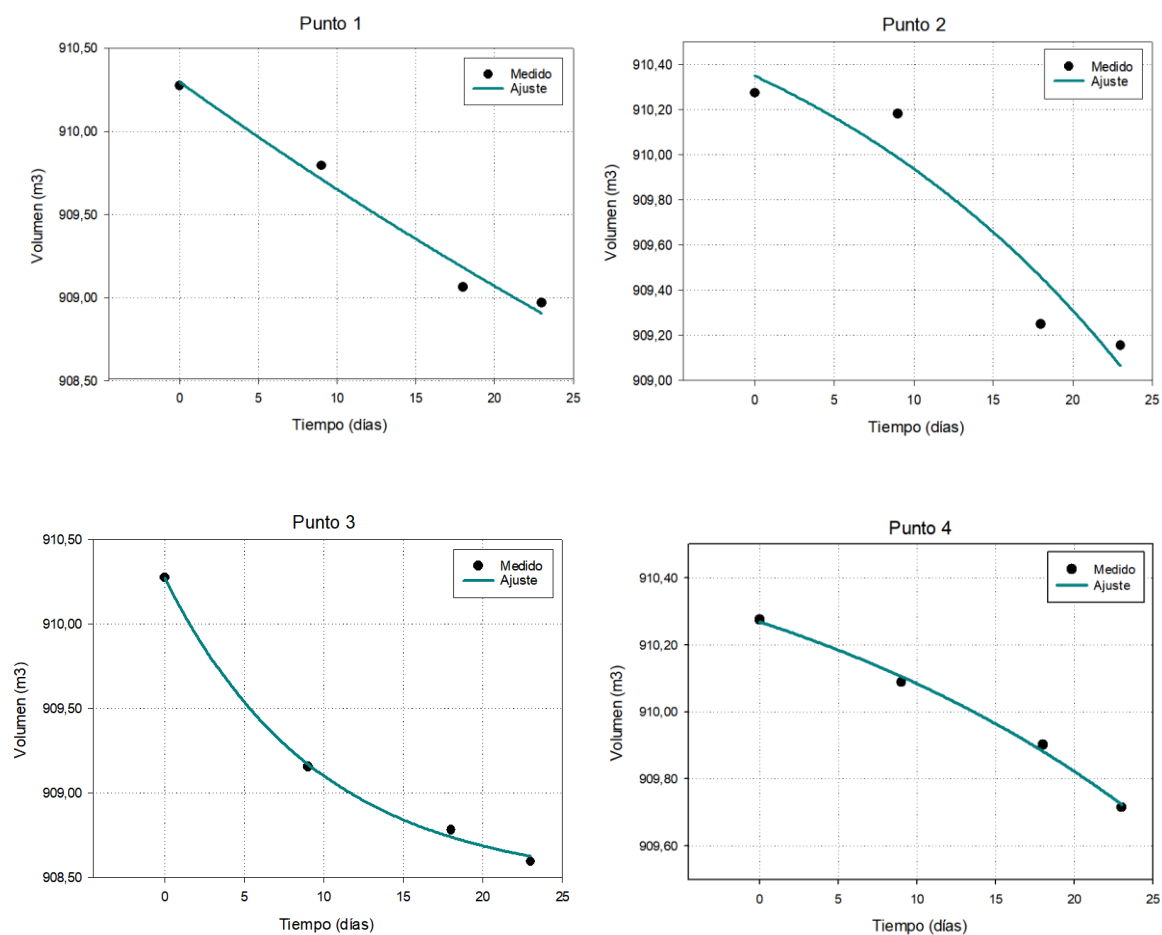
Parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para la altura del trigo almacenado en diferentes puntos del silo B2 en la segunda repetición

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coeficiente de regresión				
vi (m)	3200,232	3199,739	3200,170	3200,261
ve (m)	3202,619	3199,891	3200,382	3178,903
k (adim)	0,027	0,173	0,048	0,014
Parámetros estadísticos				
R^2	0,959	0,982	0,974	0,978
EEE	0,181	0,541	0,461	0,966

La Figura 26 muestra el ajuste de la ecuación exponencial al cambio de volumen del trigo almacenado en el silo B4 durante 24 días. En los cuatro puntos evaluados se observa una tendencia decreciente, confirmando la presencia del proceso de compactación. Las ecuaciones se ajustan adecuadamente a los datos medidos, destacando el punto 3, donde la reducción de volumen es más pronunciada desde los primeros días. Las diferencias entre puntos podrían asociarse a condiciones locales dentro del silo, pero la tendencia general mantiene la coherencia con lo observado en el silo B2.

Figura 26

Ajuste de la ecuación exponencial al cambio de volumen en función del tiempo para el trigo almacenado en el silo B4



La Tabla 8 presenta los parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para la variación del volumen del trigo almacenado en el silo B4. En todos los puntos se obtuvieron valores altos de R^2 , superiores a 0,91.

Tabla 8

Parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para la altura del trigo almacenado en diferentes puntos del silo B4

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coefficiente de regresión				
hi (m)	910,298	910,268	910,272	910,350
he (m)	903,624	910,706	908,458	911,130
k (adim)	0,010	0,035	0,104	0,042
Parámetros estadísticos				
R^2	0,978	0,995	0,998	0,910
EEE	0,159	0,028	0,055	0,309

En términos generales, la tendencia del cambio de volumen en ambos silos está directamente relacionado con los procesos de compactación natural que ocurren en los granos durante su almacenamiento prolongado. Al mantenerse en reposo bajo su propio peso, los granos tienden a reorganizarse internamente, ocupando menos espacio por efecto de la presión vertical acumulada.

En el caso del trigo, la compactación durante el almacenamiento no se incrementa de forma lineal con el tiempo, ya que este material tiende a alcanzar un equilibrio mecánico en un periodo relativamente corto. Diversos estudios señalan que la mayor parte del asentamiento vertical y la redistribución de esfuerzos en los silos ocurre durante las primeras semanas, debido al ajuste inicial de las partículas y al efecto de la carga vertical inducida por el peso del propio grano (Molenda et al., 2006).

La tendencia de los granos almacenados en silos verticales está influenciada por múltiples factores asociados al proceso de llenado, entre los que destacan la velocidad de descarga y el ángulo de reposo del grano. Russo et al., (2011) señalan que pequeñas variaciones en estos parámetros pueden producir redistribuciones internas significativas de

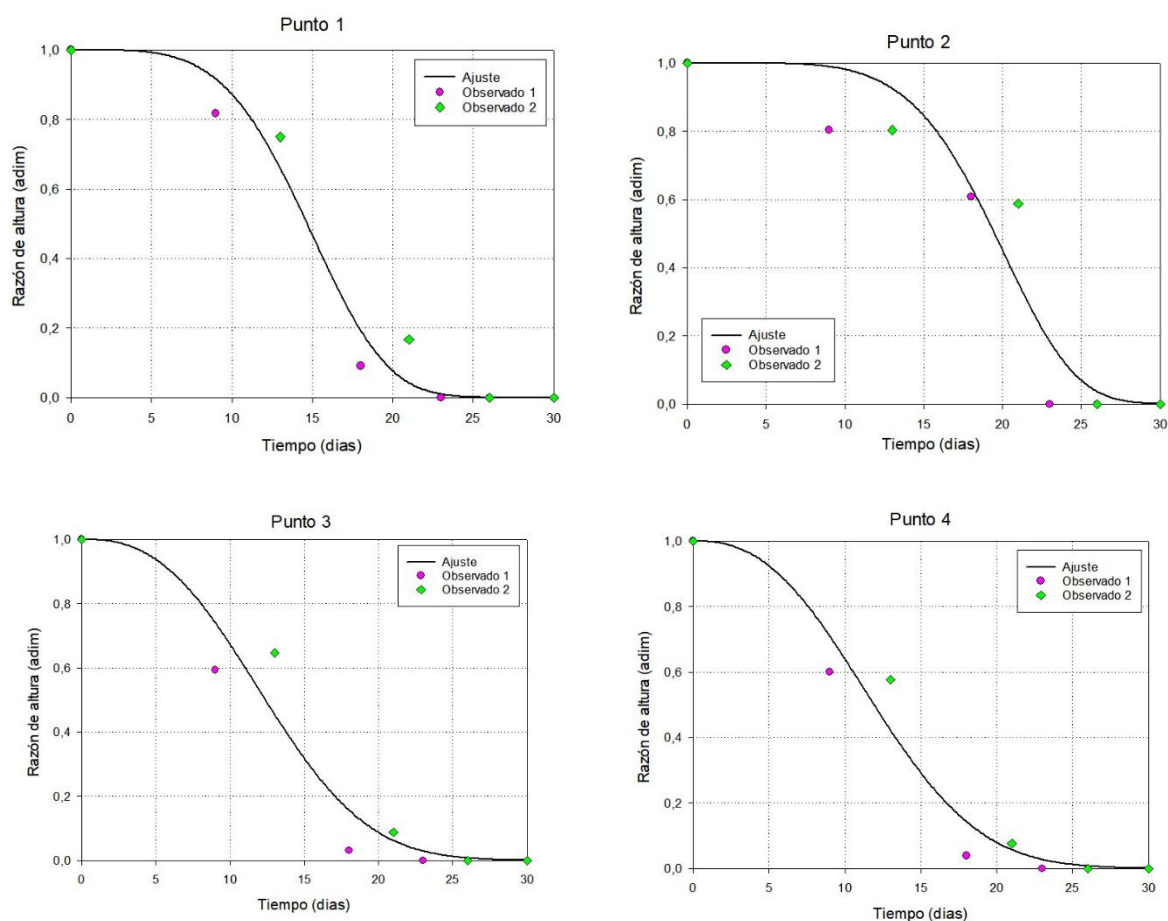
las fuerzas dentro de la masa granular, lo cual genera Tendencias mecánicas heterogéneas en distintas zonas del silo. Estas diferencias explican, en parte, la variabilidad entre repeticiones incluso dentro de un mismo silo, dado que cada llenado puede inducir configuraciones distintas de presión y contacto entre los granos. Sin embargo, si bien se reconoce esta variabilidad local, los autores también plantean que existen patrones estructurales comunes que emergen tras repetidos ciclos de carga y descarga, y que permiten modelar la tendencia del grano bajo principios físicos compartidos.

En esta línea, los resultados del presente estudio respaldan la idea de que, a pesar de las diferencias observadas entre los silos B2 y B4 tanto en condiciones psicrométricas como en la disposición física del grano, el proceso de compactación sigue una tendencia exponencial decreciente similar en todos los puntos evaluados. Esta tendencia común sugiere que el trigo, como material granular, tiende a estabilizarse estructuralmente con el tiempo bajo el peso de su propia masa, lo que genera una reducción progresiva de la altura observable. Esto también concuerda con los hallazgos de Karunakaran et al. (2001), quienes advierten que la no uniformidad en la compactación puede comprometer la eficiencia de los sistemas de aireación, afecta la regulación de la temperatura y la humedad dentro del silo, y aumenta así el riesgo de proliferación de hongos o insectos.

En la figura 27, se observan las líneas del ajuste de la ecuación 2 colocando un exponente (n) en la variable del tiempo (t). La comparación entre las evaluaciones fue realizada a través de una razón entre las diferencias de alturas de los granos en el silo. Los valores obtenidos en las dos repeticiones por punto de observación indicaron una similitud en la compactación.

Figura 27

Ajuste de la ecuación exponencial al cambio de volumen en función del tiempo para el trigo almacenado en el silo B4



Los resultados de la tabla 9 corrobora que todos los puntos presentan valores elevados de R^2 mayores a 0,95 y errores estándar bajos, confirmando la calidad del ajuste pese a diferencias en los parámetros k y n . Este enfoque está alineado con estándares científicos en dinámica granular, donde la adimensionalización es una herramienta clave para validar comparaciones entre condiciones experimentales o simuladas (Bertrand et al., 2018; Gaume et al., 2022). En consecuencia, la razón de altura adimensional se demuestra como una medida adecuada y fiable para comparar la tendencia el decaimiento de la altura entre los puntos de observación en el silo.

Tabla 9

Parámetros de ajuste de la ecuación exponencial para la razón de altura de los granos almacenados en el silo B2 durante las repeticiones 1 y 2.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coefficiente de regresión				
k (adim)	8,100 e-06	7,027 e-08	0,001	0,001
n (adim)	4,227	5,421	2,628	2,504
Parámetros estadísticos				
R^2	0,976	0,958	0,954	0,971
EEE	0,074	0,133	0,098	0,077

5.2. Equilibrio Higroscópico

La Tabla 10 presenta las propiedades del aire ambiente alrededor de los silos, específicamente en la zona de carga por medio de dos tolvas para la época seca. Se reportan los valores promedio de temperatura y humedad relativa de 28,9 °C y 79,1 % respectivamente en la Tolva 2, mientras que en la Tolva 3 se registró un valor similar de 28,9 °C y de 78,2 %. Estos resultados reflejan condiciones ambientales cálidas y con alta humedad en el aire entorno a las tolvas.

Tabla 10

Propiedades psicométricas del aire ambiente en el sitio de estudio

Ubicación del sensor	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)
Tolva 2	28,87 ± 2,84	79,12 ± 13,99
Tolva 3	28,94 ± 2,91	78,20 ± 11,02
Interior del silo B2	24,11 ± 1,29	57,13 ± 0,62
Interior del silo B4	20,42 ± 2,77	61,39 ± 1,43

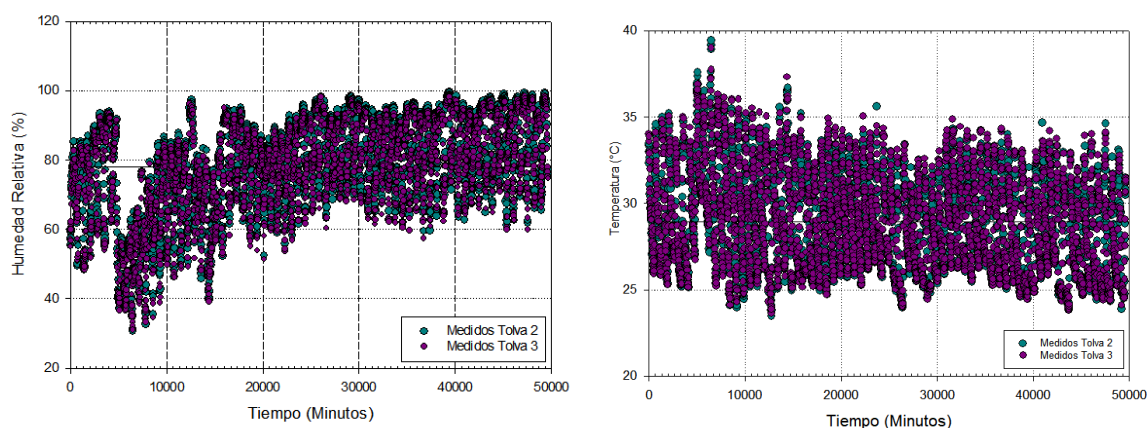
Las propiedades del aire ambiente dentro de los silos de estudio B2 y B4 se registraron durante mes y medio, obteniéndose valores promedio de temperatura y humedad relativa de 24,1 °C y 57,1 % respectivamente para el silo B2. En el caso del silo B4, la temperatura promedio fue menor (20,4 ± 2,8 °C), acompañada de una humedad relativa ligeramente superior (61,4 %). Estos resultados indican que las condiciones ambientales internas en los silos son aptas para la conservación de granos, ya que se mantienen por debajo del umbral del 65 % de humedad relativa, el cual se considera crítico para evitar el desarrollo de hongos y otros microorganismos (FAO, 1994). Desde el punto de vista sanitario, la temperatura interna también es clave. Según la FAO (2011), el rango óptimo para el desarrollo de hongos de almacenamiento oscila entre 23 y 40 °C, por lo que mantener los silos por debajo de este umbral, preferiblemente por debajo de los 25 °C, contribuye significativamente a inhibir el crecimiento fúngico. Además, se recomienda que las temperaturas en silos de semillas permanezcan por debajo de los 20 °C para preservar la viabilidad y reducir el deterioro.

En la Figura 28 se presentan dos gráficos de dispersión correspondientes al monitoreo continuo de las condiciones ambientales externas (humedad relativa y temperatura) durante un periodo extendido, representado en minutos. El gráfico de la izquierda muestra la humedad

relativa, mientras que el de la derecha representa la temperatura ambiente. En ambos casos, las mediciones se realizaron en dos puntos: Tolla 2 y Tolla 3, indicados en la leyenda. Se observa que la humedad relativa fluctuó entre aproximadamente 30 % y 100 %, con una tendencia general a estabilizarse por encima del 70 % a lo largo del tiempo, lo que indica una condición de alta humedad ambiental. Por otro lado, la temperatura osciló entre los 20 °C y los 40 °C, con una tendencia decreciente y mayor dispersión en los primeros registros, especialmente durante los primeros 14 días. Estas condiciones ambientales externas son relevantes para analizar la interacción del grano almacenado con el entorno, ya que pueden influir en los procesos de intercambio higroscópico, conservación y compactación del trigo dentro de los silos.

Figura 28

Variación de la humedad relativa (%) y temperatura (°C) externa en función del tiempo (minutos), registradas en las tolvas 2 y 3



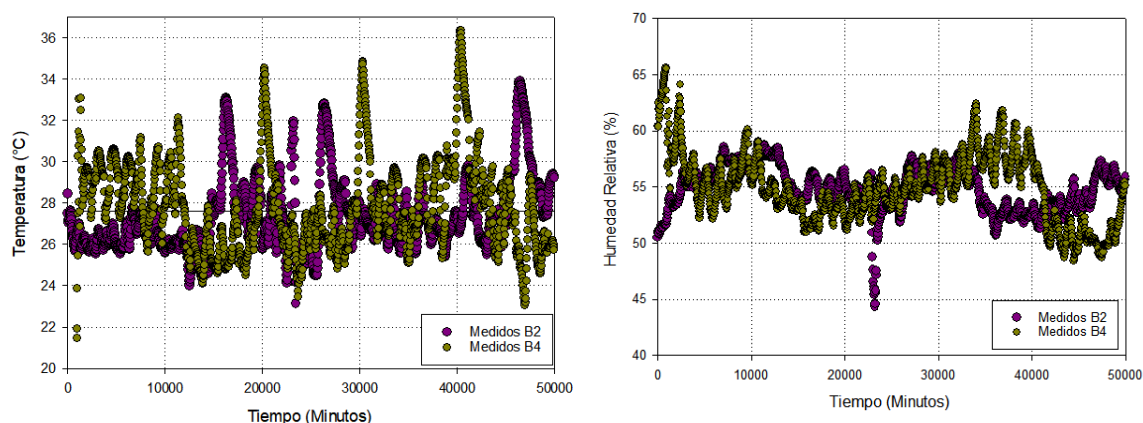
La Figura 29 muestra la variación de la temperatura y la humedad relativa interna en función del tiempo para los silos B2 y B4. En el gráfico izquierdo, correspondiente a la temperatura, se observa que ambos silos presentan una oscilación térmica entre aproximadamente 22 °C y 36 °C. Sin embargo, el silo B4 (curva en verde) evidencia una mayor dispersión y presencia de picos térmicos más pronunciados en comparación con el silo B2 (curva morada), lo cual podría indicar una menor estabilidad térmica o mayor influencia de fuentes de calor internas. Por otro lado, el gráfico derecho presenta la tendencia de la humedad relativa dentro de ambos silos. Se aprecia que el silo B2 mantiene registros más constantes en comparación con el silo B4, que presenta mayor variabilidad y valores máximos cercanos al 70 %.

De acuerdo con los registros del Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 01 de junio de 2025) para Puntarenas, durante la estación seca la temperatura máxima promedio alcanza aproximadamente 34-35 °C al mediodía, mientras que las temperaturas mínimas nocturnas son de 22–23 °C. Este ciclo diario de calentamiento y enfriamiento explica los picos de temperatura observados ya que durante las horas de mayor irradiación solar, el aire interno de los silos se calienta y las temperaturas alcanzan sus valores máximos. En contraste, al caer la noche, la temperatura interna disminuye.

La humedad relativa también muestra una tendencia inversa respecto a la temperatura, este fenómeno es típico en zonas de clima tropical seco como Puntarenas, donde las condiciones ambientales externas impactan directamente el microclima interno de estructuras de almacenamiento como los silos. De acuerdo con Tapia-Hernández et al. (2017), esta tendencia responde a que la capacidad del aire para retener vapor de agua aumenta con la temperatura, lo que provoca una disminución en la humedad relativa aunque el contenido de vapor se mantenga constante.

Figura 29

Variación de la temperatura (°C) y humedad relativa (%) externa en función del tiempo (minutos), registradas en los silos B2 y B4



El análisis en silos debe acompañarse de registradores de condiciones del aire, para registrar la interacción entre la temperatura y la humedad relativa debido a que determina el contenido de humedad de equilibrio del grano, lo cual afecta directamente su calidad (Yildirim y Ertekin (2001). Además, Raji y Favier (2004) explican que una mayor humedad ambiental puede inducir hinchamiento en los granos, se disminuye su resistencia mecánica y se favorecen los procesos de compactación vertical. Por otro lado, Suthar y Das (1996) señalan que el incremento en la humedad del aire también modifica propiedades físicas clave como

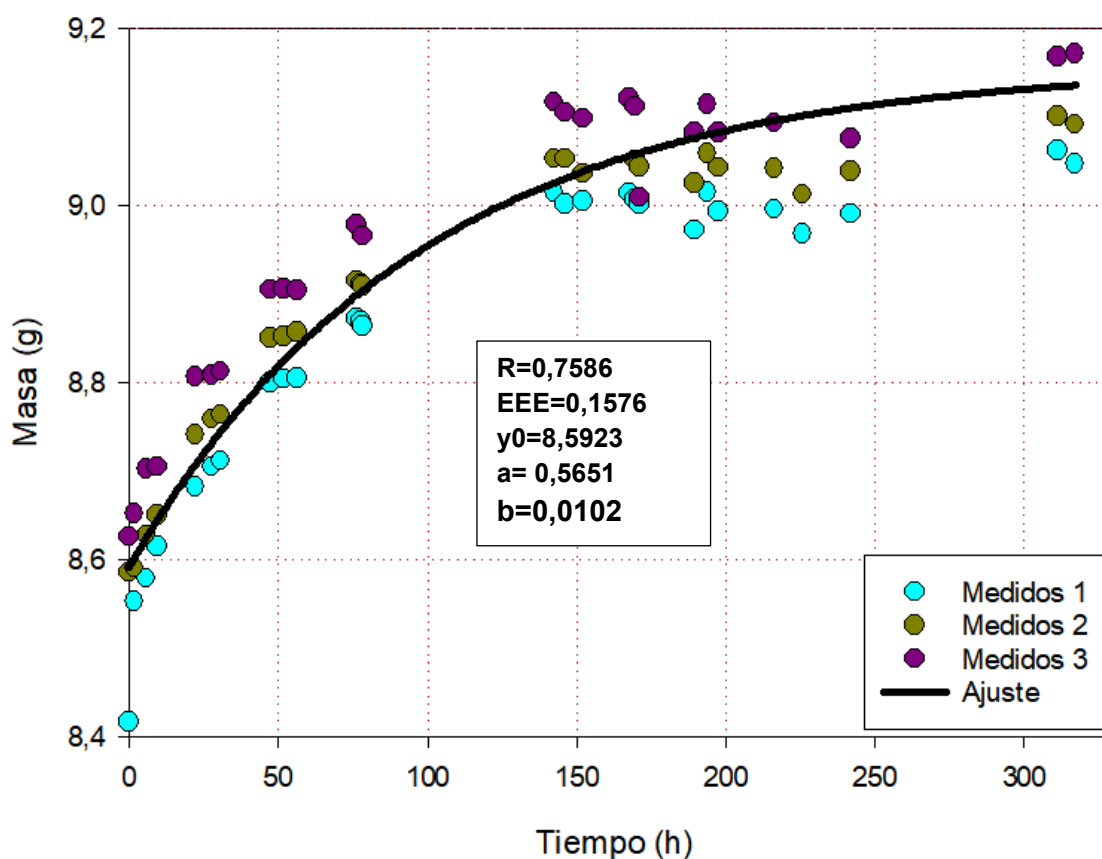
la densidad y la compresibilidad, aspectos relevantes en la dinámica de almacenamiento prolongado. En conjunto, estos hallazgos respaldan que las diferencias climáticas internas entre los silos pueden generar respuestas distintas en las propiedades físicas del trigo.

La estación lluviosa puede aumentar los valores reportados en esta investigación en más de 85 % de la humedad relativa y si los silos no protegieran a los granos de las condiciones climáticas adversas, puede observarse la predicción del aumento de la masa ante una condición de humedad relativa del 93 % como se observa en la cinética de adsorción de los granos.

La cinética de adsorción del agua en los granos de trigo (Figura 30) fue desarrollada por el método estático con una solución salina saturada de KNO_3 . Se observa que sigue una ecuación exponencial creciente tendenciosa hasta alcanzar un valor constante en la masa.

Figura 30

Evolución de la masa del grano en función del tiempo durante el proceso de adsorción, con tres repeticiones experimentales



Los resultados muestran que el proceso de adsorción sigue una tendencia creciente de tipo exponencial, en la cual la masa del grano aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor constante, indicativo del equilibrio higroscópico. De acuerdo con Jian et al. (2018), el proceso de adsorción puede dividirse en dos fases principales: una etapa inicial de rápida ganancia de masa, seguida por una fase de menor pendiente donde el sistema tiende al equilibrio higroscópico, este patrón es coincidente con lo estudiado por los autores en frijol rojo bajo condiciones controladas de temperatura y humedad relativa.

En ambos casos, el cambio en la masa del grano responde al gradiente de humedad entre el aire circundante y el interior del material, y está gobernado por mecanismos de difusión interna. Cuando el contenido de agua libre en la superficie del grano es bajo, el transporte de humedad ocurre predominantemente por difusión líquida o vapor a través de los poros internos, lo que genera una resistencia creciente conforme el proceso avanza (Jian et al., 2018).

Este tipo de respuesta, donde la fase de adsorción presenta una tendencia de tasa decreciente desde el inicio, ha sido ampliamente documentada para granos como trigo, arroz y frijol, cuya estructura interna dificulta la rápida movilidad del agua (Srikiatden & Roberts, 2007; Jian & Jayas, 2018). En este contexto, la evolución de la masa observada en la Figura 29 puede considerarse representativa de un proceso de adsorción dominado por mecanismos de difusión capilar y molecular en ausencia de agua libre.

Los resultados muestran una disminución progresiva del contenido de humedad del grano conforme disminuye la actividad de agua impuesta por el ambiente, lo que confirma el establecimiento de un equilibrio higroscópico entre el grano y el entorno circundante. Esta relación inversa es esperada y coincide con lo reportado en la literatura sobre la sorción de humedad en cereales almacenados (Raji y Favier, 2004).

La tabla 11 presentada muestra los parámetros de ajuste para distintas ecuaciones matemáticas utilizados en la representación de la curva de equilibrio higroscópico del trigo por adsorción. Se evaluaron siete ecuaciones: Oswin, Smith, Chung-Pfost, Caurie, Iglesias, White y Eyring, y Huhn. Para cada uno se reportaron los coeficientes (b_1 y b_2), el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de determinación ajustado (R^2 adj.), y el error estándar de estimación (EEE), lo cual permite valorar la calidad del ajuste.

Tabla 11

Parámetros del ajuste de la ecuación exponencial y calidad estadística del ajuste en cada punto de medición

Ecuación	b_1 (%)	b_2 (%)	R^2 (dec.)	R^2 adj (dec.)	EEE (%)
Oswin	11,163	0,362	0,961	0,941	0,907
Smith	4,803	-8,545	0,985	0,945	0,799
Chung-pfost	7,289	-7,567	0,974	0,961	0,741
Caurie	1,122	2,270	0,983	0,974	0,606
Iglesias	11,610	1,589	0,9094	0,864	1,384
White-Eyring	0,153	-0,124	0,973	0,959	0,757
Huhn	-1,583	10,876	0,910	0,8653	1,378

En términos generales, la ecuación de Smith obtuvo el máximo coeficiente de determinación (R^2) de 0,985 y un error estándar (EEE) de 0,799 %. Este resultado indica una excelente capacidad predictiva de la ecuación sobre los datos experimentales, con una desviación relativamente baja. ecuaciones como Caurie (EEE = 0,606 %) y Chung-Pfost (EEE = 0,741 %) también mostraron un buen ajuste, con valores de R^2 superiores a 0,96, lo cual los posiciona como otras alternativas.

Por otro lado, las ecuaciones como Huhn e Iglesias presentaron los desempeños más bajos, con coeficientes de determinación cercanos a 0,91 y errores mayores al 1,3 %, lo cual evidencia que no describen adecuadamente la relación entre la humedad del grano y la humedad relativa del ambiente en condiciones de equilibrio.

La superioridad de las ecuaciones como Smith, Chung-Pfost y Caurie puede explicarse por su capacidad para captar la naturaleza sigmoideal de la curva de sorción típica de productos higroscópicos como los granos, donde se observa una baja absorción en humedades relativas menores al 50 %, seguida de un aumento exponencial conforme se alcanza el umbral crítico de absorción de agua (Chen & Morey, 1989). Permiten representar con precisión el punto de inflexión que marca el inicio de la tendencia capilar, que es fundamental para entender la interacción grano-atmósfera.

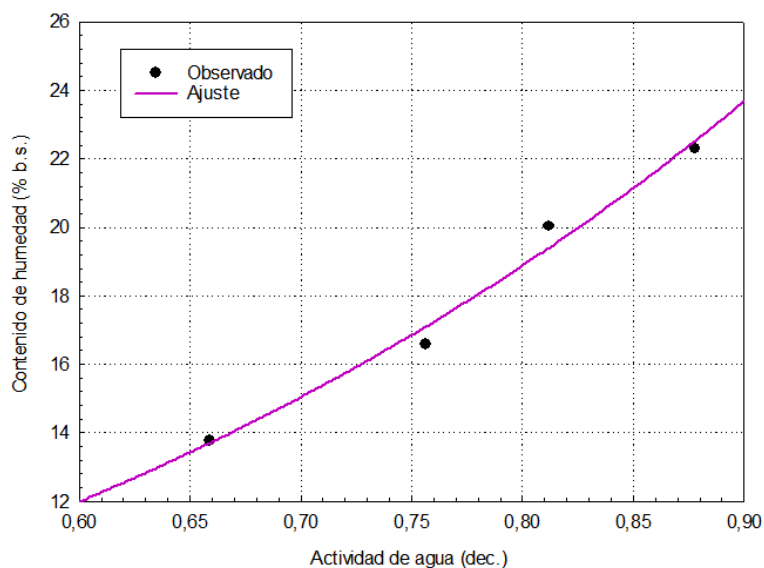
Además, los coeficientes obtenidos (b_1 y b_2) permiten establecer la forma específica del ajuste. Por ejemplo, en la ecuación de Smith, el coeficiente negativo b_2 sugiere una pendiente descendente al aumentar la humedad relativa, lo cual coincide con la tendencia observada en tus datos experimentales con soluciones salinas (NaCl al 75 % y KNO₃ al 93 % HR).

Cabe resaltar que la ecuación de Caurie, pese a su simplicidad, logró un excelente ajuste, con el menor error estándar de estimación del conjunto. Esto lo convierte en una alternativa práctica y confiable para predicciones rápidas del contenido de humedad de equilibrio en sistemas de almacenamiento. La curva de equilibrio higroscópico permite anticipar riesgos de deterioro por absorción excesiva de humedad, fermentaciones indeseadas o proliferación de hongos (Arévalo-Pinedo & Murr, 2006).

La figura 31 muestra la curva de equilibrio higroscópico del trigo, construida a partir de la cinética de adsorción de agua, se varió el contenido de humedad y su respectiva actividad de agua (a_w) en trigo de calidad media y a una temperatura de isoterma (constante) de 25 °C. Los datos medidos fueron ajustados con ecuaciones exponenciales decrecientes como se observa en el apéndice determinando que el el mejor ajuste fue la ecuación de Caurie.

Figura 31

Isoterma de adsorción a 25 °C en granos de trigo por el método estático y ajustado con la ecuación de Caurie



La ecuación de Caurie es una herramienta predictiva para la actividad de agua en el rango entre 0,6 y 0,9. La relevancia desde el punto de vista industrial consiste en que simula las condiciones de almacenamiento de los granos en silos, especialmente en zonas con alta humedad ambiental.

La aplicación de la ecuación de Caurie al equilibrio higroscópico por adsorción coincide con lo reportado por Wang et al. (2012), quienes evaluaron la adsorción de humedad en trigo y observaron que la afinidad del grano por el agua es mayor en condiciones de baja humedad, lo cual se traduce en un cambio más pronunciado en el contenido de humedad en niveles intermedios y altos de actividad de agua. Al comparar los parámetros obtenidos en ambos estudios, se observa que, aunque se utilizó la misma ecuación, existen variaciones en los coeficientes b_1 y b_2 probablemente asociadas a las condiciones experimentales, como la variedad del trigo, la temperatura y la preparación de las muestras. En este trabajo, la ecuación de Caurie determinó valores de 1,122 y 2,270 para b_1 y b_2 respectivamente, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,983 y un error estándar de estimación (EEE) de 0,606 %, lo cual sugiere un excelente ajuste. Estas diferencias reflejan que, si bien la forma función la ecuación es la misma, los parámetros deben ajustarse a las condiciones específicas del estudio para garantizar una representación precisa de la tendencia higroscópica del grano.

El rango de actividad de agua de 0,6 a 0,9 también coincide con otras investigaciones, donde Usman et al. (2023) analizaron el contenido de humedad de equilibrio en distintas variedades de trigo, se observaron valores similares a los encontrados en esta investigación, así como se destacó la influencia del genotipo y de la estructura interna del grano en la capacidad de adsorción. Zhang et al. (2021) evaluaron la tendencia higroscópica del salvado de trigo chino y aplicaron ecuaciones de predicción similares, se encontró que la ecuación de Caurie ofrecía un ajuste adecuado en condiciones ambientales controladas, con errores relativos bajos.

La caracterización de la adsorción de agua en los granos de trigo no solo permite ajustar fenómenos higroscópicos, sino que resulta clave para comprender los procesos de compactación vertical durante el almacenamiento. La ganancia de humedad por adsorción genera hinchamiento en la estructura del grano, lo cual altera su densidad aparente, cohesión interna y la tendencia mecánica bajo carga, afecta directamente la estabilidad del material almacenado (Raji & Favier, 2004; Chen et al., 2019). de humedad y el grado de compactación observado en los silos (Guzmán et al., 2017).

5.3. Propiedades físicas

La respuesta física del trigo almacenado dentro de un silo industrial depende en gran medida de las condiciones psicométricas internas, específicamente de la temperatura y la humedad relativa del aire. Estas variables no solo influyen en el contenido de humedad del grano, sino también en su densidad, cohesión y capacidad de compactarse verticalmente con el paso del tiempo. La empresa trabaja con tres calidades distintas de trigo: suave, medio y duro.

La tabla 12 presenta los resultados de las pruebas físicas realizadas al trigo de calidad suave. El contenido de humedad promedio fue de 12,43 % con una desviación estándar de $\pm 0,21$, valor que se mantuvo estable en las distintas muestras tomadas del silo B4. La densidad aparente fue de 771,04 kg/m³ ($\pm 2,18$), mientras que la densidad real registró un promedio de 1253,90 kg/m³ ($\pm 31,29$). En cuanto a la actividad de agua, medida en grano molido, se obtuvo un valor medio de 0,628 ($\pm 0,015$), el cual se encuentra dentro de los límites de seguridad para el almacenamiento.

Tabla 12

Promedio de las pruebas físicas para trigo de calidad suave

Muestra	Contenido de humedad (%) [*]	Densidad aparente (kg/m ³) [*]	Densidad real (kg/m ³) [*]	Actividad de agua ^{**}
M 1	12,13 $\pm$ 0,41	773,60 $\pm$ 1,46	1283 $\pm$ 21	0,6258 $\pm$ 0,01
M 2	12,24 $\pm$ 0,35	773,60 $\pm$ 4,21	1288 $\pm$ 11	0,6108 $\pm$ 0,00
M 3	12,40 $\pm$ 0,54	771,97 $\pm$ 2,25	1257 $\pm$ 73	0,6138 $\pm$ 0,00
M 4	12,60 $\pm$ 0,37	770,27 $\pm$ 2,22	1258 $\pm$ 41	0,6148 $\pm$ 0,00
M 5	12,54 $\pm$ 0,33	773,89 $\pm$ 3,34	1220 $\pm$ 17	0,6130 $\pm$ 0,00
M 6	12,60 $\pm$ 0,48	769,75 $\pm$ 3,16	1274 $\pm$ 52	0,6077 $\pm$ 0,00
M 7	12,16 $\pm$ 0,52	769,92 $\pm$ 4,09	1206 $\pm$ 47	0,6072 $\pm$ 0,00
M 8	12,43 $\pm$ 0,39	769,35 $\pm$ 2,35	1270 $\pm$ 45	0,6052 $\pm$ 0,01
M 9	12,78 $\pm$ 0,42	769,10 $\pm$ 3,96	1298 $\pm$ 39	0,6123 $\pm$ 0,01
M 10	12,55 $\pm$ 0,31	767,73 $\pm$ 4,19	1295 $\pm$ 43	0,6512 $\pm$ 0,03

*Nota: *Medición en trigo grano entero. **Medición en trigo molido.*

En la Tabla 13 se reportan los resultados obtenidos mediante el equipo Dickey-John, el cual permite registrar múltiples variables de forma automatizada y con alta precisión. Las mediciones indicaron un contenido de humedad promedio de 12,36 % ($\pm 0,02$), una densidad aparente de 789,34 kg/m³ ($\pm 0,59$), y una temperatura media de 24,3 °C ($\pm 0,74$). La homogeneidad de los valores obtenidos evidencia la estabilidad higrométrica y térmica del trigo de calidad suave, se confirman condiciones ambientales estables dentro del silo.

Tabla 13

Promedio de las pruebas físicas en Dickey John para trigo de calidad suave

Muestra	Contenido de humedad (%)	Densidad aparente (kg/m³)	Temperatura (°C)
M 1	12,33 $\pm$ 0,12	789,00 $\pm$ 0,10	25,17 $\pm$ 0,78
M 2	12,37 $\pm$ 0,06	789,33 $\pm$ 0,31	23,07 $\pm$ 1,06
M 3	12,37 $\pm$ 0,06	788,33 $\pm$ 0,21	23,20 $\pm$ 0,17
M 4	12,32 $\pm$ 0,07	788,33 $\pm$ 0,15	24,47 $\pm$ 0,15
M 5	12,33 $\pm$ 0,15	788,67 $\pm$ 0,40	23,70 $\pm$ 0,53
M 6	12,31 $\pm$ 0,06	790,00 $\pm$ 0,52	23,17 $\pm$ 0,47
M 7	12,33 $\pm$ 0,06	788,33 $\pm$ 0,15	23,43 $\pm$ 0,47
M 8	12,30 $\pm$ 0,08	789,00 $\pm$ 0,20	23,77 $\pm$ 0,40
M 9	12,40 $\pm$ 0,06	788,33 $\pm$ 0,15	24,07 $\pm$ 0,45
M 10	12,40 $\pm$ 0,10	786,00 $\pm$ 0,50	23,90 $\pm$ 0,26

Nota: Mediciones realizadas en trigo grano entero.

Al comparar ambos métodos, se observa que el contenido de humedad obtenido en laboratorio fue de 12,43 % ($\pm 0,21$), mientras que el equipo Dickey-John registró un valor ligeramente inferior de 12,36 % ($\pm 0,02$). La diferencia es mínima, pero el método indirecto mostró una dispersión considerablemente menor.

En cuanto a la densidad aparente, el valor promedio medido manualmente fue de 771,04 kg/m³ ($\pm 2,18$), en tanto que con el Dickey-John se obtuvo un promedio más alto de 789,34 kg/m³ ($\pm 0,59$), se refleja una diferencia de 18,3 kg/m³ entre ambos métodos.

La Tabla 14 presenta los resultados de las pruebas físicas obtenidas a partir de mediciones con instrumentos tradicionales de laboratorio para el trigo de calidad media. El contenido de humedad promedio fue de 9,58 % con una desviación estándar de $\pm 0,27$, mientras que la densidad aparente se situó en $777,42 \text{ kg/m}^3$ ($\pm 1,68$). La densidad real alcanzó un promedio de $1232,2 \text{ kg/m}^3$ ($\pm 0,03$), y la actividad de agua, determinada en grano molido, se mantuvo en $0,649$ ($\pm 0,025$). Estos resultados reflejan una ligera mayor variabilidad en la humedad respecto a calidades más suaves, aunque sin comprometer la estabilidad del grano. Las muestras fueron tomadas del silo B4, con altura de 9,76 m, y durante el mismo periodo de almacenamiento de 24 días.

Tabla 14

Promedio de propiedades físicas en el equipo Dickey John para el trigo de calidad media

Muestra	Contenido de humedad (%)	Densidad aparente (kg/m^3)	Densidad real (kg/m^3)*	Actividad de agua **
M 1	$9,91 \pm 0,23$	$778,84 \pm 2,12$	1198 ± 21	$0,6290 \pm 0,02$
M 2	$9,62 \pm 0,28$	$773,90 \pm 4,44$	1235 ± 11	$0,6501 \pm 0,01$
M 3	$9,65 \pm 0,17$	$777,87 \pm 2,09$	1198 ± 15	$0,6262 \pm 0,01$
M 4	$9,88 \pm 0,27$	$777,21 \pm 1,06$	1257 ± 41	$0,6317 \pm 0,01$
M 5	$9,89 \pm 0,40$	$777,74 \pm 2,23$	1220 ± 17	$0,6316 \pm 0,01$
M 6	$9,09 \pm 0,29$	$778,80 \pm 2,16$	1205 ± 43	$0,6250 \pm 0,02$
M 7	$9,53 \pm 0,40$	$778,26 \pm 2,89$	1228 ± 45	$0,6513 \pm 0,01$
M 8	$9,51 \pm 0,31$	$778,38 \pm 3,10$	1275 ± 45	$0,6755 \pm 0,01$
M 9	$9,27 \pm 0,36$	$778,28 \pm 2,00$	1298 ± 21	$0,6810 \pm 0,01$
M 10	$9,42 \pm 0,28$	$774,89 \pm 1,18$	1208 ± 20	$0,6929 \pm 0,01$

Nota: *Medición en trigo grano entero. **Medición en trigo molido.

Por su parte, la Tabla 15 muestra las mediciones realizadas con el equipo Dickey-John, cuya tecnología automatizada facilita un mayor control sobre la precisión y consistencia

de los datos. El contenido de humedad promedio fue de 12,35 % ($\pm 0,04$), la densidad aparente fue de 788,63 kg/m³ ($\pm 1,11$), y la temperatura interna de las muestras fue de 23,8 °C ($\pm 0,61$). Estos valores son consistentes entre sí y reflejan una alta uniformidad física del trigo de calidad media, sin diferencias relevantes entre los puntos de muestreo verticales del silo.

Tabla 15

Resultados de pruebas físicas en el equipo Dickey John para el trigo de calidad media

Muestra	Contenido de humedad (%)	Densidad aparente (kg/m³)	Temperatura (°C)
M 1	13,00 $\pm$ 0,10	797,33 $\pm$ 0,06	22,97 $\pm$ 0,59
M 2	12,90 $\pm$ 0,06	796,17 $\pm$ 0,08	21,67 $\pm$ 0,86
M 3	12,93 $\pm$ 0,06	795,67 $\pm$ 0,06	21,37 $\pm$ 1,14
M 4	12,92 $\pm$ 0,08	797,17 $\pm$ 0,13	22,23 $\pm$ 0,60
M 5	12,90 $\pm$ 0,10	797,00 $\pm$ 0,20	22,50 $\pm$ 0,75
M 6	12,87 $\pm$ 0,10	796,83 $\pm$ 0,21	21,58 $\pm$ 0,71
M 7	12,87 $\pm$ 0,15	796,33 $\pm$ 0,31	21,67 $\pm$ 0,97
M 8	12,87 $\pm$ 0,05	795,83 $\pm$ 0,19	22,30 $\pm$ 0,75
M 9	12,87 $\pm$ 0,06	795,33 $\pm$ 0,15	21,70 $\pm$ 0,26
M 10	12,93 $\pm$ 0,15	794,00 $\pm$ 0,17	23,23 $\pm$ 0,15

Nota: Mediciones realizadas en grano entero.

En el trigo de calidad media, el contenido de humedad determinado por el método tradicional fue de 9,58 % ($\pm 0,27$), mientras que con el Dickey-John se registró un valor más alto de 12,35 % ($\pm 0,04$), con una diferencia de aproximadamente 2,77 puntos porcentuales. Esta discrepancia puede estar relacionada con el tipo de grano utilizado para cada medición (entero vs. molido) o el momento de la lectura. Respecto a la densidad aparente, los valores también difieren: el método convencional arrojó un promedio de 777,42 kg/m³ ($\pm 1,68$), y el Dickey-John mostró 788,63 kg/m³ ($\pm 1,11$), lo cual resulta en una diferencia de más de 11 kg/m³ entre métodos.

La Tabla 16 presenta los resultados de las pruebas físicas realizadas para el trigo de calidad dura mediante instrumentos de laboratorio. El contenido de humedad promedio fue de 9,20 % con una desviación estándar de $\pm 0,06$, se indica un control adecuado de las condiciones de almacenamiento. La densidad aparente fue de $772,26 \text{ kg/m}^3$ ($\pm 3,40$), mientras que la densidad real mostró un promedio de $1234,9 \text{ kg/m}^3$ ($\pm 0,05$), lo que sugiere una ligera mayor variabilidad estructural del grano en comparación con las calidades suave y media. En cuanto a la actividad de agua, el valor promedio fue de $0,629$ ($\pm 0,013$), manteniéndose dentro de los parámetros de equilibrio higroscópico recomendados para cereales almacenados. Las mediciones de humedad y densidades se realizaron en grano entero, y la actividad de agua en grano molido, tal como lo señala la nota metodológica.

Tabla 16

Promedio de características físicas para el trigo de calidad dura

Muestra	Contenido de humedad (%)	Densidad aparente (kg/m^3)	Densidad real (kg/m^3)*	Actividad de agua **
M 1	$9,27 \pm 0,24$	$765,13 \pm 2,50$	1283 ± 21	$0,6062 \pm 0,01$
M 2	$9,22 \pm 0,13$	$770,82 \pm 4,09$	1288 ± 11	$0,6352 \pm 0,01$
M 3	$9,32 \pm 0,07$	$775,76 \pm 1,51$	1257 ± 73	$0,6187 \pm 0,00$
M 4	$9,24 \pm 0,05$	$769,84 \pm 3,56$	1158 ± 41	$0,6223 \pm 0,01$
M 5	$9,20 \pm 0,10$	$770,98 \pm 5,00$	1220 ± 17	$0,6429 \pm 0,01$
M 6	$9,14 \pm 0,08$	$770,60 \pm 4,13$	1174 ± 52	$0,6290 \pm 0,01$
M 7	$9,15 \pm 0,08$	$775,37 \pm 2,59$	1206 ± 47	$0,6432 \pm 0,01$
M 8	$9,15 \pm 0,08$	$773,85 \pm 2,98$	1270 ± 45	$0,6182 \pm 0,01$
M 9	$9,12 \pm 0,12$	$775,20 \pm 0,83$	1298 ± 39	$0,6470 \pm 0,03$
M 10	$9,21 \pm 0,08$	$775,02 \pm 4,06$	1195 ± 43	$0,6299 \pm 0,02$

*Nota: *Medición en trigo grano entero. **Medición en trigo molido.*

En la Tabla 17 se reportan los resultados obtenidos con el equipo de medición indirecta Dickey-John. Las muestras de trigo duro presentaron una humedad promedio de 11,80 % ($\pm 0,04$), levemente superior a la registrada con el método tradicional. La densidad aparente alcanzó un promedio de 787,89 kg/m³ ($\pm 1,12$), y la temperatura de las muestras se mantuvo estable, con un valor medio de 24,3 °C ($\pm 0,57$). Estos resultados muestran una alta consistencia en las mediciones automatizadas, sin diferencias sustanciales entre los distintos puntos verticales del silo, lo cual indica una buena distribución térmica e higrométrica durante el almacenamiento.

Tabla 17

Resultados de pruebas físicas en el equipo Dickey John para el trigo de calidad dura

Muestra	Contenido de humedad (%)	Densidad aparente (kg/m³)	Temperatura (°C)
M 1	11,73 $\pm$ 0,05	785,83 $\pm$ 3,31	24,83 $\pm$ 0,24
M 2	11,78 $\pm$ 0,04	788,67 $\pm$ 1,03	25,18 $\pm$ 0,31
M 3	11,82 $\pm$ 0,08	787,83 $\pm$ 3,49	24,92 $\pm$ 0,27
M 4	11,80 $\pm$ 0,00	787,67 $\pm$ 2,16	25,03 $\pm$ 0,12
M 5	11,77 $\pm$ 0,05	787,33 $\pm$ 1,75	24,63 $\pm$ 0,45
M 6	11,83 $\pm$ 0,05	788,33 $\pm$ 2,07	23,50 $\pm$ 0,31
M 7	11,82 $\pm$ 0,04	789,17 $\pm$ 1,94	24,05 $\pm$ 0,66
M 8	11,80 $\pm$ 0,00	788,17 $\pm$ 2,32	24,43 $\pm$ 0,70
M 9	11,80 $\pm$ 0,00	787,83 $\pm$ 2,04	23,88 $\pm$ 0,25
M 10	11,87 $\pm$ 0,08	787,00 $\pm$ 2,53	23,17 $\pm$ 0,32

Nota: Mediciones realizadas en grano entero.

Para el trigo duro, el contenido de humedad obtenido mediante el método de laboratorio fue de 9,20 % ($\pm 0,06$), mientras que el Dickey-John registró un promedio de 11,80 % ($\pm 0,04$), se refleja una diferencia significativa de 2,6 puntos porcentuales. En cuanto a la densidad aparente, el método convencional presentó un valor de 772,26 kg/m³ ($\pm 3,40$),

mientras que el Dickey-John midió $787,89 \text{ kg/m}^3 (\pm 1,12)$, con una diferencia de $15,63 \text{ kg/m}^3$ entre ambos resultados. En ambos casos, el equipo de medición indirect arroja valores más elevados y con menor variabilidad.

Al comparar los dos métodos empleados para la caracterización física del trigo almacenado en el silo B4, se evidencia una diferencia en el contenido de humedad. Mientras que el método tradicional de laboratorio arrojó promedios entre 9,2 % y 12,4 % según la calidad del grano, el equipo Dickey-John mostró valores más elevados y estables, entre 11,8 % y 12,4 %. Esta diferencia de hasta 2,7 puntos porcentuales entre métodos es considerable y fácilmente detectable para cualquier lector o evaluador técnico. A pesar de ello, ambos métodos se complementan: el Dickey-John ofrece mayor precisión y menor dispersión en variables como humedad y densidad aparente, ideal para monitoreo operativo; en cambio, el método de laboratorio permite acceder a variables clave como densidad real y actividad de agua, necesarias para interpretar efectos como la compactación y el equilibrio higroscópico. En función de estos hallazgos, no se recomienda basar futuras investigaciones únicamente en el Dickey-John, ya que las diferencias observadas en los valores de humedad podrían llevar a interpretaciones sesgadas del estado físico real del grano.

Durante los 24 días de almacenamiento en el silo B4, se recolectaron muestras en distintos puntos verticales para cada calidad de trigo. Esta distribución permite considerar la influencia de la altura de la columna de grano sobre las propiedades físicas evaluadas. Sin embargo, no se observaron patrones claros de variación de humedad o densidad asociados directamente con la altura o el punto de muestreo. En otras palabras, las propiedades físicas del trigo fueron consistentes en toda la columna vertical, sin tendencia sistemática en las capas superiores o inferiores del silo. Esto sugiere que, a pesar del tiempo de almacenamiento, no se alcanzó un grado de compactación fácilmente detectable a partir de los valores de densidad aparente, lo cual podría atribuirse a una redistribución inicial del grano tras el llenado o a condiciones internas relativamente estables durante el período de estudio.

El trigo clasificado como de calidad media presentó valores intermedios tanto en contenido de humedad como en densidad real, en comparación con los extremos representados por las variedades suave y dura. En términos de variabilidad entre calidades, el trigo suave mostró el mayor contenido de humedad (12,4 %) y la menor densidad aparente (771 kg/m^3), lo que indica una mayor proporción de espacios intergranulares y una menor masa específica por unidad de volumen. Esta condición sugiere una estructura más laxa y

porosa, lo que puede favorecer procesos de compactación progresiva bajo condiciones de presión.

En contraste, el trigo duro presentó el contenido de humedad más bajo (9,2 %) y la mayor densidad real ($1234,9 \text{ kg/m}^3$), lo cual es característico de una estructura interna más compacta, con menor contenido de aire intergranular y mayor resistencia mecánica a la deformación. Estas propiedades físicas confieren al trigo duro una mayor resistencia inicial a la compactación, aunque, superado cierto umbral crítico de presión o humedad, dicha resistencia puede ceder bruscamente, provocando una compactación más abrupta.

El comportamiento del trigo de calidad media se ubicó entre ambos extremos, reflejando características físicas intermedias. Estas diferencias estructurales entre las variedades de trigo permiten explicar parcialmente la variabilidad observada en los ensayos de compactación, ya que los granos con mayor densidad y menor porosidad interna tienden a oponer mayor resistencia a la deformación, pero muestran una transición más rápida hacia la compactación una vez superado el umbral de resistencia.

Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con lo reportado por Zhao et al. (2022), quienes documentaron densidades comparables bajo condiciones similares. Asimismo, Rubillos et al. (2024) señalaron que los granos de trigo tienden a alcanzar una condición higroscópica de equilibrio en torno al 11 % de contenido de humedad, lo cual fue corroborado por los datos experimentales aquí obtenidos. Además, investigaciones previas de Guan y Zhang (2009) y Raji & Favier (2004) demostraron que el incremento en el contenido de humedad incrementa la cohesión entre partículas, lo cual incide directamente en la susceptibilidad del material a la compactación bajo cargas aplicadas.

6. Conclusiones

1. La compactación del trigo almacenado ocurre principalmente en las primeras 3 semanas y tiende a estabilizarse rápidamente, debido a estas características la ecuación exponencial decreciente ajustó adecuadamente.
2. El análisis superficial del nivel de los granos de trigo evidenció que la variación de la altura ocurrió desuniformemente, se observó que en los puntos donde con hubo mayor disminución coincidió con la cercanía de calles internas y externas, donde los factores externos como la vibración generada por tránsito pesado y maquinaria cercana, influyeron en los niveles de compactación.
3. Se elaboró la curva de equilibrio higroscópico del trigo de calidad media con la ecuación de Caurie a 25 °C. Los puntos experimentales mostraron contenidos de humedad de 12,11 % ($a_w = 0,659$), 14,22 % ($a_w = 0,756$), 16,69 % ($a_w = 0,812$) y 18,23 % ($a_w = 0,878$). El ajuste de Caurie presentó $R^2 = 0,983$ y $EEE = 0,606$ %, con parámetros $b_1 = 1,122$ y $b_2 = 2,270$, adecuados para actividades de agua $> 0,7$.
4. El contenido de humedad aumentó de manera proporcional con la actividad de agua, pasando de 12,11 % a $a_w = 0,659$ hasta 18,23 % a $a_w = 0,878$ bajo 25 °C, lo que confirma la alta afinidad del trigo por el agua en condiciones de humedad relativa elevada.
5. La caracterización física tras 24 días en el silo B4 evidenció diferencias entre calidades: el trigo suave presentó mayor humedad y menor densidad aparente ($12,43 \% \pm 0,21$; $771,04 \text{ kg/m}^3 \pm 2,18$; densidad real $1253,90 \text{ kg/m}^3 \pm 31,29$; $a_w 0,628 \pm 0,015$), el trigo de calidad media mostró $9,58 \% \pm 0,27$; $777,42 \text{ kg/m}^3 \pm 1,68$; $1232,2 \text{ kg/m}^3 \pm 0,03$; $a_w 0,649 \pm 0,025$, y el trigo duro $9,20 \% \pm 0,06$; $772,26 \text{ kg/m}^3 \pm 3,40$; $1234,9 \text{ kg/m}^3 \pm 0,05$; $a_w 0,629 \pm 0,013$. No se observó efecto de la compactación sobre las propiedades físicas analizadas.
6. El análisis de las propiedades físicas del trigo se mantuvieron prácticamente constante cuando se analizó una columna vertical con granos a partir del muestreo por trasiego, y se verificó que las condiciones fueron adecuadas para el almacenamiento. Este resultado respalda la estabilidad del grano durante el periodo de estudio y aporta evidencia técnica para la gestión confiable de inventarios en silos industriales.

7. Recomendaciones

1. El diseño de una planta de proceso debe evitar colocar los silos en zonas donde haya tránsito constante de vehículos pesados o maquinaria que pueda generar vibraciones, ya que esto aumenta la compactación en los sitios de mayor vibración.
2. La calidad del trigo depende de la variedad por lo tanto se sugiere determinar la curva de adsorción del equilibrio higroscópico en función de esta propiedad.
3. La investigación en compactación debe aumentar a más de cuatro puntos de observación porque se determinó que es desuniforme a nivel superficial y debe incluirse el punto central.
4. El uso del medidor indirecto de humedad agiliza las mediciones, sin embargo, se debe realizar una verificación del contenido de humedad por el método directo (horno de convección forzada), principalmente cuando se trata de tres calidades del trigo.
5. Se recomienda el uso combinado de ambos métodos en estudios futuros: el Dickey-John como herramienta operativa para seguimiento continuo y los métodos de laboratorio para validación y análisis estructural del grano.
6. Se debe incorporar muestreos a diferentes tiempos de almacenamiento (no solo a los 24 días) y en más niveles verticales del silo, para estudiar la evolución de la compactación en función del tiempo y las condiciones ambientales internas.
7. Se recomienda tener en cuenta la calidad del trigo como variable estructural crítica, ya que su relación con la humedad, la densidad y la respuesta mecánica influye directamente en el fenómeno de compactación.

8. Apéndices

Tabla A.1

Medición de la disminución de la altura dentro de los silos utilizados para efectuar las mediciones

Día de medición	Silo B2				Silo B4			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,20	1,00	1,30	1,00	0,30	0,10	1,20	0,20
18	0,80	1,00	1,80	1,40	1,00	1,00	0,40	0,20
23	0,10	3,10	0,10	0,10	0,00	0,10	0,20	0,20

Tabla A.2

Resultados del índice de compactación en los silos B2 y B4

Silo	Repetición	Índice de Compactación (%)			
		Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
B2	1	0,056	0,262	0,164	0,128
B2	2	0,046	0,211	0,113	0,077
B4	1	0,102	0,113	0,061	0,041

Tabla A.3

Parámetros de ajuste de la ecuación de Midilli para la altura del trigo almacenado en diferentes puntos del silo B2 en la primera repetición

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coefficiente de regresión				
a	5,521	-0,199	8,768	7,404
b	1947,000	1947,433	1947,000	1947,000
k	0,003	6,537 E-14	0,004	0,004
n	1,027	2,878 E-09	1,037	1,029
Parámetros estadísticos				
R^2	0,995	0,8331	0,998	0,999
EEE	0,050	1,104	0,079	0,050

Tabla A.4

Parámetros de ajuste de la ecuación de Page Desarrollada para la altura del trigo almacenado en diferentes puntos del silo B2 en la primera repetición

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coefficiente de regresión				
a	1947,000	1947,600	1947,030	1947,018
b	1945,823	-8208,023	7.734	-5528,840
k	0,003	1,894E-09	9,294E-05	2,286E-05
n	3,002	3,955	0,949	0,8334
Parámetros estadísticos				
R^2	0,995	0,972	0,974	0,962
EEE	0,050	0,455	0,310	0,217

Tabla A.5

Parámetros de ajuste de la ecuación lineal para la altura del trigo almacenado en diferentes puntos del silo B2 en la primera repetición.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coefficiente de regresión				
a	36,412	22,287	23,043	24,134
he	1945,108	1943,020	1943,473	1944,133
hi	1947,076	1947,443	1947,022	1946,968
Parámetros estadísticos				
R^2	0,950	0,8331	0,974	0,976
EEE	0,138	0,987	0,280	0,206

Figura A.1

Ajuste del cambio de altura en función del tiempo en el Silo B2 para la primera repetición según las ecuaciones utilizadas.

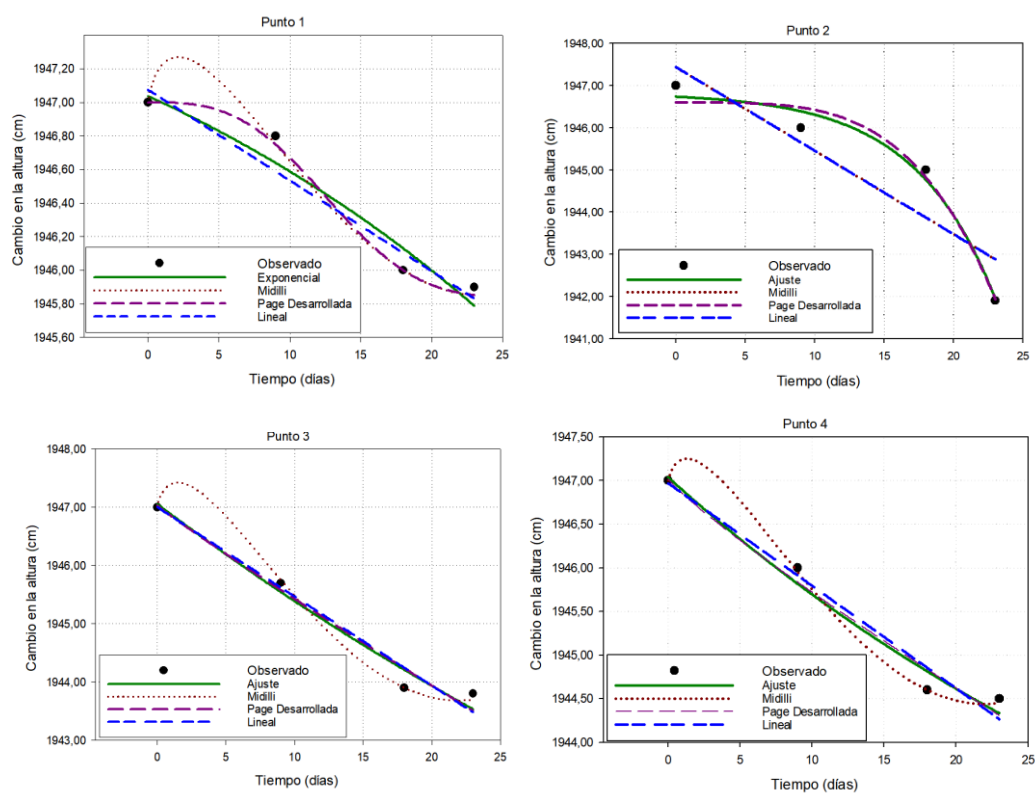


Tabla A.6

Parámetros de ajuste de la ecuación de Midilli para la altura del trigo almacenado en diferentes puntos del silo B2 en la segunda repetición

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coefficiente de regresión				
a	5,521	-0,198	8,768	7,404
b	1947,000	1947,44	1947,000	1947,000
k	0,003	6,537E-14	0,004	0,004
n	1,027	2,877E-09	1,037	1,030
Parámetros estadísticos				
R^2	0,995	0,8331	0,998	0,998
EEE	0,050	1,104	0,079	0,050

Tabla A.7

Parámetros de ajuste de la ecuación de Page Desarrollada para la altura del trigo almacenado en diferentes puntos del silo B2 en la segunda repetición

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coefficiente de regresión				
a	1947,000	1946,600	1947,030	1947,018
b	1945,829	-8208,028	7,733	-5528,845
k	0,003	1,894E-09	9,290E-05	2,268E-05
n	3,002	3,954	0,988	0,884
Parámetros estadísticos				
R^2	0,995	0,972	0,974	0,978
EEE	0,050	0,455	0,310	0,217

Tabla A.8

Parámetros de ajuste de la ecuación lineal para la altura del trigo almacenado en diferentes puntos del silo B2 en la segunda repetición

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coefficiente de regresión				
a	36,416	22,287	23,043	24,140
he	1945,108	1943,020	1943,474	1944,133
hi	1947,076	1947,443	1947,002	1946,968
Parámetros estadísticos				
R^2	0,950	0,833	0,974	0,976
EEE	0,138	0,988	0,280	0,206

Figura A.2

Ajuste del cambio de altura en función del tiempo en el Silo B2 para la segunda repetición según las ecuaciones utilizadas.

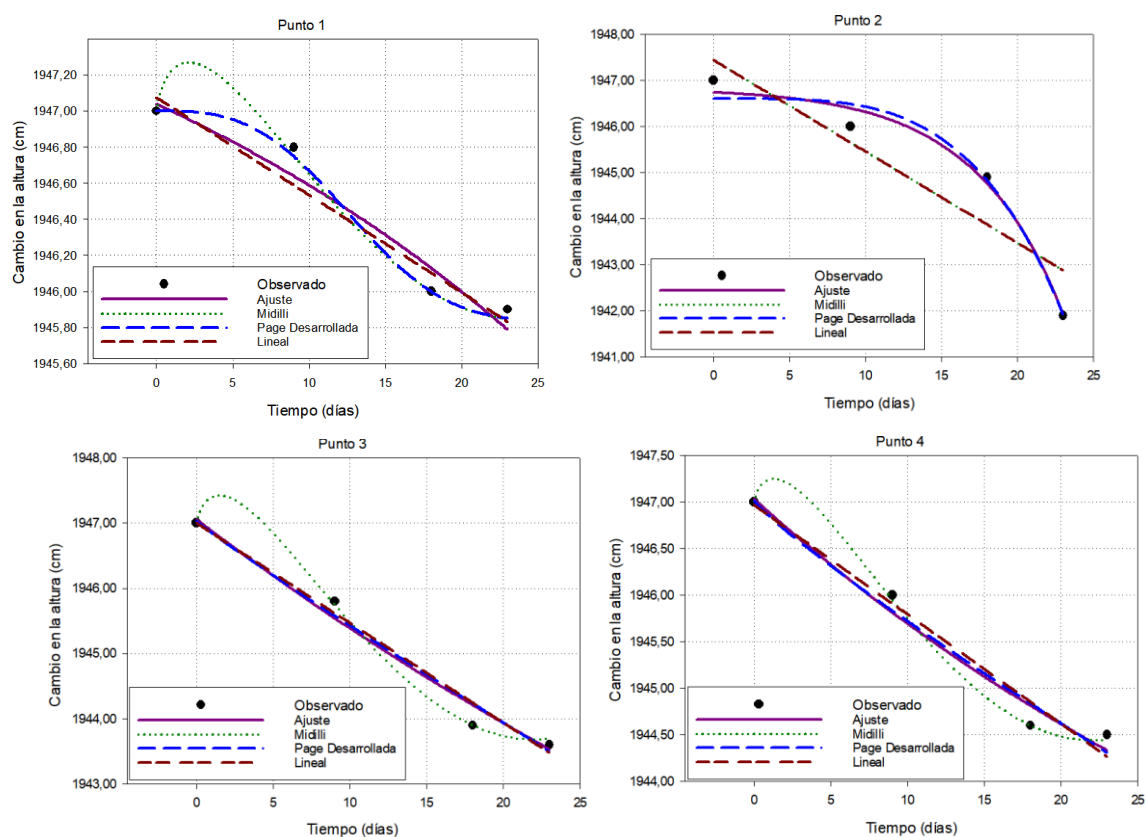


Tabla A.9

Parámetros de ajuste de la ecuación de Midilli para la altura del trigo almacenado en diferentes puntos del silo B4

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coeficiente de regresión				
a	5,260	5,006	-0,032	2,276E-05
b	976,000	976,000	976,000	976,995
k	0,005	0,005	0,006	1,144E-05
n	1,049	1,051	0,027	1,301
Parámetros estadísticos				
R^2	1	1	1	0,925
EEE	+inf	+inf	+inf	+inf

Tabla A.10

Parámetros de ajuste de la ecuación de Page Desarrollada para la altura del trigo almacenado en diferentes puntos del silo B4.

	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
Coeficiente de regresión				
a	976,035	976,058	976,000	975,995
b	-4197,298	-65,558	-93914,834	-34769,161
k	6,723E-06	1,060E-05	5,371E-06	3,052E-07
n	1,194	1,538	0,097	1,267
Parámetros estadísticos				
R^2	0,929	0,923	1	0,993
EEE	+inf	+inf	+inf	+inf

Figura A.3

Ajuste del cambio de altura en función del tiempo en el Silo B4 según las ecuaciones utilizadas

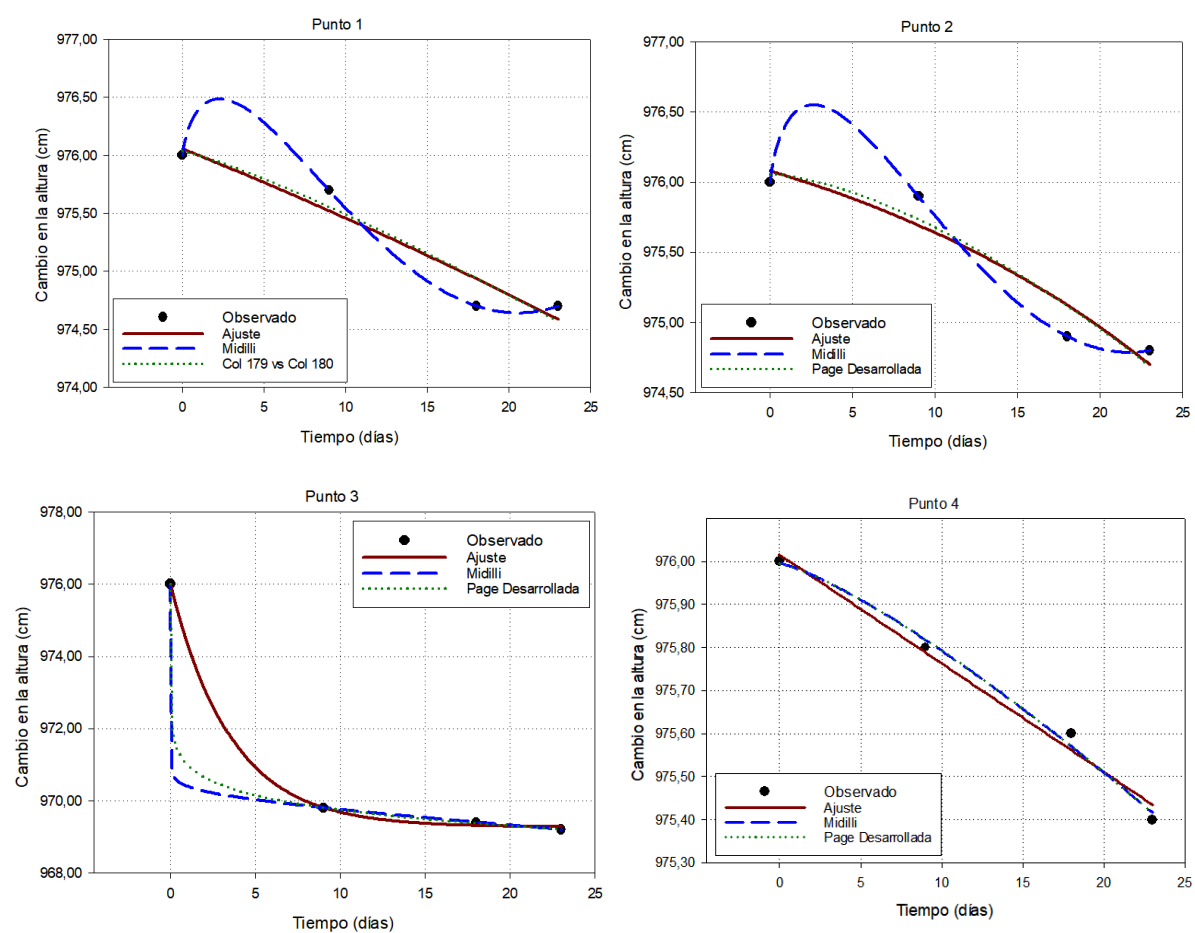
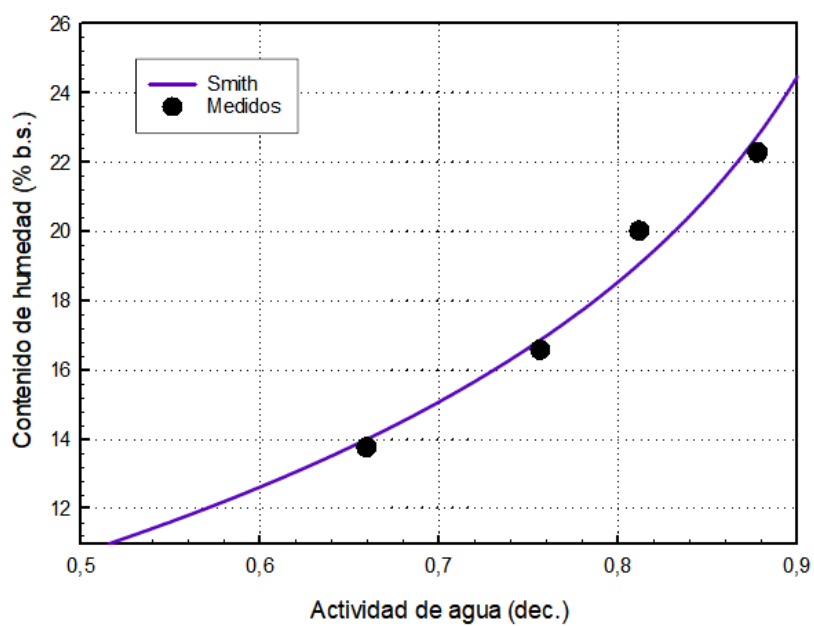


Figura A.4

Ajuste de la curva de equilibrio higroscópico a la ecuación Smith

**Figura A.5**

Ajuste de la curva de equilibrio higroscópico a la ecuación Chung-Pfost

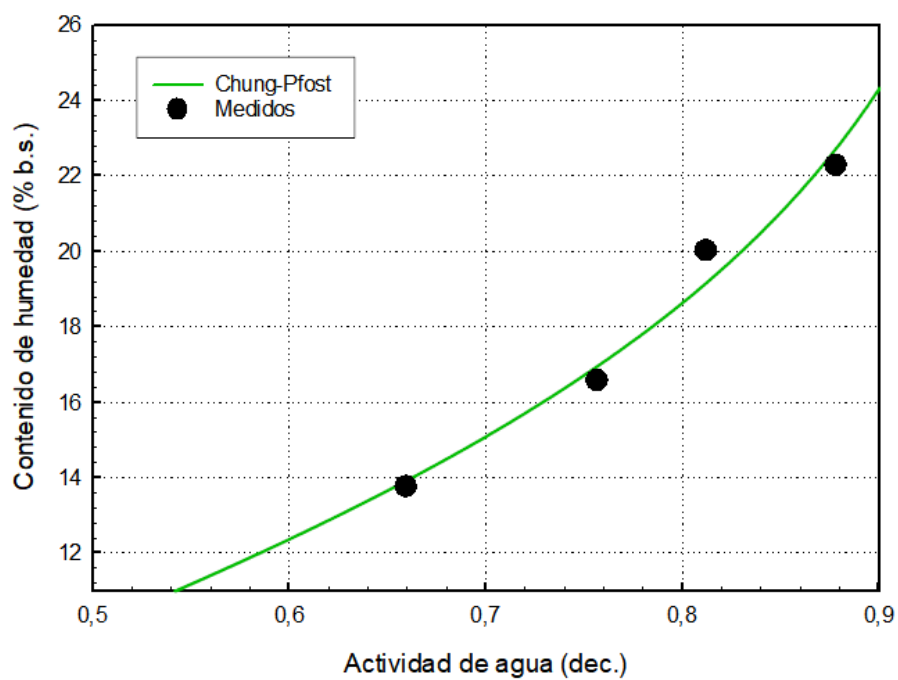
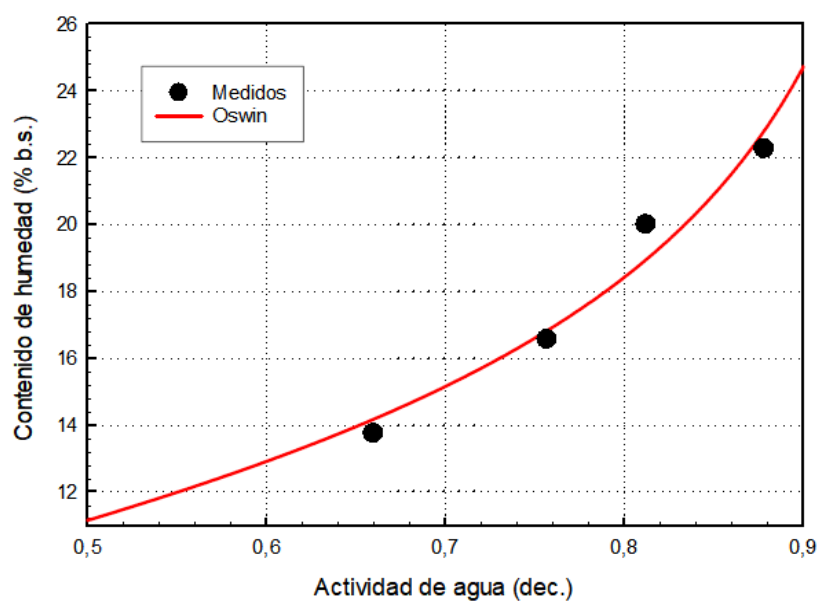


Figura A.6

Ajuste de la curva de equilibrio higroscópico a la ecuación Oswin

**Figura A.8**

Análisis de residuos de la ecuación de Caurie aplicado a la adsorción de humedad en trigo

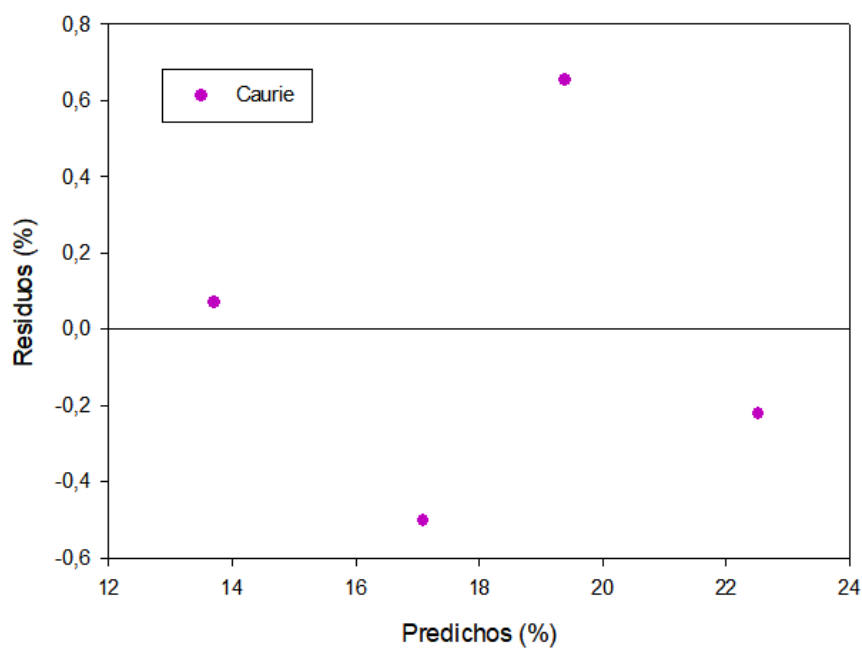
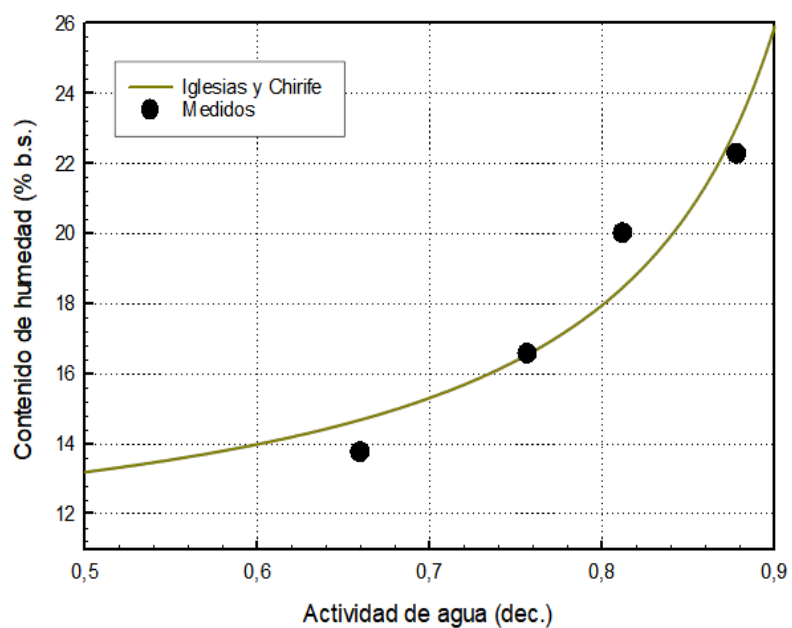


Figura A.9

Ajuste de la curva de equilibrio higroscópico a la ecuación Caurie

**Figura A.10**

Ajuste de la curva de equilibrio higroscópico a la ecuación White y Eyring

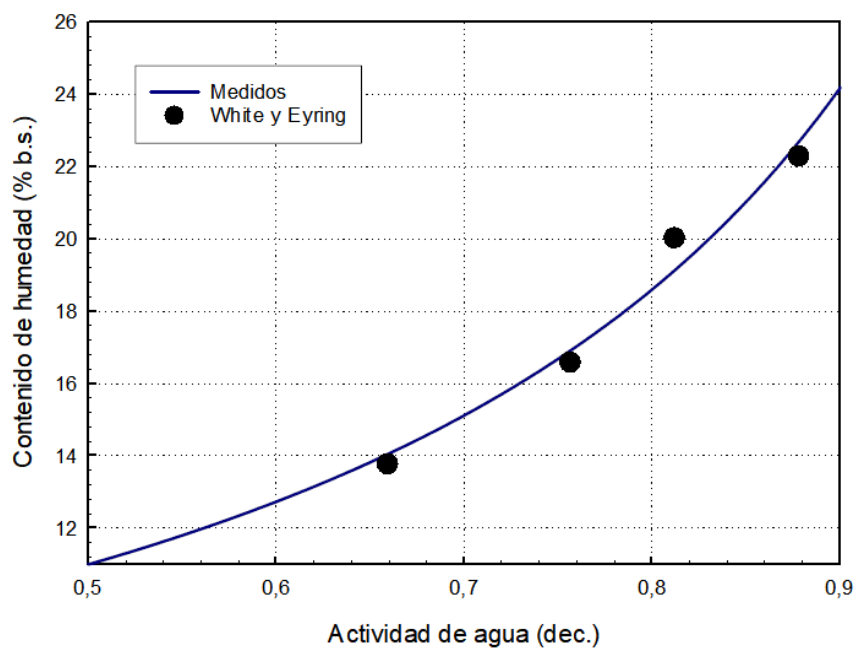
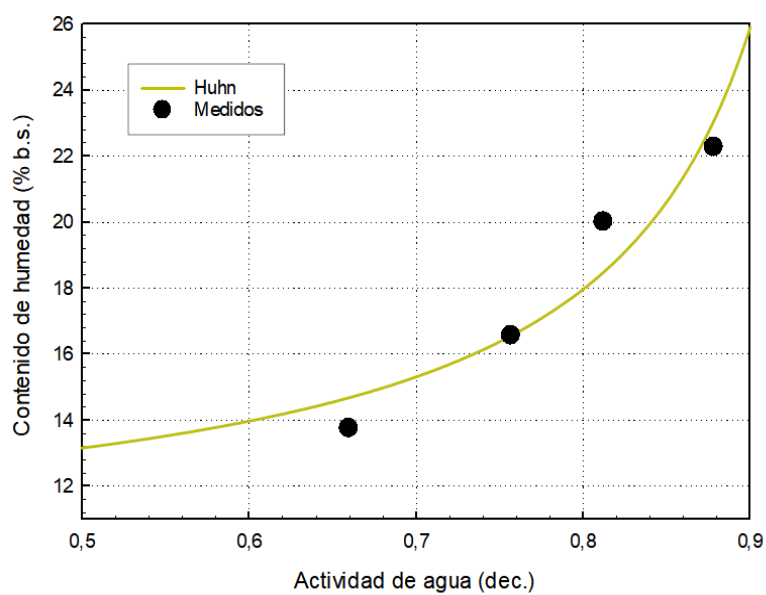
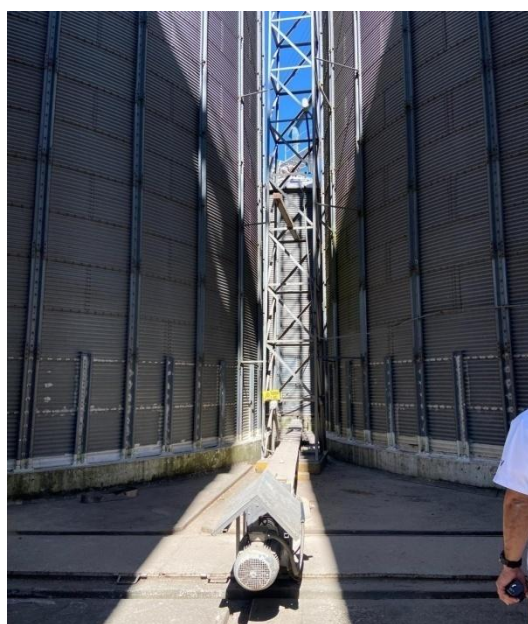


Figura A.11

Ajuste de la curva de equilibrio higroscópico a la ecuación Huhn.

**Figura A.12**

Configuración externa del transportador helicoidal conectado al silo B4 (a) y configuración externa (b) con la seña de papel como indicador de la finalización del muestreo



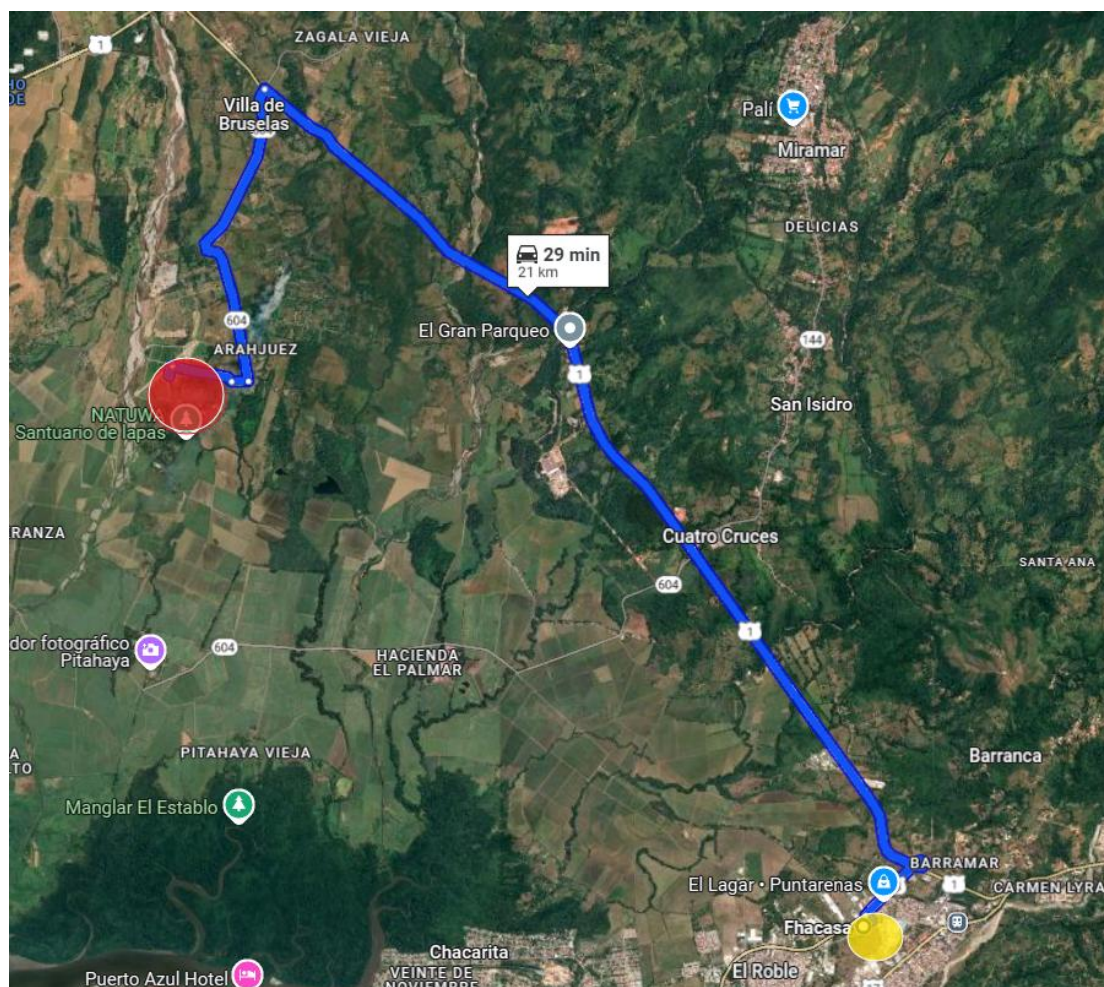
(a)



(b)

Figura A.13

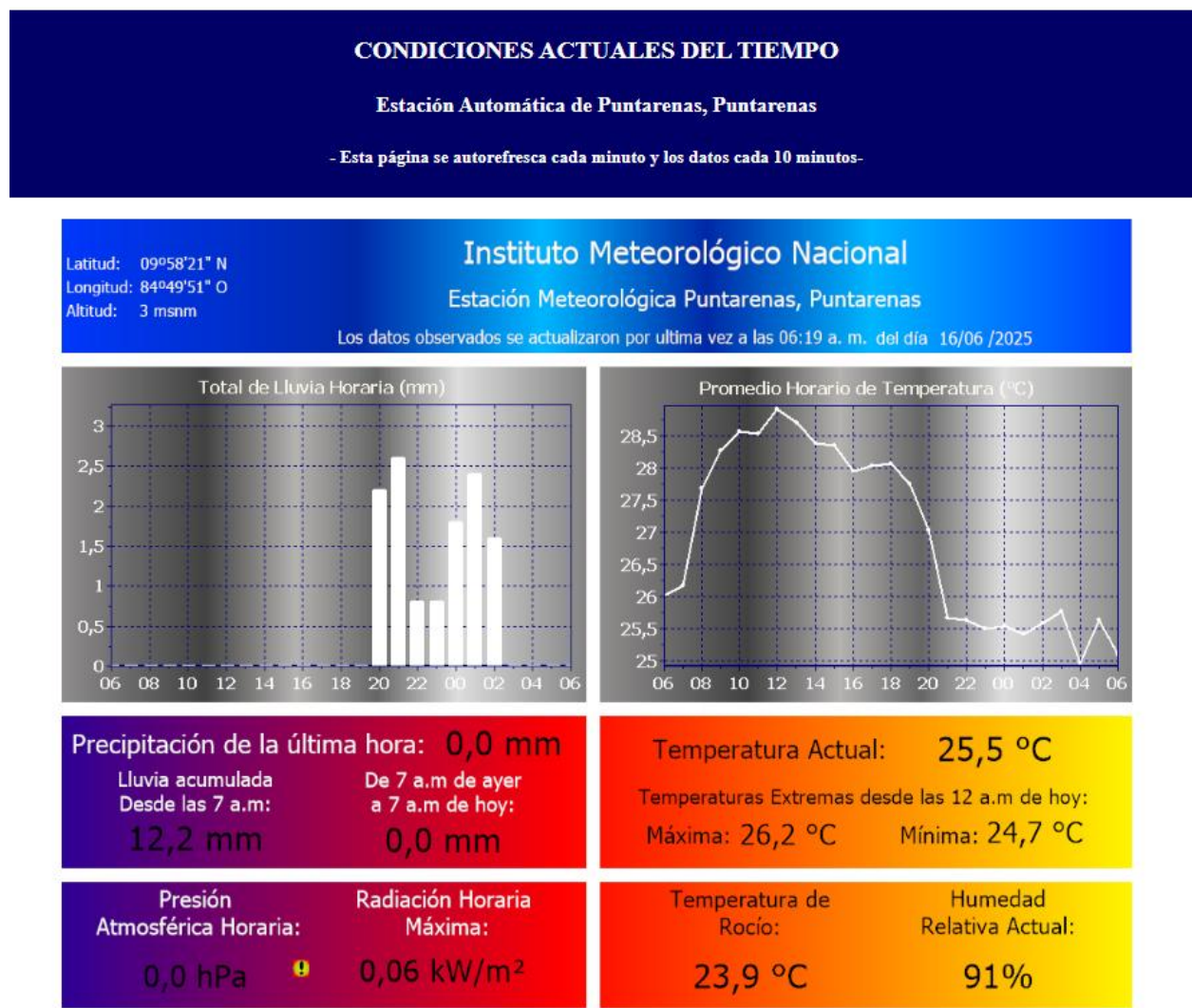
Distancia entre FHACASA (Amarillo) y la Estación Meteorológica de Puntarenas del Instituto Meteorológico Nacional (Rojo).



Nota. Tomado de Google Maps (Google, 2025).

Figura A.14

Condiciones meteorológicas actuales en Puntarenas registradas por la Estación Automática del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), incluyendo el promedio horario de temperatura (°C), precipitación acumulada (mm) y humedad relativa (%). Datos correspondientes al 01 de junio de 2025.



Nota. Tomado del *Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica* (IMN, 2025).

9. Referencias Bibliográficas

- Abarca, R. (2017). *Estudio del proceso de torrefacción del café (Coffea arabica) en tostador convencional* [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica].
- Arévalo-Pinedo, A., & Murr, F. E. X. (2006). Influência da temperatura de secagem nas propriedades físicas e químicas do mamão em fatias. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 26(1), 167–172. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612006000100026>
- Athanassiou, C. G., & Buchelos, C. T. (2020). Grain properties and insect distribution trends in silos of wheat. *Journal of Stored Products Research*, 88, 101632. <https://doi.org/10.1007/s41348-022-00668-7> (verificar DOI)
- Barrantes, M. (2022). *Efecto del tipo de beneficiado en la torrefacción de los granos de café (Coffea arabica)* [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica].
- Bertrand, T., González, A., & Thomas, C. (2018). The simultaneous discharge of liquid and grains from a silo. *Powder Technology*, 336, 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.05.061>
- Boac, J. M., Bhadra, R., Casada, M. E., Thompson, S. A., Turner, A. P., Montross, M. D., & Maghirang, R. G. (2015). Stored grain pack factors for wheat: Comparison of three methods to field measurements. *Transactions of the ASABE*, 58(4), 1089–1101. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10898>
- Bougayr, E. H., Lakhal, E. K., Idlimam, A., Lamharrar, A., Kouhila, M., & Berroug, F. (2017). Experimental study of hygroscopic equilibrium and thermodynamic properties of sewage sludge. *Applied Thermal Engineering*, 125, 929–938. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.117>
- Cámara Costarricense de la Industria Alimentaria. (2023, mayo 31). *Directorio industrial de CACIA: Planificación y repostería*. <https://www.cacia.org/directorioWeb/categoria-64.html>
- Chen, Y., Liang, C., Wang, X., Guo, X., Chen, X., & Liu, D. (2019). Static pressure distribution characteristics of powders stored in silos. *Chemical Engineering Research and Design*, 154, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.10.030>
- Chen, C., & Morey, R. V. (1989). Comparison of equilibrium relative humidity equations for grains. *Transactions of the ASAE*, 32(3), 983–990. <https://doi.org/10.13031/2013.31023>
- Chen, C. (2005). Moisture sorption isotherms of wheat at different temperatures and its application in modeling drying and storage. *Journal of Stored Products Research*, 41(3), 327–338. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2004.05.003>

- Corrêa, P. C., Goneli, A. L. D., Oliveira, G. H. H., & Valente, D. S. M. (2012). Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in different processing levels. *Journal of Food Engineering*, 108(3), 507–512. (añadir DOI si disponible)
- deMan, J. M., Finley, J. W., Hurst, W. J., & Lee, C. Y. (2018). *Principles of food chemistry* (4th ed.). Springer.
- Escobar, G. A. C., Guzmán, N. G., Herrera, H. A. V., & Cruz, C. M. A. (2020). Moisture dynamic sorption isotherms and thermodynamic properties of parchment specialty coffee (*Coffea arabica* L.). <https://doi.org/10.25186/v15i.1684> (verificar revista/URL/DOI)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, & World Health Organization. (2023). *Codex Alimentarius*. <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/en/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2011). *Rural structures in the tropics: Design and development* (Chap. 16: Grain crop drying, handling and storage). FAO. <https://www.fao.org/4/i2433e/i2433e10.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1994). *Grain storage techniques: Evolution and trends in developing countries* (FAO Agricultural Services Bulletin No. 109). <https://www.fao.org/4/s1250e/S1250E0u.htm>
- Gaume, J., Pouliquen, O., & Forterre, Y. (2022). Rheology of granular flows in silos: Role of the inertial number. *Granular Matter*, 24, 115–130. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.01992> (preprint/arXiv; si hay versión en revista, usar ese DOI)
- Guan, W., & Zhang, Q. (2009). The effect of moisture content and compaction on the strength and arch formation of wheat flour in a model bin. *Journal of Food Engineering*, 90(2), 306–313. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.026>
- Horabik, J., & Molenda, M. (2014). Mechanical properties of granular materials and their impact on load distribution in silo: A review. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 45(4), 203–211. <https://doi.org/10.1515/sab-2015-0001>
- Hosseini-Motlagh, S. M., Samani, M. R. G., & Abbasi Saadi, F. (2021). Strategic optimization of wheat supply chain network under uncertainty: A real case study. *Operational Research*, 21(3), 1487–1527. <https://doi.org/10.1007/s12351-019-00515-y>
- Hurburgh, C. R., Brumm, T. J., & Converse, H. H. (1986). Comparison of moisture determination methods for grains. *Transactions of the ASAE*, 29(6), 1749–1753. <https://doi.org/10.13031/2013.30336>

- Instituto Meteorológico Nacional. (2023, mayo 31). *Resumen meteorológico de diciembre 2022: Boletín meteorológico mensual*. <https://www.imn.ac.cr/web/imn/boletin-meteorologico>
- Jakšić, Z., Vasiljević, D., Šćepanović, J., & Vrhovac, S. (2012). Compaction dynamics of vibrated granular materials. *Scientific Technical Review*, 62(3–4), 39–44. Recuperado de https://mail.ipb.ac.rs/~jaksic/zole/bib/str_2012.pdf
- Jian, F., & Jayas, D. S. (2023). *Grains: Engineering fundamentals of drying and storage*. CRC Press.
- Karunakaran, C., Jayas, D. S., & White, N. D. G. (2001). Detection of fungal infection and insect infestation in stored bulk wheat using near-infrared reflectance imaging. *Transactions of the ASAE*, 44(2), 373–378. <https://doi.org/10.13031/2013.6035>
- Keskin, S., & Ozkaya, H. (2015). Effect of storage and insect infestation on the technological properties of wheat. *CyTA – Journal of Food*, 13(1), 134–139. <https://doi.org/10.1080/19476337.2014.919962>
- Kibar, H. (2015). Influence of storage conditions on the quality properties of wheat varieties. *Journal of Stored Products Research*, 62, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2015.03.001>
- Kocabiyik, H., Kayisoglu, B., & Serin, S. (2010). Determination of equilibrium moisture content of wheat and barley using different methods. *Journal of Food Engineering*, 100(1), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.027>
- Ministerio de Comercio Exterior. (2015). *Cereales y productos de la molinería*. <https://www.comex.go.cr/media/5077/documento-cereales-y-productos-de-la-molineria.pdf>
- Menezes, M., Melo, D., Santos, R., Acosta, L., da Silva, N., & Carteri, P. (2023). Monitoring of intergranular variables for predicting technical breakage of wheat grains stored in vertical silos. *Journal of Stored Products Research*, 102, 102115. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102115>
- Molenda, M., & Horabik, J. (2005). Mechanical properties of granular materials and their effect on load distribution in silo structures. *Powder Technology*, 157(2), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.026>
- Nagnath, G. M., Beena, V. K., Shashikumar, M., Shweta, R., & Hegde, V. S. (2020). Traditional methods of food grains preservation and storage in Nigeria and India. *Food Control*, 112, 107109. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.107109>
- Labuza, T. P. (1984). *Moisture sorption: Practical aspects of isotherm measurement and use*. American Association of Cereal Chemists.

- Lisowski, A., Wójcik, J., Klonowski, J., Sypuła, M., Chlebowski, J., Kostyra, K., ... Piątek, M. (2020). Compaction of chopped material in a mini silo. *Biomass and Bioenergy*, 139, 105631. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105631> (si hay >20 autores, listar 19, ..., último)
- Olán, M. D. L. O., Espitia Rangel, E., López Sánchez, H., Villaseñor Mir, H. E., Peña Bautista, R. J., & Herrera Hernández, J. (2012). Calidad física de grano de trigos harineros (*Triticum aestivum* L.) mexicanos de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(2), 271–283.
- Optika. (2023, febrero 2). *Laboratory electronic balances* [Archivo PDF]. <https://www.optika-italy.com/es/categoria-producto/balanzas/>
- Ordóñez, M. R., Gely, M. C., & Pagano, A. M. (2012). Estudio de las propiedades físicas y de la cinética de secado de granos de maíz colorado duro. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 3(3), 153–(páginas completas). (completar páginas/URL)
- Pascot, A., Marouazi, G., & Kiesgen De Richter, S. (2021). Discharge of a granular silo under mechanical vibrations. *EPJ Web of Conferences*, 249, 03037. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124903037>
- Pramiu, P. V., Rizzi, R. L., Galante, G., Rizzi, C. B., & Coelho, S. R. M. (2019). Modeling grains hydration considering volumetric variations of spherical and elliptical geometries. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 105007. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105007>
- Quemada-Villagómez, L. I., Molina-Herrera, F. I., Carrera-Rodríguez, M., Calderón-Ramírez, M., Martínez-González, G. M., Navarrete-Bolaños, J. L., & Jiménez-Islas, H. (2020). Numerical study to predict temperature and moisture profiles in unventilated grain silos at prolonged time periods. *International Journal of Thermophysics*, 41(5), 1–28. <https://doi.org/10.1007/s10765-020-02636-5>
- Raudienė, E., Rušinskas, D., Balčiūnas, G., Juodeikienė, G., & Gailius, D. (2017). Carbon dioxide respiration rates in wheat at various temperatures and moisture contents. *MAPAN*, 32, 51–58. <https://doi.org/10.1007/s12647-016-0202-4>
- Rice-Birchall, E., Faulkner, D. R., & Bedford, J. D. (2022). The effect of grain size and porosity on the nature of compaction localisation in high-porosity sandstone. *Journal of Structural Geology*, 164, 104740. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2022.104740>
- Rodríguez Jiménez, M., & Lara Rivera, R. (2009). *Informe de aforo de silos: Instalaciones de la Fábrica Centroamericana de Harina, S.A. (FHACASA), en Barranca, Puntarenas*. R. Lara Ingeniería, S.A.

- Rosentrater, K. A. (2022). Overview of storage systems for cereal grains and grain products. En K. A. Rosentrater (Ed.), *Storage of cereal grains and their products* (5.^a ed., pp. 41–80). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812758-2.00013-1>
- Rondet, E., Delalonde, M., Chuetor, S., & Ruiz, T. (2017). Modeling of granular material's packing: Equivalence between vibrated solicitations and consolidation. *Powder Technology*, 310, 287–294. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.056>
- Russo, P., Chiofalo, V., & Licitra, G. (2011). Modeling and analysis of stored grain behavior: Effects of loading and unloading cycles in vertical silos. *Journal of Stored Products Research*, 47(3), 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2011.03.001>
- Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. (2024, junio). *Boletín estadístico agropecuario N.º 34: Serie cronológica 2020–2023 (SEPSA-INF-2024-012)*. Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2014). *Introduction to food engineering* (5th ed.). Academic Press.
- Sigrimis, N., Bartzanas, T., & Panagakis, P. (2010). Post-harvest technology and grain storage. En *CIGR handbook of agricultural engineering* (Vol. IV: Information technology). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Suaza-Montalvo, A., Cares-Pacheco, M. G., & Falk, V. (2023). Time-dependent behaviour of industrial granular materials under vibration: Modelling and phenomenology. *Chemical Engineering Science*, 271, 118571. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118571>
- Stout, W., & Bauma, G. D. (1998). *Storage of cereal grains and their products* (4th ed.). American Association of Cereal Chemists.
- Tapia-Hernández, J. A., Martínez-Bustos, F., Katouzian, I., & López-Malo, A. (2017). Relative humidity. En *Nanoencapsulation technologies for the food and nutraceutical industries* (pp. 183–192). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809436-5.00010-5>
- Trejo Salazar, F. S. (2020). *Optimización de las técnicas de almacenamiento del trigo en silos metálicos en la empresa Molinera* [Tesis de maestría, Universidad de César Vallejo].
- Troccoli, A., & Borrelli, G. M. (1999). Relationship between kernel size features and test weight in *Triticum durum*. *Cereal Chemistry*, 76(1), 45–49. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.1.45>
- U.S. Department of Agriculture. (2023, mayo 12). *World agricultural supply and demand estimates* (Informe WASDE-636). Office of the Chief Economist. <https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/may-2023-wasde-lockup-briefing.pdf>

- Usman, M., Gul, I., Ahmad, I., & Rehman, S. (2023). Equilibrium moisture content and heat of sorption of wheat varieties. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.226087>
- Valerio, C. O., Vargas, E. G., & Barboza, B. L. (2020). Modelado de la cinética de hidratación del frijol Matambú (*Phaseolus vulgaris*) utilizando un sistema automático basado en análisis de imágenes digitales. *Ingeniería*, 30(2), 63–76. <https://doi.org/10.15517/ri.v30i2.39588>
- Valerio, O. (2016). *Cinética de la masa y expansión volumétrica del frijol en hidratación* [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica].
- Vargas-Elías, G. (2014). *Cinética do aquecimento, expansão volumétrica e perda de massa em grãos de café durante a torrefação* [Tesis de doctorado, Universidade Federal de Viçosa].
- Viana, J. L., Botelho, F. M., Bechlin, T. R., Botelho, S., & de Oliveira, G. H. H. (2017). Modelagem matemática da contração volumétrica de grãos de sorgo. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1013175> (agregar revista/evento/editores si aplica)
- Wang, L., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Sun, J. C. (2012). Thermodynamic properties of moisture adsorption of whole wheat. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(7), 1487–1494. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.02996.x>
- Zeymer, J. S., Guzzo, F., de Araujo, M. E. V., Gates, R. S., Corrêa, P. C., Vidigal, M. C. T. R., & Neisse, A. C. (2021). Machine learning algorithms to predict the dry matter loss of stored soybean grains (*Glycine max* L.). *Journal of Food Process Engineering*, 44(10), e13820. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13820>
- Zivković, S., Jakšić, Z. M., Šćepanović, J. R., Lončarević, I., Budinski-Petković, Lj., & Vrhovac, S. B. (2013). Fractional kinetic model for granular compaction. *The European Physical Journal B*, 86, 461. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2013-40455-x>
- Zhang, J., Li, X., Chen, W., & Zhao, D. (2021). Sorption equilibrium moisture and isosteric heat of Chinese wheat bran. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 239–246. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.004>
- Zhao, W., Liu, S., Li, X., Han, X., & Yang, H. (2022). Fast and accurate wheat grain quality detection based on improved YOLOv5. *Computers and Electronics in Agriculture*, 202, 107426. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107426>