

■ Refrigeración Artificial de un Silo de Maíz: Ensayo Exploratorio

Autores: Ing. Agr. Roskopf Rubén Darío¹, Ing. Agr. Ph.D. Ricardo Bartosik², Ing. Agr. Leandro Cardoso².
(1) INTA PRECOP AER Totoras. (2) INTA PRECOP E.E.A. INTA Balcarce.

■ Resumen

De todos los factores que condicionan la duración del periodo de almacenaje de granos, la temperatura y la humedad del grano son las dos variables que mas afectan la actividad metabólica de los granos y de los organismos que viven entre y dentro de ellos. En la medida que ambos factores sean mas elevados mayor será la actividad metabólica, mayor la pérdida de peso y de calidad, y por ende menor el tiempo de almacenamiento. Una importante forma de actuar para aumentar el periodo de almacenamiento, sin disminuir la calidad, es disminuyendo la temperatura de la masa de granos. La experiencia consistió en insuflar aire frío a un silo en condiciones controladas de temperatura y humedad. El objetivo fue recopilar información técnica del proceso de refrigeración de un silo de maíz y determinar el consumo total de energía del equipo a lo largo del ciclo de refrigeración. Se midió la evolución de la temperatura de los granos y otras variables complementarias a lo largo del ensayo. El equipo logró reducir la temperatura de toda la masa de granos (aproximadamente 2500 t de maíz) en 4°C (de 15,95 a 11,95°C en promedio) cuando fue programado para suministrar aire a 10 °C. El tiempo demandado para completar el enfriamiento de toda la masa de granos fue de 240 horas, el consumo eléctrico total fue de 8352 kw con un costo total aproximado de \$1419,8 (0,57 \$/t).

■ Introducción

Al almacenar granos, sin importar el sistema usado, el objetivo en primera instancia es retenerlo durante un determinado tiempo tratando de preservar su calidad a medida que transcurre el tiempo.

Sin embargo existen muchos factores tanto bióticos (insectos, hongos, etc.), como abióticos (temperatura del grano y humedad) además de su calidad intrínseca (granos dañados, partidos, etc.) que pueden condicionar severamente la duración del periodo de almacenaje y la evolución de la calidad del mismo a través del tiempo.

De todos los factores, la temperatura y la humedad del grano son las dos variables que mas afectan la actividad metabólica de los granos y de los organismos que viven entre y dentro de ellos. En la medida que ambos factores sean mas elevados mayor será la actividad metabólica, mayor la pérdida de peso y de calidad, y por ende menor el tiempo de almacenamiento. (Bartosik y col 2007)

Una forma de actuar para extender el periodo de almacenamiento es a través del control de la humedad del grano. En este caso, si el granel tiene humedad por arriba de la tolerancia de recibo y no se dispone de un buen sistema de aireación, o las condiciones ambientales no lo permiten, es conveniente pasarlo por la secadora para disminuir su contenido de humedad y de esa forma preservarlo del desarrollo de insectos y hongos.

Otra forma importante de actuar para aumentar el periodo de almacenamiento sin disminuir la calidad es disminuyendo la temperatura de la masa de granos (Lima. 2005). En nuestro país la técnica de enfriamiento de granos es incipiente y escasamente desarrollada, mientras que en otros países de climas tropicales con temperaturas medias mas elevadas, en donde las condiciones del aire caliente no son suficientes para bajar la temperatura de los granos, la utilización de equipos para refrigerar es más habitual.

La refrigeración de granos consiste en modificar y acondicionar artificialmente el aire atmosférico entregándolo al granel a una temperatura mas baja que la ambiental. También en algunos casos y según los equipos, se puede modificar el contenido de humedad del aire para evitar el rehumedecimiento o sobresecado de la masa de granos durante el proceso de refrigeración.

Diversas son las ventajas citadas de la refrigeración:

- Reduce las pérdidas de peso debido a reducción del metabolismo: al bajar la temperatura, la tasa respiratoria de los granos disminuye, con lo cual disminuye la pérdida de peso, nutrientes y la generación de calor. Esto permite almacenar el granel por un periodo de tiempo significativamente mayor, conservando la calidad del producto
- Disminuye la reproducción de insectos y la actividad de hongos: la temperatura óptima para el desarrollo y reproducción de los insectos se encuentra entre los 25 y 32 °C. Fields (1992) menciona que el rango entre los 19 y los 25 °C es subóptimo, mientras que entre los 5 y 15,5 °C se produce la muerte en días, dependiendo de la especie. Bogliaccini (2006) menciona que los insectos no pueden reproducirse por debajo de los 15 °C por lo que manteniendo los granos por debajo de esa temperatura y dependiendo de las especies, el metabolismo de los insectos es bajo y se realiza un control parcial, inhibiendo el aumento de las poblaciones. En estos casos puede no ser necesario aplicar insecticidas lo cual ayuda a la reducción de costos y la no aparición de residuos químicos. En el caso de hongos como *Aspergillus* o *Penicillium* también disminuye su actividad y con esto también la aparición de toxinas (Bogliaccini, 2006). Sin embargo, en condiciones de almacenamiento con humedad relativa del espacio intergranario mayor a 81% (17 a 20% de humedad dependiendo del tipo de grano) los hongos pertenecientes al genero *Penicillium* son capaces de germinar y crecer a partir de los 8 °C. Esto evidencia que si se almacenan granos a bajas temperaturas pero con humedad, el periodo de almacenamiento no puede ser excesivo.
- El uso de equipos de refrigeración artificial acorta significativamente la duración del ciclo de enfriado y permite independizarse de las condiciones climáticas externas. Estos equipos pueden funcionar aun con elevadas temperaturas, excesiva humedad o hasta con precipitaciones.
- En el caso de almacenaje de granos para semillas las ventajas son aun más importante ya que permite mantener el vigor y la germinación de las mismas.
- Los granos tienen muy baja conductibilidad térmica, esto es un inconveniente al momento de enfriarlos, pero una vez fríos es un beneficio, haciendo que la baja temperatura alcanzada en el granel perdure en el tiempo. Esta baja temperatura se mantendrá estable por un determinado tiempo que dependerá de las condiciones climáticas, de las estructuras y su grado de aislación de los factores externos.

Los objetivos del presente ensayo fueron:

- Documentar una experiencia y recopilar información técnica del proceso de refrigeración de un silo de maíz.
- Determinar el consumo total de energía del equipo a lo largo de todo el ciclo de refrigeración.

■ Materiales y Métodos

La experiencia se desarrollo en la planta de acopio de AFA Totoras, al sur de la provincia de Santa Fé, iniciando el ensayo el día 19 de septiembre del 2008 a las 12:15 hs y prolongándose hasta el día 29/09/2008 hasta las 12:30 hs.

La experiencia consistió en insuflar aire en condiciones constantes de temperatura y humedad relativa, a través de toda la masa de granos almacenados en el silo. Para introducir el aire en el silo se utilizó el sistema de conductos de distribución de aire preexistente. Se retiraron los cuatro ventiladores y se conectó en su lugar el equipo refrigerador. De esta forma se aprovecharon todas las bocas de aireación con el objetivo de que la distribución del aire frío dentro del silo sea lo mas homogénea posible.

La salida de aire frío del equipo refrigerador se realizó a través de un conducto principal con un diámetro de 600 mm, el cual termina en un derivador de 4 salidas con diámetros de 300 mm. (figura 1 y 2).



Figura 1 y 2. Superior: conexión al silo mediante conducto de 300 mm de diámetro. **Inferior:** vista general de la conexión entre el equipo refrigerador y el silo.

El equipo esta compuesto por: compresor de refrigeración, condensador, evaporador, recalentador,

ventiladores disipadores de aire caliente, ventilador centrífugo de inyección de aire, paneles de entrada y filtrado de aire, microprocesador, tablero de comando y controles. Todo el equipo es móvil con cuatro ruedas para facilitar su desplazamiento dentro de playa de silos.

El tablero de comando tipo "touch screen" (sensible al tacto) le permite al operador seleccionar las condiciones deseadas de inyección de aire en cuanto a temperatura y humedad relativa. Posteriormente el microprocesador realiza los ajustes necesarios para cumplir con las condiciones impuestas, adaptando el funcionamiento de todos los componentes.

Las medidas del silo son:

Diámetro: 16,5 m.
Altura del cono inferior: 5,75 m
Altura del cono superior: 4,76 m.
Altura del cilindro: 14,3 m.
Numero de bocas de aireación: 4

Dado que no estaba lleno, el total almacenado en el silo fue de 2.500 Tn de maíz, teniendo un cono invertido en la parte superior.

El monitoreo de la evolución de la temperatura a lo largo del ciclo de refrigeración se realizó a través de la extracción de muestras en la boca de inspección lateral y en la parte superior de la masa de granos.

La temperatura de la muestra extraída se midió a través del uso de un termómetro digital. La metodología consistió en extraer una muestra y dejarla estabilizar hasta que el termómetro reporte un valor constante de temperatura (esto demandó entre 5 y 10 minutos).

La velocidad del aire frío insuflado al silo se midió utilizando un anemómetro colocado en los 6 paneles de toma de aire del equipo, contabilizándose un total de 54 mediciones (figura 3). Estas mediciones se realizaron a distintas capacidades de funcionamiento del equipo, desde 50 a 75 %, obteniéndose valores de velocidades del aire en m/seg que finalmente, relacionando la velocidad con el área, se obtuvo el caudal total en m³/h y el caudal específico en m³/tn/min.



Figura 3: Medición del caudal de aire en los paneles de toma de aire del equipo.

Durante la duración del ensayo y a intervalos de 30-45 minutos, aproximadamente desde las 9:30 hs hasta las 17 hs se registraron las siguientes variables:

TA: Temperatura Ambiente (°C)
TE: Temperatura del Aire Enfriado (°C)
TSA: Temperatura del Aire de Salida (°C)
HR: Humedad Relativa del Aire de Salida
Ve: Ventilador Evaporador (%)
CA: Consumo total del equipo (Amperes)

Estas mediciones se realizaron en la mayoría de los días, sin embargo existieron 2 días en los cuales los registros de datos fueron incompletos, no obteniéndose datos en algunos horarios.

En la parte superior del granel se midió la velocidad de salida del aire empleando un embudo de medidas conocidas y un anemómetro. Se realizaron 10 mediciones dispuestas radialmente en la periferia del silo y 3 mediciones en la zona central, lo que totaliza 13 medidas (figura 4). Esto permitió calcular el caudal de salida por unidad de tiempo y el caudal específico en $m^3/tn/min$.

El equipo fue programado para que entregue su caudal en un rango del 50 al 75 % de su capacidad máxima total, a 10 °C y 70 % de humedad relativa.



Figura 4: Medición del caudal de aire en la masa superior de granos.

■ Resultados y Discusión

Resultados de mediciones de temperatura con termómetro digital

La tabla 5 presenta los valores de temperatura inicial y final de la masa de granos. De las mediciones sobre las muestras extraídas, se evidencia una baja de la temperatura de 4 grados en promedio entre el inicio y finalización del ensayo. Se puede apreciar que la temperatura final en ambos extremos fue cercana a los 10°C, que fue la temperatura a la cual se programó el equipo de refrigeración.

Tabla 5: Temperaturas relevadas con termómetro digital

Temp. Inicial muestra inferior (boca de inspección) °C	18,1
Temp. Inicial muestra superior °C	13,8
Temp. final muestra inferior (boca de inspección) °C	12,6
Temp. final muestra superior °C	11,3
Prom. temp. inicial	15,95
Prom. temp. Final	11,95
Diferencia en °C entre inicio y fin del ensayo	4

Para futuros ensayos se espera contar con información de temperatura de diferentes porciones de la masa de granos a través del sistema de termocuplas, lo cual permitirá realizar una mejor evaluación del funcionamiento del sistema.

Resultado de las variables medidas a lo largo del ensayo.

La temperatura del aire insuflado al silo en promedio fue de 10 °C variando entre 9 °C y 11 °C
La temperatura medida diaria entre los días del ensayo fue de 21,7 °C con mínimas de 17 °C y máximas de 26 °C.

La humedad relativa promedio del aire insuflado fue de 71,6 % distribuyéndose la variabilidad de la siguiente forma:

El 46 % del tiempo total de funcionamiento insufló aire con humedad relativa entre 64 y 70 %.

El 39 % del tiempo total de funcionamiento insufló aire con humedad relativa entre 70 y 76 %.

El 16 % del tiempo total de funcionamiento insufló aire con humedad relativa entre 76 y 82 %.

Esto evidencia, que el 85 % del tiempo a lo largo del ensayo insufló aire entre 64 y 76 % HR con una media de 70 % HR

Estos valores podrían considerarse satisfactorios ya que a largo plazo el contenido de humedad de equilibrio del grano se maíz se ubicaría alrededor de 14,3 %.

Velocidad del aire y caudal específico

Los datos de las mediciones de la velocidad de entrada del aire en los paneles, a una misma capacidad de entrega de caudal, fue muy variable, con valores máximos que oscilaron en mas del doble de los valores mínimos. Esto sugiere la existencia de turbulencia en la zona de entrada. La capacidad de entrega de aire en condiciones diurnas en promedio fue de 63,5 % correspondiéndose con un caudal promedio 17.200 m³/h (tabla 6).

Cabe mencionar que en condiciones nocturnas en donde la temperatura ambiente es inferior y mas cercana a la temperatura de inyección de aire frío, el equipo podría ser capaz de entregar mayor caudal por tener menor necesidad de acondicionamiento del aire.

Tabla 6: Caudal entregado por el equipo medido en los paneles de entrada aire.

Caudal por hora (m ³ /h)	17.200
Tn almacenadas	2500
Caudal específico. (m ³ /tn/min)	0,11

Diversos autores sostienen que el caudal para refrigeración artificial debe ser igual o mayor a 0,1 m³/tn/min. El caudal específico relevado en el equipo de 0,11 puede considerarse satisfactorio y podría ser suficiente para cumplir con el objetivo para el cual fue diseñado e instalado en el silo.

Velocidad del aire en la masa superior de granos.

En la tabla 7 se muestran los valores relevados a través del uso del embudo y anemómetro en la parte superior del granel. El lugar de medición se corresponde con el n° de cupla del sistema de medición de temperatura.

Tabla 7: Velocidad del aire relevada en la capa superior de la masa de granos.

Zona de medición	Velocidad m/seg.	Caudal específico m ³ /min./tn
cupla 3	1,4	0,036
cupla 4	1,4	0,036
cupla 5	1,4	0,036
cupla 6	1	0,020
cupla 1	1,4	0,036
cupla 2	1,3	0,030
cupla 7	1,3	0,030
cupla 7	2,4	0,056
cupla 7	1,5	0,040

periferia	1,1	0,024
periferia	1	0,020
periferia	1	0,020
periferia	1,2	0,026
Promedio	1,5	0,04

Comparando los valores de velocidad del aire y caudal específico relevados en la superficie del granel, se evidencia que fue notablemente inferior a la relevada en los paneles del equipo, concretamente 0,04 m³/min./tn vs. 0,11 m³/min./tn. Es decir que el caudal específico medido en la parte superior fue solamente del 36 % del caudal específico registrado en el equipo.

La explicación para esta situación puede ser la variabilidad de los datos de la velocidad del aire relevadas tanto en el equipo como en el nivel superior del granel. En la superficie del grano es probable la existencia de canales de mayor velocidad de aire que no fueron detectados, ya que se realizaron 13 mediciones de 0,125 m² c/u (un total de 1,6 m²) en una superficie de grano de 214 m².

Esto hace difícil determinar y obtener con mayor precisión la verdadera velocidad promedio. Una propuesta de solución sería sectorizar la medición, tanto en la boca del ventilador como en la superficie del silo de manera de obtener datos homogéneos en cada sector y posteriormente afectarlos por un coeficiente según la proporción que ocupe cada zona respecto del total.

Otra posibilidad de error, que explique las diferencias, se refiere a que el anemómetro no mida con la misma precisión a altas que a bajas velocidades. En este sentido las velocidades medidas en la superficie del silo son notablemente inferiores a las medidas en los paneles del equipo, por lo que si la precisión del anemómetro es menor a bajos caudales de aire, se puede incurrir en un error importante en la estimación del caudal verdadero (Bartosik comunicación personal)*

Finalmente, otra posibilidad de error, es que en los paneles del equipo y en donde se realizaron las 54 mediciones de velocidad, sea una zona muy turbulenta y por lo tanto se podría pensar que en algunos puntos la velocidad fue la medida, pero en sentido contrario, lo cual arrojaría un promedio incorrecto.

De estas observaciones se desprende la necesidad de refinar la metodología de medición del caudal de aire para futuras experiencias. Una posible solución es utilizar un anemómetro de cable caliente que permite medir la velocidad del aire directamente en el conducto de inyección. A su vez estos anemómetros presentan mayor confiabilidad para medir bajas velocidades de aire.

Consumo del equipo y calculo de costos

El consumo del equipo en promedio fue de 34,8 Kw. con un mínimo de 31,1 Kw. y un máximo de 38,5 Kw. La distribución de la variabilidad fué:

- entre 31,1 y 33,6 Kw el 29 % del tiempo.
- entre 33,6 y 36,1 Kw el 49 % del tiempo.
- entre 36,1 y 38,5 Kw el 22 % del tiempo.

Esto evidencia que para las condiciones evaluadas, aproximadamente la mitad del tiempo de duración del ensayo, el equipo consumió entre 33,6 y 36,1 Kw con una media de 34,8 Kw.

Para el costo del Kw se utilizaron los valores suministrados por el encargado de la planta de silos, considerándose tarifas diferenciales con un costo de 0,36 \$/Kw entre las 18 hs y las 23 hs y de 0,12 \$/Kw en el horario restante.

Tabla 8: Consumo y costo del ciclo de refrigeración

Duración del ensayo	240 hs.
Horas consumidas entre las 18 y 23 hs	50

Horas consumidas restantes	190
Consumo promedio Kw.	34,8
Kw consumidos 18 a 23 hs	1740
Kw consumidos restantes	6612
Costo \$ (18 - 23hs/0,36 \$/kw))	626,4
Costo \$ (23 - 18 hs/0,12 \$/kw))	793,4
Costo total ciclo refrigeración	1419,8

■ Conclusiones

Se documentó la experiencia de enfriado de un silo mediante un equipo de refrigeración.

El equipo logró reducir la temperatura de toda la masa de granos (aproximadamente 2500 t de maíz) en 4°C (de 15,95 a 11,95°C en promedio) cuando fue programado para suministrar aire a 10°C.

El tiempo demandado para completar el enfriamiento de toda la masa de granos fue de 240 horas, el consumo eléctrico total fue de 8.352 kw con un costo total aproximado de \$1419,8 (0,57 \$/t).

Se agradece al perito receptor de granos Hector Gomez y del Sr Nestor Rearte por sus predisposiciones y colaboración en la realización de este ensayo.

* Bartosik Ricardo, área Postcosecha. E.E.A Inta Balcarce. 2008.

Autores:

Ing. Agr. Roskopf Rubén Darío¹, Ing. Agr. Ph.D. Ricardo Bartosik², Ing. Agr. Leandro Cardoso².

(1) INTA PRECOP AER Totoras. Área postcosecha E.E.A. INTA Oliveros. Av. Maipú 1138, C.C. 48 (2144). Totoras, provincia de Santa Fe. Tel: 03476-460208

(2) INTA PRECOP E.E.A. INTA Balcarce. Área postcosecha. Ruta 226 km 73,5 C.C. 276 (7620). Balcarce, Provincia de Bs As. Argentina.

Mail: rroskopf@correo.inta.gov.ar, rbartosik@balcarce.inta.gov.ar, lcardoso@balcarce.inta.gov.ar

◆ Consultas a Profesionales del PRECOP

◆ Últimas Actualizaciones del Sitio

21 de noviembre Trigo: Momento Oportuno de Cosecha [Ver Todos los Artículos de Cosecha]

21 de noviembre 02 de diciembre: Jornada Demostrativa de Eficiencia de Cosecha de Trigo en la EEA INTA Rafaela [Ver Agenda]

11 de noviembre NOVEDADES Y TENDENCIAS AGRITECHNICA 2009. Hannover, Alemania. 10 al 14 de noviembre de 2009 [Ver Todos los Artículos de Viajes de Capacitación]

11 de noviembre 27 de noviembre: Jornada de Actualización Porcina y Primer Encuentro del Centro de Información de Actividades Porcinas [Ver Agenda]



[Mapa del Sitio](#)

:: Resolución mínima de 800x600 ::

[Agregar a Favoritos](#)



EEA INTA Manfredi. Ruta Nac. 9, km. 636. Manfredi, Córdoba. TE: (03572) 493039