

EVALUACIÓN DE LA AIREACIÓN Y LA REFRIGERACIÓN ARTIFICIAL DE TRIGO (TRITICUM AESTIVUM) PARA PREVENIR EL DESARROLLO DE INSECTOS EN DIFERENTES CONDICIONES CLIMÁTICAS DE ARGENTINA

Ing. Agr. Rubén Roskopf

Trabajo de Tesis para ser presentado como requisito parcial para optar al Título de

MAGISTER SCIENTIAE en MECANIZACIÓN AGRÍCOLA

PROGRAMA DE POSGRADO EN
CIENCIAS AGRARIAS

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales

UNIVERSIDAD NACIONAL LA PLATA

La Plata, Argentina

Septiembre, 2015

Director:
Dr. Ricardo Bartosik

Codirector
Dra. Rita Abalone

Asesores
Dra. Analía Gastón.
Dr. Hernán Urcola

Índice.

Índice de Tablas	v
Índice de Figuras	vii
Abreviaturas y Siglas	x
Resumen	xi
Abstract	xiii
1. Introducción	1
1.1. Caracterización de la producción y uso del trigo en el país.....	1
1.2. Problemática del control de insectos en poscosecha	2
1.2.1. Control integrado de plagas.....	4
1.3. Factores que influyen en la conservación de los granos	4
1.3.1. Efecto de la humedad.....	5
1.3.2. Efecto de la temperatura	5
1.4. Insectos plagas de granos almacenados.....	6
1.5. Hongos del almacenamiento.	6
1.6. Aireación.....	8
1.6.1. Controladores de aireación.....	9
1.7. Refrigeración	10
1.7.1. Descripción del equipo de refrigeración.....	11
1.7.2. Funcionamiento de la unidad de refrigeración.....	12
1.7.3. Referencia histórica y contexto actual de la refrigeración artificial de granos.	12
1.8. Comparación entre aireación y refrigeración artificial de granos.	13
1.8.1. Efecto del clima sobre aireación y refrigeración.	14
1.9. Simulación de aireación y refrigeración.....	15
1.10. Evaluación económica.....	17
2. Hipótesis.....	19
3. Objetivos.....	19
3.1. Objetivo general	19
3.1. Objetivos Específicos	19
4. Materiales y Métodos	20
4.1. Ensayo de aireación	20
4.1.1. Descripción del silo.....	21
4.1.2. Descripción de la conexión al silo.....	21

4.1.3. Descripción del ensayo.....	21
4.1.4. Medición de consumo energía.....	22
4.1.5. Medición de temperatura del grano.....	22
4.2. Ensayo de refrigeración.....	22
4.2.1. Descripción del silo.....	22
4.2.2. Descripción del equipo de refrigeración.....	22
4.2.3. Descripción de la conexión al silo.....	23
4.2.4. Descripción del ensayo.....	23
4.2.5. Medición del consumo de energía.....	23
4.2.6. Medición de temperatura de entrada del aire al silo.....	24
4.2.7. Medición de la temperatura del grano.....	24
4.2.8. Programación del funcionamiento del equipo de frío y medición del caudal de aire insuflado.....	26
4.3. Modelo de simulación.....	27
4.3.1. Módulo de aireación.....	28
4.3.2. Módulo de refrigeración.....	28
4.3.3. Validación del modelo SAR-Sim en los tratamientos de aireación y refrigeración.....	31
4.3.3.1. Validación del tratamiento de aireación.....	32
4.3.3.2. Validación tratamiento de refrigeración.....	33
4.3.3.3. Simulación para diferentes localidades de los tratamientos de aireación y refrigeración.....	35
4.3.3.4. Parámetros de simulación.....	36
4.3.3.4.1. Tratamiento de aireación.....	37
4.3.3.4.2. Tratamiento de refrigeración.....	38
4.4. Análisis económico.....	38
4.4.1. Estructura de costos.....	38
4.4.2 Tratamiento de aireación.....	38
4.4.2.1 Costos para el control químico de insectos.....	38
4.4.2.2. Costo de energía eléctrica.....	41
4.4.3. Tratamiento de refrigeración.....	43
4.4.3.1. Costos para el control de insectos.....	43
4.4.3.2. Costo de energía eléctrica y alquiler del equipo de frío.....	43
4.4.4. Estructura de ingresos.....	43

4.4.5. Evaluación económica.....	44
5. Resultados y discusión.....	46
5.1. Validación del modelo de simulación para aireación.....	46
5.2. Refrigeración.....	50
5.2.1. Horas de funcionamiento durante el ensayo.....	50
5.2.2. Temperatura del grano.....	51
5.2.3. Caudal de aire y temperatura de refrigeración.....	52
5.2.4. Consumo eléctrico del equipo.....	54
5.2.5. Validación del modelo de simulación.....	55
5.3. Simulación del comportamiento de aireación en distintas regiones agroclimáticas del país.....	60
5.4. Simulación del comportamiento de refrigeración en diferentes regiones agroclimáticas del país.....	63
5.5. Comparación entre refrigeración y aireación.....	65
5.6. Análisis económico.....	67
5.6.1. Composición de costos.....	69
6. Consideraciones finales.....	73
7. Conclusiones.....	74
8. Recomendaciones.....	74
9. Bibliografía.....	75

Índice de Tablas

Tabla 1. Valores comparativos de límites máximos de residuos (LMR) en maíz para diferentes reglamentaciones nacionales e internacionales.....	3
Tabla 2. Efecto de la temperatura en el desarrollo de insectos.....	6
Tabla 3. Temperaturas de crecimiento de los principales hongos del almacenaje.....	7
Tabla 4. Temperatura del grano de trigo a distintos niveles al inicio del ensayo.....	25
Tabla 5. Variables involucradas en la validación del modelo SAR-Sim para la aireación de granos, rango de valores y forma de obtención.....	33
Tabla 6. Variables involucradas en la validación del modelo SAR-Sim para la refrigeración de granos, rango de valores y forma de obtención.	34
Tabla 7. Localidades y años de simulación.	36
Tabla 8. Temperatura ambiente promedio, mínima y máxima del mes en el cual se realizó la simulación para las diferentes localidades.	36
Tabla 9. Detalle de dosificación y costos de uso de insecticida protectante.	39
Tabla 10. Costo de aplicación de fumigante, probabilidad de aplicación y costo anual ponderado según la temperatura máxima del granel.....	40
Tabla 11. Costos de aplicación de insecticida protectante y fumigante según la temperatura promedio y máxima de los granos.	40
Tabla 12. Resumen de los tratamientos de aireación y refrigeración.....	45
Tabla 13. Error estándar de los residuales (S.E.) y promedio en valor absoluto de los residuales (PVAR) de las temperaturas del grano medidas y simuladas para los diferentes ciclos de aireación programados (15 °C, 10 °C, 5 °C, y 3 °C).....	50
Tabla 14. Horas de funcionamiento diarias y acumuladas del equipo de frío durante el ensayo.....	50
Tabla 15. Temperatura registrada por el sistema de termometría instalado en el silo para diferentes alturas del grano y momentos del proceso de refrigeración.....	51
Tabla 16. Valores de consumo energético registrado.	54
Tabla 17. Error estándar de los residuales (S.E.) y promedio del valor absoluto de los residuales (PVAR) de las temperaturas del grano medidas y simuladas.....	59

Tabla 18. Valores promedios, mínimos y máximos de las temperaturas promedio inicial del grano, temperaturas promedio y máxima final del grano, temperatura y humedad relativa ambiente promedio, promedio de humedad final del grano, tiempo de aireación y consumos total y específico de energía para diferentes localidades.....	61
Tabla 19. Valores promedios, mínimos y máximos de las temperaturas promedio inicial del grano, temperaturas promedio y máxima final del grano, temperatura y humedad relativa ambiente promedio, promedio de humedad final del grano, tiempo de refrigeración y consumos total y específico de energía para diferentes localidades.....	64
Tabla 20. Promedio de temperatura final del grano, tiempos de aireación, consumo específico y merma de humedad para las localidades simuladas para los tratamiento de RA y AN.	66
Tabla 21. Merma de peso, humedad relativa del aire de entrada al silo y peso final de grano al momento de la venta.....	67
Tabla 22. Costo por tonelada de alquiler del equipo de frío, consumo de energía, protectante y fumigante.....	68
Tabla 23. Costos totales por tratamientos, diferencias de costos (RA-AN), VAN por tratamiento y diferencia de VAN (RA-AN).....	68
Tabla 24. Análisis económico de sensibilidad considerando aumentos del 15 % en costo de energía, insecticidas y alquiler del equipo de frío.....	70
Tabla 25. Valores expuestos como diferencia entre VAN de RA menos VAN de AN. Valores negativos implican la conveniencia económica de AN.....	70

Índice de Figuras.

Figura 1. Esquema de conexión y funcionamiento del equipo de frío.	11
Figura 2. Esquema de los componentes de un equipo refrigerador moderno.	11
Figura 3. Vista del controlador compuesto del módulo de señal y de potencia	20
Figura 4. Diagrama del silo usado en el ensayo de aireación.	21
Figura 5. Esquema de conexión del controlador.	21
Figura 6. Vista de la conexión entre el equipo de frío y el silo con trigo.	23
Figura 7. Equipo analizador de potencia eléctrica.	24
Figura 8. Estructura de guía, armado y colocación del sensor en la transición al silo	24
Figura 9. Esquema de la planta de silos donde se desarrolló el ensayo. Detalle de las ubicaciones de los cables de termometría en cada silo.	25
Figura 10. Medición de la presión estática dentro de la transición que conecta el equipo de frío al silo.	26
Figura 11. Curva de presión-caudal del ventilador del equipo de frío utilizado en el ensayo.	27
Figura 12. Variables intervinientes en el funcionamiento del equipo de frío.	30
Figura 13. Esquema lógico de funcionamiento del módulo de refrigeración	31
Figura 14. Captura de pantalla del programa AireAr cargado con los datos de las características del grano y las dimensiones del silo utilizados en la simulación de AN.	41
Figura 15. Captura de pantalla de la tabla de caudal y presión estática del programa AireAr para distintas alturas del silo para el ventilador seleccionado.	42
Figura 16. Curva de trabajo del ventilador seleccionado para la simulación en aireación (Chicago Blower SQDS165 de 5,5 HP).	42
Figura 17. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para los niveles 1 a 4 (a, b, c y d, respectivamente) para el ciclo de aireación con condiciones ambientales menores a 15 °C.	46
Figura 18. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para los niveles 1 a 4 (a, b, c y d, respectivamente) para el ciclo de aireación con condiciones ambientales menores a 10 °C.	47

Figura 19. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para los niveles 1 a 4 (a, b, c y d, respectivamente) para el ciclo de aireación con condiciones ambientales menores a 5 °C.....	48
Figura 20. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para los niveles 1 a 4 (a, b, c y d, respectivamente) para el ciclo de aireación con condiciones ambientales menores a 3 °C.....	49
Figura 21. Temperatura programada en el equipo, temperatura de entrada del aire al silo y diferencia entre la temperatura programada y de entrada al silo en función de la temperatura ambiente.	54
Figura 22. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 1 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.	55
Figura 23. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 2 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.	56
Figura 24. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 3 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.	56
Figura 25. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 4 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.	56
Figura 26. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 5 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.	57
Figura 27. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 6 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.	57
Figura 28. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 7 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.	57
Figura 29. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 8 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.	58
Figura 30. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para todos los niveles de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.....	58
Figura 31. Relación entre la temperatura del grano lograda luego del ciclo de aireación y la temperatura ambiente promedio durante el período de aireación para las distintas localidades y años considerados.	62
Figura 32. Relación entre horas de aireación necesarias para completar un ciclo y la temperatura ambiente promedio durante el período de aireación para las distintas localidades y años considerados	63

Figura 33. Relación entre consumo energético específico para lograr un ciclo de aireación y la temperatura ambiente promedio durante el período de aireación para las distintas localidades y años considerados	63
Figura 34. Horas de refrigeración necesarias en función de la temperatura ambiente	65
Figura 35. Consumo específico de energía en función de la temperatura ambiente.	65
Figura 36. Composición de costos con RA y AN.	69
Figura 37. Incidencia del aumento del precio de insecticidas en el resultado económico expresado a través del VAN en \$.tn ⁻¹	71
Figura 38. Evolución del VAN para aireación y refrigeración en función del precio relativo del trigo.....	72
Figura 39. Evolución del VAN RA-AN en función del precio relativo del trigo.	72

Abreviaturas y Siglas

h - hora

VAN - Valor actual neto.

R - Tasa de descuento

P - Precio del trigo

Q - Cantidad de trigo.

En - Costo de la energía

Fum - Costo fumigación

Prot - Costo insecticida protectante.

Sar-Sim – Secado, aireación y refrigeración. Simulación.

Resumen

En Argentina el trigo pan (*Triticum aestivum*) se comercializa mediante la Norma XX de Senasa -TRIGO PAN- estableciendo que la mercadería debe estar libre de insectos vivos. La prevención es la principal herramienta de un sistema de Control Integrado de Plagas (CIP), basado en una combinación de limpieza con aireación o refrigeración artificial para bajar la temperatura de los granos, creando condiciones desfavorables para el desarrollo de insectos, y utilizando el control químico solo cuando es estrictamente necesario. A su vez, esta práctica tiene beneficios adicionales, como reducir la tasa de respiración y el deterioro de los granos. Bajo ciertas condiciones climáticas, la aireación no logra bajar la temperatura de la masa de granos por debajo del límite de actividad de insectos (17 °C). Para estas situaciones, la refrigeración artificial puede ser una alternativa a la aireación a fin de mantener las condiciones deseables de almacenamiento, a baja temperatura, sin el uso de protectores químicos. El objetivo del presente estudio fue validar y utilizar un modelo de simulación para aireación y refrigeración artificial de granos, evaluando técnica y económicamente la aplicación de ambas tecnologías sobre trigo en diferentes condiciones climáticas de Argentina en el marco de una estrategia de CIP. El modelo de simulación predice cambios de temperatura y humedad en diferentes capas de granos teniendo en cuenta los fenómenos de transferencia de calor y masa entre el aire y el grano, utilizando datos climáticos, horarios de temperatura y humedad relativa ambiente y condiciones de temperatura y humedad iniciales del grano. En el caso de aireación el modelo simula la estrategia prescrita de encendido y apagado de los ventiladores, mientras que en refrigeración simula el funcionamiento de un equipo de refrigeración bajo las condiciones climáticas fluctuantes. La validación del modelo para refrigeración se realizó con datos propios realizando un ensayo a escala real refrigerando un silo con 1138 t de trigo, mientras que la validación para aireación se hizo con datos de la literatura. El modelo de simulación predijo los cambios de temperatura del grano de manera aceptable, con un error estándar de 2,17 °C y 1,7° C y un promedio en valor absoluto de los residuales de 1,94 °C y 1,41 °C para aireación y refrigeración artificial, respectivamente. Estos valores estadísticos son equivalentes a los reportados en la validación de modelos similares. Una vez obtenidas mediante simulación las temperaturas máxima y promedio para 5 localidades (promedio de varios años), se determinó la necesidad de complementar el programa de CIP con control químico preventivo (temperatura promedio mayor a 17 °C) y/o curativo (temperatura máxima de la capa superior mayor a 17 °C). A su vez, una vez superados los 17 °C en la temperatura promedio y máxima, se consideró una mayor dosis de insecticida cuanto mayor fue la temperatura lograda. Las temperaturas del grano logradas con aireación natural durante el principio del verano (cosecha del trigo) no resultaron lo suficientemente bajas como para limitar el desarrollo de insectos en ninguna de las localidades consideradas. La menor temperatura promedio fue de 19,2 °C en Balcarce y la mayor de 22,2 °C en Manfredi. Como resultado, la aireación siempre debió ser complementada con el control químico preventivo y/o curativo, aumentando el costo del CIP. La mayor incidencia de costos corresponde al uso de insecticidas (protectantes y fumigantes), con el 97 % del total. Con refrigeración artificial siempre se logró enfriar la masa de grano por debajo de los límites prescritos. Sin embargo, las mayores temperaturas ambiente aumentan los tiempos de refrigeración y los consumos de energía. Por cada un 1°C de aumento de temperatura ambiente entre los 14,8 °C y 31,2 °C, el tiempo de refrigeración aumenta 2 horas y el consumo específico 0,11 kWh.t⁻¹. La mayor incidencia de

costos se debe al alquiler del equipo de frío, con el 84% del total. Los resultados demostraron que las temperaturas del grano logradas mediante refrigeración fueron menores que aquellas logradas con aireación. Con respecto del consumo de energía, la refrigeración artificial fue más demandante ($1,69 \text{ kWh.t}^{-1}$ contra $0,29 \text{ kWh.t}^{-1}$ para aireación), sin embargo al reducir o eliminar la necesidad del control químico las diferencias económicas entre ambas tecnologías son escasas. La conveniencia de una u otra técnica estará en función de la practicidad de cada una, tiempo de enfriamiento necesario, calidad final del grano o nivel demandado de residuos de insecticidas sobre el grano, entre otras.

Palabras claves: almacenaje de granos, calidad, acondicionamiento de trigo, control integrado de plagas.

Abstract

In Argentina wheat is marketed under Norma XX – TRIGO PAN of Senasa, stating that the commodity must be free of live insects. Prevention is the main tool in an Integrated Pest Control (IPC) program, based on a combination of sanitation with aeration or artificial cooling to reduce the grain temperature, creating unfavorable conditions for the development of insect, using the chemical control only when there is no alternative. There are additional benefits, such as decreasing grain respiration and deterioration. Under certain weather conditions, aeration cannot reduce grain mass temperature below the limit of insect activity (17 °C). For these conditions, the artificial cooling can be an alternative to maintain the grain at low temperature, avoiding the use of chemical protectors. The aim of this study was to validate and use a simulation model for aeration and artificial cooling of grain, performing a technical and economical evaluation of the aeration and artificial cooling of wheat under different climatic conditions in Argentina under the frame of an IPC strategy. The simulation model predicts the changes in temperature and moisture content in the different grain layers, taking into account the processes of heat and mass exchange between the air and the grain, using hourly weather data of temperature and relative humidity and initial temperature and moisture content of the grain. For the simulation of the aeration process, the model simulates the strategy prescribed for the fan operation, while for artificial cooling, the model emulates the functioning of the cooling equipment under different weather conditions. The validation of the simulation model for artificial grain cooling was carried out with data generated in an 1138 t bin full of wheat, while the validation for aeration was carried out with data from the literature. The simulation model predicted temperature changes with an acceptable accuracy, with a standard error of 2,17 °C and 1,7 °C and an average absolute value of the residuals of 1,94 °C and 1,41 °C for aeration and artificial cooling, respectively. These statistics were comparable to others reported in the literature for the validation of similar models. After running the simulation model and obtained the maximum and average grain temperatures for 5 locations (average of several years), the need of complementing the ICP program with a preventive application of chemicals (average grain temperature above 17 °C) and/or fumigation (maximum temperature of the top grain layer above 17 °C) was determined. Furthermore, once the average and maximum temperature overpassed 17 °C, a higher dosage of insecticide was considered as temperature was higher. Grain temperatures achieved with aeration during the early summer (wheat harvest season) were not low enough to limit insect development in all the considered locations. The lowest average temperature was 19,2 °C in Balcarce and the highest was 22,2 °C in Manfredi. As a result, aeration always had to be complemented with chemical control (protectant and/or fumigation), increasing the cost of the IPC program. The highest incidence of costs corresponds to the use of insecticides (fumigants and protectant), with 97% of the total cost. With artificial cooling always was possible to reduce the grain temperature below the limit of 17 °C. However, higher ambient temperatures increased cooling times and energy consumption. For each 1 °C increase in temperature between 14,8 °C and 31,2 °C, the cooling time increased 2 hours and the specific consumption 0,11 kWh.t⁻¹. The highest incidence of costs is due to cold equipment rent, with 84% of the total. The results showed that grain temperatures achieved by artificial cooling were lower than those achieved with aeration. In terms of energy consumption, artificial cooling is much higher (1,69 kWh.t⁻¹ vs. 0,29 kWh.t⁻¹ for aeration), however, due to the reduction (or elimination) of the chemical control, the economic differences between the two technologies are scarce.

The convenience of either technology will depend upon the practicality of each, cooling time, end grain quality requirement or insecticide residues level demanded on the grain, among others.

Keywords: grain storage, quality, wheat conditioning, integrated pest.

1. Introducción.

Desde la cosecha hasta el momento de procesamiento o uso final, todas las operaciones a las cuales se someten los granos corresponden a la etapa de la “poscosecha”.

En esta etapa es prioritario minimizar las pérdidas, tanto de cantidad como de calidad, optimizando el uso de combustible, electricidad, plaguicidas y demás insumos. La reducción de las pérdidas de alimentos es un tema prioritario para la economía del sector, pero también para las estrategias tendientes a reducir el hambre en el mundo (Hack, 2008).

Desde el año 1977, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) ha emprendido programas para la disminución de las pérdidas de alimentos de manera de lograr la erradicación del hambre a nivel mundial. Los objetivos de estos programas son lograr la seguridad alimentaria y se basan en la generación y difusión de conocimientos como el manejo integrado de plagas y buenas prácticas de almacenamiento de granos, entre otros. En el ámbito nacional, desde el año 2006 de manera continua, el INTA financia programas de reducción de pérdidas en poscosecha.

Una cantidad importante de los alimentos producidos en los países en desarrollo se pierden después de la cosecha, agravando así el problema del hambre. Las pérdidas en poscosecha se estiman entre el 15 y el 50 % de la producción mundial (FAO, 2009). Las principales causas son las condiciones inadecuadas y deficientes estructuras de almacenaje, falta de control de plagas y desconocimiento de las buenas prácticas en la poscosecha.

En Argentina, existen escasos antecedentes que cuantifiquen las pérdidas en la etapa de poscosecha. Casini (2006) estimó que las pérdidas son del 8 % del valor del total producido. Adicionalmente Bartosik (2013) estima que en Argentina las pérdidas de poscosecha (como resultado del transporte, limpieza, secado, roedores, insectos, pájaros, hongos y toxinas, entre otros) rondan el 10 % promedio anual.

Por otro lado, en los próximos años, se espera un importante aumento de la demanda de alimentos a nivel mundial, sustentado en el acelerado crecimiento de la población. En particular la FAO (2009) estima que para 2050 la producción agrícola deberá aumentar un 70 % para alimentar a los 2.300 millones de personas que se agregarán a la población mundial.

Este escenario de elevadas pérdidas en el almacenamiento e incremento en la demanda de granos, es elocuente y remarca la necesidad de evaluar técnicas de almacenamiento y control de plagas que permitan reducir las pérdidas de poscosecha.

1.1. Caracterización de la producción y uso del trigo en el país.

Dentro de la producción de granos en nuestro país el trigo es el tercer cultivo en importancia. Según datos del Ministerio de Agricultura de la Nación (MAGYP, 2013), se logró a nivel país en la campaña 2010/11 una producción de 14.697.649 t de trigo en una superficie cosechada de 4.316.385 hectáreas y un rendimiento promedio de 3.405 kg/ha.

Los tipos principales que se producen son trigo pan o duro para la elaboración de harina, trigo blando para elaboración de harinas para confiterías y trigo tipo candeal para elaboración de sémolas para pastas.

Históricamente más de la mitad de lo producido de trigo en el país se utiliza para el mercado interno en la industria de la molinería. En el año 2012 se utilizó para molienda en harina 6.133.608 t de trigo (FAIM, 2013). Prueba de la importancia de la

industria de procesamiento de trigo en Argentina es la cantidad de molinos instalados. Según la Coordinadora de la industrias de productos alimenticios (COPAL, 2013) en Argentina se encuentran instalados y funcionando 151 molinos de harina de trigo con diferentes capacidades de molienda. Están situados preferentemente en las regiones trigueras, por lo que cuatro provincias concentran la gran mayoría de los establecimientos: Buenos Aires (71); Córdoba (34); Santa Fe (22) y Entre Ríos (10).

La cantidad de trigo que anualmente exporta Argentina está condicionada por el volumen de la cosecha y los requerimientos del consumo interno que se estiman año a año. Brasil es el principal mercado del destino de las exportaciones de trigo con más del 80 % del total, le siguen en menor magnitud Colombia, Sudáfrica y Perú (FAIM, 2013).

1.2. Problemática del control de insectos en poscosecha.

En Argentina el trigo pan se comercializa mediante la aplicación de la "Norma de Calidad para la Comercialización de Trigo Pan – NORMA XX TRIGO PAN" (Resolución de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos N° 1.262/04, modificada por otras dos Resoluciones: la 825/05 y la 603/06). La norma establece tres grados de trigo pan: 1 o "corrector", 2 y 3, y a su vez establece que la mercadería debe estar totalmente libre de insectos vivos.

Para la entrega de mercadería libre de insectos existen tres herramientas fundamentales (Bartosik, 2012b):

a) Prevención: es la principal herramienta para evitar la aparición de insectos en el granel. Consiste en la limpieza y aplicación de tratamientos preventivos con insecticidas sobre las instalaciones vacías antes de recibir el grano, y sobre el grano usando insecticidas residuales. También se utiliza la aireación y refrigeración artificial para bajar la temperatura de los granos y crear condiciones desfavorables para el desarrollo de las plagas.

b) Monitoreo: se debe monitorear periódicamente los granos almacenados para detectar la presencia de insectos lo antes posible y tomar medidas para evitar el aumento poblacional de la plaga.

c) Control: consiste en la utilización de insecticidas, principalmente químicos, a fines de eliminar la presencia de insectos en el granel. Es el método típicamente utilizado en Argentina.

En el país existe un listado de insecticidas aprobados por SENASA para uso en poscosecha los cuales están integrados por (a marzo del 2013):

Clorpirifos Metil, Clorpirifos Metil + Deltametrina, DDVP, DDVP + Deltametrina, DDVP + Permetrina, Deltametrina + Butóxido de Piperonilo, Gas Fosfina, Fosfuro de Aluminio, Fosfuro de Magnesio, Pirimifos Metil, Pirimifos Metil + Lambdacialotrina, Mercaptotión y Tierra de Diatomeas.

Dentro del listado de insecticidas se los puede agrupar según su uso en:

a) Protectantes: todos menos fosfina y DDVP

b) Curativos: fosfina

c) Alto poder de volteo: DDVP

En Argentina, por falta de tradición en la implementación de prácticas de control integrado de plagas, se abusa del uso de insecticidas, tanto en la etapa preventiva como en la etapa curativa. Esto puede traer aparejado excesos de residuos en los granos, con consecuencias potenciales para la salud de los consumidores y para la comercialización del producto.

El límite máximo de residuos (LMR) es la cantidad (ppm) máxima de residuos de un determinado plaguicida sobre determinado producto agrícola permitida por Ley. Los diferentes pesticidas tienen estipulados el LMR que pueden contener los granos. El LMR está determinado en función de su peligrosidad para la salud humana y animal, como así también en función de su habilitación de uso. Por ejemplo, si un insecticida no está aprobado para granos almacenados su LMR será menor que el LMR de un insecticida aprobado para granos almacenados.

En algunos casos el contenido de residuos de pesticidas en una muestra de granos está por encima del LMR. Esto puede deberse a la aplicación de dosis excesivas en almacenamiento, aplicación de productos no registrados para granos almacenados durante la etapa poscosecha, aplicaciones en estados tardíos de los cultivos, o a multi-aplicaciones previo al despacho de la mercadería a industria o puerto. Por otra parte, el uso frecuente de insecticidas químicos genera el desarrollo de resistencias en las poblaciones de insectos, lo cual lleva a aumentar las dosis para lograr un efecto de control. Además de la problemática relacionada a la salud humana o animal, la mayoría de los insecticidas tienen una tolerancia de residuos menor en los destinos de exportación (Tabla 1) que en Argentina, lo cual motiva el rechazo de la mercadería generando costos extras y problemas logísticos (Batista, 2010).

Tabla 1. Valores comparativos de LMR en maíz para diferentes reglamentaciones nacionales e internacionales (Batista, 2010).

Principio Activo	producto	Argentina	Codex* ¹	USA	UE	Japón	Brasil
cipermetrina	maíz	0,1	-	0,05	0,05	0,2	0,05
Clorpirifos metil	maíz	5	-	-	0,05	-	0,1
deltametrina	maíz	1	1	1	2	1	1
DDVP	cereales	5	5	-	0,01	0,2	-
Esfenvalerato	maíz	0,1	-	-	0,02	-	1
Fenvalerato	maíz	0,1	-	0,02	0,02	2	-
glifosato	maíz	1	1	1	0,1	0,1	0,1
malatión	maíz	8	-	8	8		8
permetrina	maíz	2	-	-	0,05	2	0,1
pirimifos metil	cereales	10	7	8	5	1	10

*¹Codex: colección de estándares, códigos de prácticas, guías y otras recomendaciones relativas a los alimentos, su producción y seguridad alimentaria.

Un caso particular es el insecticida DDVP. El DDVP tiene una presión de vapor muy alta comparada con los insecticidas preventivos, lo cual permite que, una vez aplicado en forma líquida sobre el grano, se gasifica rápidamente. La acción del DDVP en forma gaseosa es muy efectiva por lo que permite un eficiente control de plagas adultas en pocas horas después de su aplicación (3-6 h). Esta particularidad del DDVP lo diferencia del resto de los productos habilitados, permitiendo hacer un control a la carga de la mercadería, durante su despacho a puerto o a la industria. Esta modalidad de uso del DDVP puede ocasionar graves inconvenientes ya que en la mayoría de los destinos de exportación, este insecticida está prohibido, por lo que el LMR es 0,01 ppm (500 veces menor que en Argentina), que es el límite de detección de los equipos analíticos. En los últimos años un número importante de embarques de granos y aceites han sido rechazados en puertos de destino debido a

la presencia de DDVP en el grano o subproductos (Bartosik, 2013 – comunicación personal).

Por una parte, los LMR son menores en los países destino de nuestras exportaciones respecto de Argentina, lo cual obliga a extremar las medidas tendientes al menor uso de insecticidas en toda la cadena de almacenaje y comercialización de granos. Por otra parte, existe una creciente presión del consumidor por la seguridad alimentaria. Así el sector almacenador de granos necesita de nuevas tecnologías y que éstas sean limpias, atóxicas, no agresivas al medio ambiente y viables económicamente de modo que reduzcan costos y pérdidas proporcionando productos saludables para la alimentación humana y animal (Lacerda *et al.*, 2007). Las atmósferas modificadas y controladas (N₂ y CO₂) se perfilan a futuro como las tecnologías ideales para el control de plagas, ya que no afectan la inocuidad del grano ni contaminan el medio ambiente (Navarro, 2006). Sin embargo, hasta el momento estas tecnologías no están disponibles para ser implementadas masivamente, por lo que las prácticas de prevención y el control integrado son la solución adecuada a corto y mediano plazo.

1.2.1. Control integrado de plagas

El control integrado de plagas en poscosecha (CIPP) es el conjunto de prácticas de distinto origen y tipo que ensambladas estratégicamente permiten llegar a un resultado adecuado (Yanucci, 2005).

El objetivo del CIPP es reducir la incidencia de plagas a un mínimo, haciendo uso de todos los medios disponibles mediante diferentes combinaciones de métodos.

Las herramientas para realizar el CIPP son las siguientes:

Higiene y limpieza: el remanente de grano es la principal fuente de origen de las infestaciones por lo que todo lo que se realice en este sentido es lo que mejor rédito brinda en términos de resultados. Se estima que el 60-70 % de los problemas de plagas encuentran solución en esta etapa (Yanucci, 2005).

Inspección mediante la toma de muestra o uso de trampas: es fundamental identificar las especies de plagas y conocer su morfología, estadio en que se encuentran, ciclo de vida, alimentación y hábitos.

Una vez detectada la presencia de la plaga es conveniente desarrollar una estrategia de control, basada no solamente en el uso de insecticidas, sino en un conjunto de prácticas de control, entre ellas:

Físicas y mecánicas: limpieza, barreras, calor, secado, enfriamiento, almacenaje hermético, atmósfera controlada, radiaciones, tierra de diatomeas.

Biológicas: se utilizan predadores, parásitos o patógenos de plagas para reducir o eliminar sus poblaciones.

Químicas: es el método más habitual para combatir las plagas. Pueden ser tratamientos de instalaciones y transportes previo a recibir el grano, tratamientos preventivos y/o tratamientos curativos sobre el mismo grano.

El CIPP debe hacer hincapié en las medidas preventivas, por lo tanto la limpieza, tratamientos de instalaciones, uso de medios físicos y sistemas de monitoreo y muestreo no deben estar ausentes en los programas a implementar en la mayoría de los casos (Yanucci, 2005).

1.3. Factores que influyen en la conservación de los granos

La humedad y temperatura de los granos actúan como catalizadores de los procesos metabólicos aumentando la tasa de respiración de los granos y de los organismos que viven entre y dentro de ellos y por ende las pérdidas de materia seca. A mayor

temperatura y humedad, mayor será la actividad metabólica, mayor la pérdida de peso y de calidad, y, por ende, menor será el tiempo de almacenamiento seguro (Roskopf y Bartosik, 2011).

El secado es la principal herramienta de preservación de los granos, ya que disminuye el agua disponible para el desarrollo de la microflora. Sin embargo, Maier y Navarro (2002) mencionan que, el secado por si solo, no es exitoso contra todos los organismos ya que el grano seco puede ser atacado y dañado por insectos, especialmente si la temperatura de almacenamiento es superior a los 15 °C.

Muchas variables afectan el almacenamiento del grano. Las plagas principales de la poscosecha son insectos y hongos. Ambos se desarrollan en función de la temperatura, contenido de humedad y período de tiempo. Las modificaciones en la temperatura puede influenciar el crecimiento de la población de insectos, incluyendo la tasa de desarrollo, supervivencia y fecundidad (Maier *et al.*, 1997).

1.3.1. Efecto de la humedad

El desarrollo de la microflora es uno de los factores más importantes que causa daño a los granos almacenados. Esta microflora está compuesta por hongos, actinomicetes y bacterias.

La humedad es el factor más importante que controla el desarrollo de la microflora (Navarro *et al.*, 2002c.). El desarrollo de hongos ocurre cuando la humedad relativa del aire intergranario supera el 70 %. Al desarrollarse estos microorganismos aumentan su respiración y la temperatura de la masa de granos (Hack, 2008), resultando en pérdidas de calidad y materia seca.

Para reducir el contenido de humedad del grano hasta un nivel adecuado, se utiliza el secado. Cuanto mayor es la temperatura del aire utilizado, el secado se realiza con mayor rapidez y mayor rendimiento, pues el aire tiene más capacidad para extraer agua. Pero el calor también tiene efectos negativos sobre el grano dependiendo de la temperatura y del tiempo de exposición. Algunos efectos del secado sobre la calidad pueden ser: disminución de la calidad molinera y panadera, desnaturalización proteica y disminución de la germinación (Hack, 2008). Los granos, previos a su almacenamiento definitivo, deberían acondicionarse a una humedad de almacenamiento segura. Dicha humedad es lo suficientemente baja como para inhibir el desarrollo de microorganismos (humedad relativa de equilibrio de 65-70 %) y en el caso de los cereales generalmente coincide con la humedad de recibo comercial (cerca de 14 %).

Una vez que los granos se secan, los hongos dejan de ser un factor de riesgo. Respecto de los insectos, se ha establecido que la humedad no tiene un rol importante en su desarrollo en los rangos típicos de humedad de almacenamiento (Hagstrum *et al.*, 1996). Esto implica que el secado por si solo no es una protección contra el desarrollo de insectos.

1.3.2. Efecto de la temperatura

La temperatura del granel incide sobre la vida, capacidad reproductiva y potencialidad de daño de toda plaga, también sobre el ritmo respiratorio de los granos. En la práctica se debe controlar la temperatura para limitar la acción de los insectos, así como también el ritmo respiratorio de otras variables biológicas (Romero, 2010).

Las pérdidas de materia seca pueden ser estimadas en función de la temperatura y humedad de almacenamiento y a partir de ello se puede derivar el tiempo de almacenamiento seguro. Por citar un ejemplo, cuando la temperatura de los granos

de maíz disminuye de 25 a 15 °C, el tiempo de almacenamiento seguro aumenta tres veces (ASAE D535, 2005). Esto muestra que una técnica para aumentar el período de almacenamiento minimizando la pérdida de calidad es disminuir la temperatura de la masa de granos. El enfriamiento de los granos tiene ventajas adicionales a la reducción de la actividad de insectos. Según Bogliaccini (2006) el objetivo de enfriar el grano de un silo o celda es reducir la tasa de respiración y deterioro de los granos, minimizar el desarrollo de insectos en el granel y generar condiciones inadecuadas para el desarrollo de hongos.

1.4. Insectos plagas de granos almacenados

Los insectos que se desarrollan en un producto se alimentan continuamente. Navarro *et al.*, (2002b) mencionan que en sistemas tradicionales de almacenaje, los insectos son el mayor factor de pérdidas y el más difícil de controlar. Los insectos no sólo ocasionan pérdidas físicas de material en los productos que atacan, sino que también disminuyen su calidad por el mal aspecto, olor, color o sabor que les imparten, volviéndolos inaceptables para el consumo humano o animal. Las estimaciones de las pérdidas por el desarrollo de insectos varían mucho según el producto, la localidad y las prácticas de almacenamiento. Para cereales o leguminosas de zonas tropicales, almacenados en condiciones tradicionales, puede esperarse una pérdida del 10-30 % durante toda una temporada de almacenamiento (FAO, 1985). Otro autor Saini y Rodriguez (2008) establece un menor nivel de pérdidas debido al ataque de insectos, del orden del 5 %.

Maier y Navarro (2002) mencionan que los insectos que infestan los granos son sensibles a la temperatura y que el desarrollo de los mismos es bajo o frecuentemente detenido a temperaturas por debajo de 16 °C. Fields (1992) presenta la siguiente tabla sobre el efecto de la temperatura en el desarrollo de insectos (Tabla 2):

Tabla 2. Efecto de la temperatura en el desarrollo de insectos.

Temperatura (°C)	Efecto
>50	Muerte en minutos
>35	Detención del desarrollo
25-32	Óptimo
19-25	Sub-óptimo
5-15,5	Muerte en días
-17,7	Muerte en minutos

Estos datos ponen de manifiesto que la principal estrategia para minimizar las pérdidas por insectos es disminuir la temperatura del grano almacenado tanto como sea posible, por debajo de la temperatura óptima de desarrollo de los insectos en primera instancia, y por debajo del rango sub-óptimo en segunda instancia.

1.5. Hongos del almacenamiento.

Los hongos están presentes en todos los ambientes productivos, por lo que vienen con el grano en el momento de la cosecha. Diferentes especies de hongos y otros microorganismos van a estar presentes en el grano durante todo el período de almacenamiento. Ya se estableció que cuando la humedad relativa de equilibrio es superior a 70 % ciertos hongos comienzan a estar activos. En ese caso la temperatura, humedad, tipo de substrato (grano) y los efectos sinérgicos/antagónicos con el resto de las especies comienzan a ser determinantes

en el desarrollo y nivel de daño que pueden causar las diferentes especies (Wicklow, 1995).

El límite de temperatura a partir del cual los hongos se inactivan parece depender en gran medida de la especie. Por ejemplo, el complejo fúngico llamado verdín no se desarrolla con menos de 2 °C. Cuando hay una temperatura de 8 a 12 °C el desarrollo es lento, siendo la temperatura óptima de 26 a 38 °C (Yanucci, 2007). Por su parte, Lacey *et al.* (1980) indican que la mayoría de los hongos de almacenamiento se desarrolla entre 4 y 49 °C, sin embargo, su óptimo está entre 20 y 35 °C, lo que deja en manifiesto la conveniencia de mantener los granos por debajo de 20°C

Las micotoxinas son metabolitos secundarios de la actividad fúngica que pueden causar diversas patologías en los animales y seres humanos. Los hongos producen micotoxinas bajo ciertas condiciones de estrés. Si bien la reducción de la temperatura puede afectar el desarrollo de hongos, la literatura indica que si la humedad es la adecuada, los hongos producen micotoxinas aún a temperaturas muy bajas. Esto implicaría que el enfriamiento mecánico de los granos almacenados no sería suficiente para impedir el desarrollo de toxinas si las condiciones de humedad son las adecuadas.

Stroshine *et al.* (1986) presentan información con las temperaturas a las cuales se desarrollan las distintas especies de hongos (Tabla 3).

Tabla 3. Temperaturas de crecimiento de los principales hongos del almacenaje.

Hongo	Temperatura de crecimiento		
	mínima (°C)	optima (°C)	máxima (°C)
Alternaria	-3	20	36-40
Aspergillus candidus	10	28	44
A. Flavus	6-8	36-38	44-46
A. fumigatus	12	37-40	50
A. glaucus	8	25	38
A. restrictus	-	-	-
Cephalosporium acremonium	8	25	40
Epicoccum	-3	25	28
Fusarium moniliforme	4	28	36
F. graminearum	4	25	32
mucor	-3	28	36
Nogrospora oryzae	4	28	32
Penicillium funiculosum	8	30	36
P. oxalicum	8	30	36
P. brevicompactum	-2	23	30
P. cyclopium	-2	23	30
P. viridicatum	-2	23	36

La temperatura tiene un efecto característico sobre el crecimiento de hongos. Cuanto menor sea la temperatura de los granos, más limitado será el daño provocado por la microflora (Navarro *et al.*, 2002a). Sin embargo, siempre que el

grano es almacenado húmedo los microorganismos estarán activos y en algún momento afectarán la calidad del grano. Esto indica que el almacenamiento de grano húmedo es temporario y que, eventualmente, se deberá secar para su almacenamiento definitivo.

1.6. Aireación.

Aireación es el paso forzado de aire a través de la masa de granos impulsado por un ventilador. De acuerdo al caudal de aire disponible se pueden establecer diferentes objetivos en aireación:

1) Aireación de mantenimiento: controlar cambios de temperatura en los granos que ya están en condición de almacenamiento definitiva (granos secos) usando bajo caudal de aire ($0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$).

2) Acondicionamiento: controlar la uniformidad de la humedad de los granos en un rango pequeño usando caudales de aire medios ($0,2-0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$).

3) Secado: reducir la humedad inicial de los granos húmedos usando un alto caudal de aire ($1-3 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$).

Otros beneficios adicionales de la aireación consisten en remover el calor de respiración de microorganismos, mantener la temperatura uniforme y evitar la condensación de humedad (Abadía y Bartosik, 2013).

En la práctica, el uso corriente del término aireación se refiere al enfriamiento del grano y el mantenimiento de la temperatura lo suficientemente baja como para asegurar una buena conservación (Yanucci, 2007).

El mecanismo de funcionamiento de la aireación se basa en utilizar el aire ambiente como un medio de intercambio de calor con los granos. A través del uso de ventiladores y conductos de aireación instalados en los silos, el aire es obligado a pasar por entre los granos. Si el aire está más frío que el granel, disminuye paulatinamente la temperatura de los granos. Este proceso se produce por capas de enfriado que progresan en el sentido de avance del aire, hacia arriba si el ventilador insufla aire, hacia abajo si el ventilador aspira aire (Abadía y Bartosik, 2013).

La disminución de la temperatura debe hacerse en un tiempo relativamente corto ya que en el caso de grano ligeramente húmedo la demora en el enfriamiento resultará en mermas de peso por respiración, deterioro de la calidad y autocalentamiento. Así, por ejemplo grano de maíz con 15 % de humedad y 35 °C tiene un tiempo estimado de almacenamiento máximo para que no se modifique la condición de grado de 37 días (ASAE, 2005). En ese lapso de tiempo la pérdida de materia seca estimada será del 0,5 %. En el caso de maíz seco, un tiempo de enfriamiento prolongado favorece el desarrollo de insectos.

La temperatura objetivo del grano debe ser la más baja posible de acuerdo a la época del año y la región geográfica. Así por ejemplo, en el sur del país, la temperatura del grano que podrá alcanzarse será menor respecto de la región centro-norte. De igual manera, durante la época invernal la temperatura a la cual se podrán enfriar los granos será menor que durante la época estival (Abadía y Bartosik, 2013).

El enfriado del grano a través de aireación puede resultar en mermas de humedad que, en definitiva, resultan en una pérdida de peso de la mercadería y un costo para el almacenamiento. Cuando el aire frío entra en contacto con el grano caliente se produce una transferencia de calor entre el aire y el grano. El aire se calienta, disminuye su HR y adquiere capacidad secante. Cuanto mayor es la diferencia de temperatura entre el aire y el grano mayor será el efecto secante del aire y, por lo tanto, mayor será la merma de humedad incurrida (Thorpe, 2002).

Por restricciones climáticas muchas veces no es posible enfriar el grano hasta una temperatura adecuada con un solo ciclo de aireación. En ese caso es posible realizar un enfriamiento paulatino a medida que se suceden las estaciones del año. Abadía y Bartosik (2013) recomiendan que la diferencia de temperaturas entre ciclos de aireación sea como mínimo de 3 a 5 grados inferiores, implementándose sucesivos ciclos hasta que el granel se enfríe por debajo de 17 °C (o lo mínimo que el clima de la localidad lo permita).

Para llegar a una temperatura del grano de unos 10 °C se necesitarán cumplir, dependiendo de la ubicación geográfica, de 2 a 4 ciclos de aireación a medida que avance la temporada más fría (De Dios, 2007). Cada ciclo de aireación se completa con aproximadamente 165-170 horas de funcionamiento de ventilador con temperaturas ambientes inferiores a la temperatura objetivo (ej. 17 °C) para un caudal específico de 0,1 m³.min⁻¹.t.⁻¹ (aireación de mantenimiento). A su vez, como se mencionara anteriormente, se estima que cada ciclo de aireación resulta en una merma de humedad entre 0,3 a 0,5 puntos porcentuales (Bartosik, 2012a).

En la práctica se observa un uso muy ineficiente de la aireación. Yanucci (2007) menciona que existe una tendencia a airear en horas inadecuadas y en forma continuada (muchas horas para completar un ciclo de aireación, o muchos ciclos de aireación). Como consecuencia de esto se generan mermas indeseables (normalmente por pérdida de humedad) y gastos exagerados de energía eléctrica. A su vez, el nivel de mermas suele ser más importante cuanto mayor es el caudal de aire.

La reducción de las mermas es un punto clave para la economía de los acopios. Las estrategias para su reducción pasan por la eficiencia en el uso de la aireación, lo cual está relacionado a seleccionar las horas adecuadas y no abusar de las horas de funcionamiento del ventilador.

1.6.1. Controladores de aireación.

Para disminuir la temperatura de los granos se deben utilizar los aireadores instalados en el silo. Estos aireadores se deben encender manual o automáticamente siempre que la temperatura ambiente se encuentre por debajo de un umbral de acuerdo a la temperatura del grano.

Para encender el ventilador hay básicamente dos alternativas:

1) Encendido manual: un operario debe encender el ventilador cuando considere que la temperatura ambiente es la adecuada. El concepto es que el ventilador funcione siempre que la temperatura ambiente sea menor al umbral establecido. Esto requiere constancia y presencia de una persona que realice ésta acción.

2) Encendido automatizado: los controladores automáticos proveen diferentes niveles de automatismo. Los más sencillos se basan en un termostato, mientras que los más sofisticados pueden tener también sensores de humedad relativa y microprocesadores para ejecutar rutinas complejas. Inclusive algunos controladores pueden estar integrados con el sistema de termometría, sumando otra variable (temperatura del grano) a la estrategia de control. Los objetivos de los controladores de aireación son aprovechar al máximo las condiciones ambientales para reducir la temperatura de los granos lo máximo posible y en el menor tiempo posible para mejorar las condiciones de almacenamiento, reducir el consumo de energía y prevenir el sobresecado de los granos (Bartosik *et al.*, 2011a; Hack, 2008).

Los sistemas más comunes están compuestos por un termostato que mide la temperatura del aire exterior y que debe ser ajustado periódicamente en cuanto a su límite de funcionamiento. Se los instala entre la fuente de energía y el ventilador.

Estos controladores prenden el ventilador cuando la temperatura exterior desciende por debajo del valor fijado en el termostato y lo detienen cuando la temperatura se eleva sobre el valor programado (De Dios, 2007). Por ejemplo si se programa el termostato a 19 °C, los aireadores se encenderán cada vez que la temperatura ambiente sea menor a 19 °C y se apagará automáticamente cada vez que la temperatura ambiente sea mayor a 19 °C. Esta forma de funcionamiento permite capturar las horas de temperatura ambiente que se encuentren por debajo de un umbral, optimizando el manejo y disminuyendo el consumo de energía.

Existen en el mercado una gran variedad de modelos con diferentes prestaciones y precios, pero su uso dista mucho de ser masivo en nuestro país. Sin embargo, bajo determinadas circunstancias los controladores de aireación, aunque funcionen correctamente, tienen dificultades para acondicionar el grano en tiempo y forma debido a las limitaciones climáticas. Esto ocurriría en la época estival, o durante los meses cuya temperatura promedio ambiente sea superior a los 23-25 °C (Roskopf y Bartosik, 2011). Bajo estas circunstancias la prevención para el desarrollo de plagas debe complementarse con el uso de insecticidas químicos, lo cual obliga a incurrir al acopiador en un costo extra para mantener la mercadería en condiciones.

La temperatura debe programarse de acuerdo a la localidad y época del año. Si se programa un límite demasiado bajo, por ejemplo 10 °C en enero para la localidad de Roque Sáenz Peña (Chaco) el ventilador no funcionará nunca, ya que difícilmente ocurran temperaturas por debajo de 10 °C durante el verano en dicha localidad (Bartosik *et al.*, 2011a).

La temperatura límite de funcionamiento debe fijarse a un valor que permita funcionar el ventilador aproximadamente 40 % del tiempo (288 h de funcionamiento en el mes). Esto garantizará que el ciclo de aireación se complete en un tiempo razonable, menos de un mes (Bartosik *et al.*, 2011a). Esta recomendación surge de suponer que para una aireación correctamente dimensionada ($0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$) se necesitan aproximadamente de 165-170 h de funcionamiento del ventilador para completar un ciclo de aireación.

1.7. Refrigeración.

Bajo ciertas condiciones climáticas, la aireación no puede inhibir la actividad de insectos porque las condiciones climáticas no permiten enfriar el grano a temperaturas por debajo del rango óptimo para el desarrollo de insectos, entre 21 y 29 °C. Tales temperaturas ocurren en cosechas de verano, como trigo, avena, arroz, entre otros. Para estas condiciones la refrigeración puede ser utilizada para mantener las condiciones deseables de almacenamiento sin el uso de protectores químicos (Maier *et al.*, 1997).

La refrigeración artificial de granos consiste en utilizar dispositivos para acondicionar artificialmente el aire atmosférico entregándolo al granel a una temperatura más baja que la ambiental (Figura 1) a cambio de un consumo de energía eléctrica. 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 (Roskopf y Bartosik, 2011).

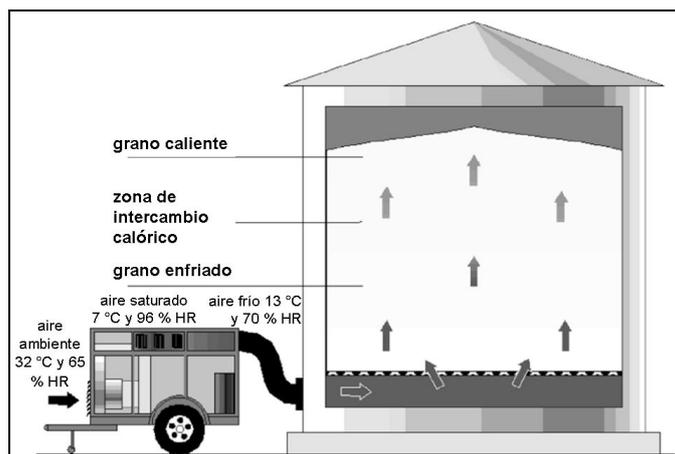


Figura 1. Esquema de conexión y funcionamiento del equipo de frío. Fuente: adaptado de Maier y Navarro (2002)

1.7.1. Descripción del equipo de refrigeración.

El equipo refrigerador de granos está compuesto por: compresor, válvula de expansión, panel y ventilador del condensador, evaporador, recalentador, ventilador centrífugo de inyección de aire, paneles de entrada y filtrado de aire, microprocesador, tablero de comando y controles (Figura 2). Normalmente el equipo es móvil, montado sobre chasis y ruedas para facilitar su desplazamiento dentro de playa de silos.

Desde el punto de vista operativo el equipo se conecta al silo retirando los aireadores y en su lugar se conectan los conductos que insuflan el aire frío del equipo a través de una manga de lona aislada térmicamente.

En el equipo de refrigeración, el aire ambiente es acondicionado a través de su paso por el evaporador de la unidad, luego es levemente calentado por el recalentador y posteriormente es insuflado al silo. El pasaje por el recalentador está diseñado para ajustar la humedad relativa del aire en torno a los 60-75 %, siendo esta la humedad en la que se encuentra en equilibrio con la humedad de almacenamiento segura para la mayoría de los granos (Maier y Navarro, 2002).

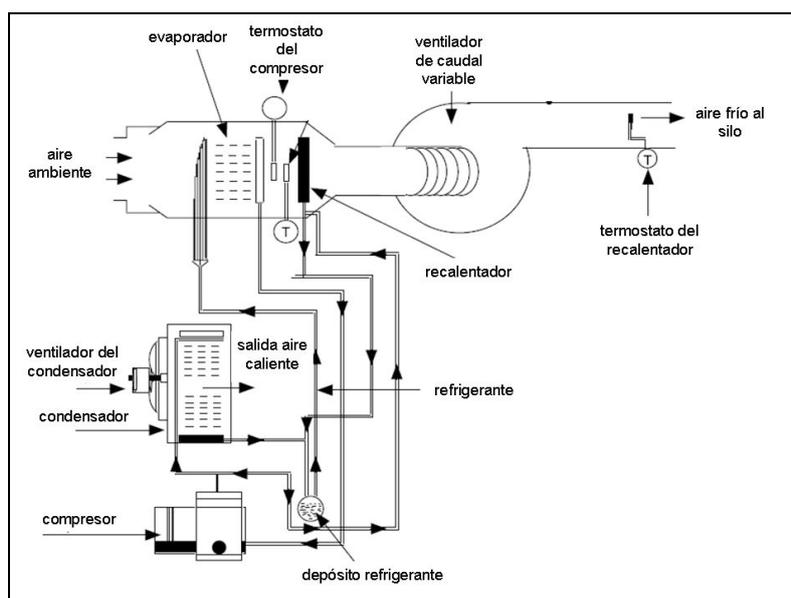


Figura 2. Esquema de los componentes de un equipo refrigerador. Fuente: Navarro y Calderon (1982)

1.7.2. Funcionamiento de la unidad de refrigeración.

En el ciclo de refrigeración, el compresor comprime el gas refrigerante aumentando su temperatura y obligándolo a pasar por el condensador. Allí los ventiladores impulsan una corriente de aire a través de las aletas de los tubos del condensador permitiendo el rápido intercambio térmico entre el gas refrigerante caliente y el aire. En este proceso se remueve el calor latente de condensación con lo cual el gas cambia a su fase líquida. Posteriormente el líquido refrigerante pasa por la válvula de expansión que mediante un orificio autoajutable regula el caudal de paso disminuyendo la presión en el evaporador. Esto provoca el cambio de estado del refrigerante, de líquido a gas absorbiendo energía en forma de calor de su alrededor por lo que baja la temperatura del aire ambiente que, impulsado por el ventilador de caudal variable, es obligado a pasar por los conductos del evaporador para enfriarse y posteriormente ingresar al silo a baja temperatura. El aire enfriado tiene una humedad relativa muy alta, lo que ocasionaría el incremento de humedad de las capas inferiores del grano. En algunos equipos, el control de la humedad relativa del aire se logra a través del calor de compresión y fricción generado por el ventilador del equipo que insufla el aire al interior del silo, incrementando en unos pocos grados la temperatura del aire y reduciendo la HR a 65 % aproximadamente, sin que existan controladores específicos para tal fin. En equipos con capacidad para controlar la humedad relativa, el aire antes de ser insuflado al silo es levemente recalentado de manera controlada para reducir la humedad a los valores requeridos por el operador. Para ello, parte del calor generado en el condensador es derivado para el calentamiento del aire. El sistema es controlado por un microprocesador que realiza los ajustes necesarios para insuflar el aire en las condiciones establecidas por el operario. Todo el proceso de refrigeración se realiza a expensas del consumo de energía eléctrica para alimentar el o los compresores, el ventilador del condensador y el ventilador de caudal variable que impulsa el aire hacia el silo (Maier y Navarro, 2002).

1.7.3. Referencia histórica y contexto actual de la refrigeración artificial de granos.

La idea de enfriar artificialmente el grano fue primeramente propuesta por un ingeniero alemán en el año 1917, pero pareció impracticable y costosa para la época. En Francia, en el año 1950 un técnico de apellido Leroy ideó un equipo de refrigeración que simultáneamente servía para secar el grano de 20 a 16 % de humedad. Posteriormente, ya en 1958, la firma alemana Escher-Wyss (posteriormente adquirida por Sulzer en 1969) vendió el primer equipo de secado con aire frío y en el año 1961 la misma compañía comienza la producción comercial de equipos destinados exclusivamente para refrigeración de granos. Estos equipos estaban destinados a conservar el grano húmedo después de las cosechas ya que en aquella época el incremento de la capacidad de trilla necesitaba de un método alternativo para preservar fresco el grano, dada la limitada capacidad de las secadoras (Maier y Bakker-Arkema, 1992).

Maier y Bakker-Arkema (1992) comentaron que a principios de los 90 la tecnología de refrigeración había sido exitosamente utilizada en más de 50 países durante los últimos 30 años, con una capacidad anual de refrigeración de más de 20 millones de t de granos.

Una década después, Maier y Navarro (2002) estiman que más de 80 millones de t son enfriadas anualmente en todo el mundo empleando sistemas de refrigeración de granos.

En Argentina, en el año 1983, se implementó un ensayo de refrigeración de 400 t de girasol. La semilla fue refrigerada desde una temperatura inicial de 20 a 25 °C con humedad del 10,5 % a valores finales de 16 a 17°C y 9 % de contenido de humedad. Después de 9 meses, la acidez permaneció en los valores iniciales de 1,3 %. Las principales ventajas citadas de la refrigeración de semillas de girasol fueron ahorros en el costo de mano de obra y mejora de la calidad del aceite procesado (Maier y Navarro, 2002).

Posteriormente en el sur de la provincia de Buenos Aires un equipo refrigerador portátil alemán de granos fue utilizado desde 1998 para mantener la temperatura de 20 °C en 150 t de semillas de soja y trigo almacenados a granel. Huarte (1999) citado por Maier y Navarro (2002). En el mismo trabajo se informa que un fabricante nacional ofrece un equipo de enfriamiento de granos hecho en Argentina.

Gornatti y Apro (2004) realizaron ensayos en Argentina sobre silos con trigo, maíz y soja concluyendo que la tecnología de refrigeración brinda ventajas técnicas sobre la aireación tradicional. Sin embargo dichos ensayos no contemplan un análisis económico comparativo entre ambos sistemas de manejo.

Posteriormente Roskopf *et al.* (2009) informan los resultados de un ensayo de refrigeración de 2.500 t de maíz reportando una disminución de la temperatura de 4 °C y un consumo específico de 3,34 kWh.t⁻¹. Seguidamente Roskopf y Bartosik (2010) documentan un ensayo empleando refrigeración artificial en un silo con 1200 t de maíz, desde una temperatura inicial de 24,3 °C a una final de 13,8 °C con un consumo específico de energía de 2,6 kWh.t⁻¹. Los mismos autores ensayaron posteriormente la técnica sobre un silo con 1000 t de trigo, con una temperatura inicial del grano de 24,4 °C y final de 15,6 °C, siendo el consumo específico de 4,1 kWh.t⁻¹. Roskopf y Bartosik (2011). En ninguno de estos casos los resultados fueron comparados con la técnica de aireación tradicional.

En el país, al momento existen tres empresas que comercializan equipos de refrigeración, una de ellas de fabricación nacional, estimándose un total de 50 equipos comercializados en los últimos 5 años. La capacidad de refrigeración de los equipos varía desde menos de 100 a más de 600 t por día (PRECOP, 2012). Los principales granos que son enfriados mediante esta tecnología son trigo, soja, maíz, girasol y arroz.

Como la refrigeración es una alternativa a la tecnología de la aireación tradicional, el desempeño, ventajas e inconvenientes de la primera deben referenciarse a la segunda. Una de las dificultades que se presentan para introducir la tecnología de refrigeración en el país es la escasez de ensayos realizados a escala real, falta de información referida a costos operativos y tiempos demandados para enfriar en distintas regiones geográficas.

1.8. Comparación entre aireación y refrigeración artificial de granos.

La aireación convencional, correctamente implementada, permite disminuir la temperatura de los granos a una temperatura ubicada algunos grados por encima del promedio de la temperatura mínima ambiente. El enfriamiento artificial de granos logra bajar la temperatura de los granos por debajo de la temperatura mínima usando un sistema mecánico de refrigeración (Maier y Navarro, 2002).

La aireación es una tecnología que depende de la disponibilidad de aire ambiente adecuado. La refrigeración de granos es una tecnología que puede aplicarse en muchas condiciones climáticas para preservar la calidad del grano durante el almacenamiento cuando el valor de los productos y los márgenes de beneficio son suficientes (Maier y Navarro, 2002).

El efecto del acondicionamiento de arroz usando un equipo de frío para granos fue investigado por Maier *et al.* (1993). Los autores concluyen que usando refrigeración, la fisura del grano fue esencialmente eliminada comparándolas con el sistema de aireación con humedad controlada. Esto tiene beneficios económicos ya que el valor del producto no se reduce por la creación de fisuras que resultan en quebrado del grano.

Maier *et al.* (1997) condujeron un ensayo sobre maíz pisingallo comparando aireación tradicional más el uso de pesticidas versus refrigeración artificial en el verano del Medio Oeste de los Estados Unidos. Concluyeron que la temperatura promedio del silo refrigerado fue menor al valor límite de desarrollo de insectos (15-17 °C). La temperatura promedio en el tratamiento de aireación no bajó de 23 °C y su promedio fue de 6 a 18 °C mayor que el tratamiento de refrigeración durante el mismo periodo. El costo de utilizar refrigeración (0,11 U\$S.kg⁻¹) fue competitivo con los costos de las prácticas convencionales de fumigación y aireación ambiente (0,096 a 0,17 U\$S.kg⁻¹). En el ensayo también se concluye que se encontraron menos insectos en el tratamiento de refrigeración en comparación con el tratamiento de aireación tradicional.

Maier *et al.* (1996) evaluando mediante simulación el efecto de distintas técnicas de manejo de la temperatura concluyen que utilizando refrigeración artificial en verano mejora el control de insectos con poco incremento de pérdida de materia seca, además que el uso de aireación controlada en otoño en combinación con refrigeración artificial en verano tiene potencial como método preventivo no químico para el manejo de plagas.

Maier (2006) concluye que refrigerar maíz a 18°C fue mejor estrategia que la aireación usando aire ambiente en términos de la baja progenie obtenida con los insectos *Sitophilus zeamais* (L.) y *Tribolium castaneum* (Herbst).

1.8.1. Efecto del clima sobre aireación y refrigeración.

El patrón típico de temperatura y humedad relativa ambiente tiene un gran efecto en el desempeño de los procesos de transferencia de calor y masa en los granos almacenados que se llevan a cabo con bajos caudales de aire (Bartosik y Maier, 2005). En tal sentido, el proceso de refrigeración y, fundamentalmente, de aireación pueden tener desempeños muy diferentes de acuerdo a las condiciones climáticas del lugar donde se implementen. Es probable que la tecnología de refrigeración sea conveniente para una determinada región agro-climática, mientras que la de aireación sea la tecnología adecuada para otra región. El desempeño en este caso se entiende como una combinación de tiempo que se tarda en lograr una determinada temperatura en el grano y de energía consumida para lograr dicha temperatura.

La aireación tradicional es una herramienta muy útil y eficiente para mantener la calidad de los granos, pero se debe contar con horas frías en cantidad suficiente para poder lograr el enfriado en un tiempo razonable. La disponibilidad de un número suficiente de horas para enfriar la masa de granos dependerá entonces de la localización geográfica y de la época del año (Abadía y Bartosik, 2013). En determinadas regiones productivas (centro/norte del país) durante el verano (diciembre a marzo) los valores de temperaturas son muy elevados, inclusive durante la noche, con lo que la aireación tradicional se utiliza muy poco, o directamente no se puede utilizar. En algunos casos el ciclo de enfriado de un silo puede ser un proceso excesivamente largo que, según la humedad del granel, predispone a los granos a su deterioro. En otros casos las temperaturas ambientes

son demasiado elevadas y el grano se equilibrará a una temperatura que permite el desarrollo de poblaciones de insectos.

Las condiciones climáticas también afectan el proceso de enfriamiento artificial. Los equipos de refrigeración tienen una capacidad de refrigeración máxima, por lo que para lograr las condiciones de temperatura y humedad de aire impuestas al inicio, modifican el caudal insuflado de acuerdo a las condiciones climáticas para mantener las condiciones del aire constante (Maier *et al.*, 1997; Maier y Navarro, 2002). En líneas generales, cuanto mayor es la temperatura ambiente menor es el caudal de aire refrigerado que puede ofrecer el equipo, por lo que el ciclo de enfriamiento se alarga. Este ajuste del caudal se puede hacer a través de una válvula mecánica que restringe el flujo de aire hacia el ventilador o modificando las revoluciones del ventilador. Maier y Navarro (2002). En la actualidad todos los equipos evolucionaron hacia el control de caudal mediante el ajuste de las revoluciones del ventilador. Maier *et al.* (1997) reportan un ahorro del 20 % en el consumo de energía debido al uso de este sistema.

El efecto del clima en la refrigeración también está dado básicamente en el consumo energético. En un análisis de la refrigeración y aireación sobre maíz mediante modelización Maier y Bakker-Arkema (1992) concluyen que los tiempos para la disminución de temperatura son variables en hasta 1,5 días indicando que las condiciones climáticas influyen en el caudal de aire del equipo de frío. A su vez, Roskopf y Bartosik (2011) indican que el consumo varía en función de la temperatura y humedad relativa ambiente. Si ambas variables son mayores, las necesidades de acondicionamiento del aire son también mayores y por lo tanto se eleva el consumo de energía por tonelada refrigerada.

Así por ejemplo, los ensayos de Roskopf y Bartosik, (2010 y 2011) reportan un consumo de energía de $2,6 \text{ kWh.t}^{-1}$ con una temperatura ambiente promedio de $18,2 \text{ }^\circ\text{C}$ y de $4,1 \text{ kWh.t}^{-1}$ cuando la temperatura ambiente promedio fue $24,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

1.9. Simulación de aireación y refrigeración.

La variación anual de las condiciones climáticas durante la estación de enfriado se trasladan al desempeño de los sistemas de aireación y/o refrigeración. Esto significa que en el análisis de desempeño del enfriado de granos, para estimar la variabilidad de las condiciones climáticas, hacen falta experimentos a campo de muchos años de duración, grandes volúmenes de grano, excesivo trabajo y recursos financieros. La solución habitual es usar modelos de simulación previamente validados utilizando series de datos meteorológicos históricos de varias localidades.

Maier *et al.* (1996) mencionan que la simulación del ecosistema de almacenamiento de granos puede ser una alternativa que ahorra tiempo de investigación a campo. También menciona una lista de aplicaciones de simulación que han sido desarrolladas con amplios objetivos en EE.UU.

Maier *et al.* (1991) estudiaron mediante el modelo de simulación "Aerate" cuatro estrategias de aireación versus refrigeración artificial. Concluyeron que de las estrategias de aireación, la aireación continua fue la mejor en términos de bajo gradiente de humedad en arroz y maíz, sin embargo no logró bajar la temperatura por debajo de $28 \text{ }^\circ\text{C}$. La refrigeración artificial logró bajar la temperatura a $15,5 \text{ }^\circ\text{C}$ estando por debajo de la estrategia de aireación. También agregan que la refrigeración artificial podría ser económica para las condiciones en las que se desarrolló el estudio.

En un análisis de la refrigeración y aireación sobre maíz mediante modelización Maier y Bakker-Arkema (1992) concluyeron que para preservar la calidad del grano,

la refrigeración es preferible sobre aireación convencional y sobre la no aireación. Los costos operativos para enfriar maíz a 7 °C mediante un ciclo de refrigeración fueron los mismos que para aireación continua, de 0,26 kWh.t⁻¹.mes⁻¹ de almacenaje.

En un estudio realizado por Maier *et al.* (1997) mediante simulación matemática computarizada, concluyen que la aireación con controlador optimiza la técnica y que el uso de aireación en primavera incrementa la tasa de deterioro de calidad, mientras que por su parte el uso de refrigeración artificial mejora el control de insectos con poco incremento de pérdida de materia seca. Mencionan que la combinación de ambas técnicas tiene potencial como herramienta preventiva contra plagas.

En Argentina, de la Torre *et al.* (2009) realizaron una validación de un modelo de simulación de aireación de trigo almacenado en silo, y concluyeron que se pudo predecir los cambios de temperatura del grano con un error aceptable. Además establecen que el modelo resultó útil para simular aireación con un mínimo de datos necesarios y es especialmente adecuado cuando las condiciones no implican largos periodos de tiempo sin aireación. En otro estudio de la Torre y Bartosik (2013) evaluaron mediante simulación cuatro estrategias de secado de granos a baja temperatura con aire ambiente y sobre granos con diferentes contenidos de humedad, de 17 a 20 %. Concluyeron que la estrategia de encendido/apagado del ventilador combinado con el encendido/apagado del quemador fue la más exitosa y que en algunas localidades con altas temperaturas ambientes, ninguna estrategia fue apta para el secado de maíz con humedad inicial de 20 %. Bartosik *et al.* (2011a) evaluando mediante simulación el rehumedecimiento de soja sobresecada en tres localidades, demuestran que es técnica y económicamente posible el reacondicionamiento de la soja, pero debido a la desuniformidad de distribución del contenido de humedad, después del reacondicionamiento, la calidad puede verse afectada.

En otra simulación sobre el secado de maíz con aire natural bajo dos tratamientos y empleando un método de resolución basado en un esquema de diferencias finitas y parámetros específicos del maíz duro, Martinello y Giner (2010) concluyen que calentando 5 °C el aire ambiente se logró un ahorro de energía del 30 % y una reducción del tiempo de secado del 12 %.

Por otro lado, Gastón y Abalone (2009) a través de un modelo bidimensional de elementos finitos simularon la distribución de temperatura y migración de humedad en trigo almacenado en bolsas plásticas. Concluyeron que el modelo mostró buena aproximación con los datos experimentales recolectados en los tres niveles de profundidad. Abalone *et al.* (2011a) desarrollaron y validaron un modelo de simulación de concentración de gas intersticial en la atmósfera de trigo almacenado en silo bolsa con humedad del 12 al 15 % (bh). Luego de un periodo simulado de seis meses de almacenamiento, los resultados fueron comparados con los datos obtenidos a campo, concluyendo que la tendencia de la evolución de los gases medidos son compatibles con los simulados, siendo mayor el ajuste con la humedad del trigo de entre 12 % y 13,5 % (bh). Posteriormente, evaluaron la sensibilidad del modelo anteriormente mencionado y el efecto de las condiciones de almacenamiento de granos a 20 °C, 25 °C, 30 °C y 40 °C con rangos de humedad del 12 al 16 %. Los resultados demostraron que la concentración de gases dentro de la bolsa es más sensible a cambios en la tasa de respiración del grano que a la permeabilidad del plástico sin roturas del silo bolsa. Cuando existen roturas del silo bolsa, pequeños orificios en el plástico provocan cambios significativos en la

evolución de la composición del gas. El modelo mostró que las condiciones anaeróbicas dentro de la bolsa se pueden alcanzar en un periodo que va de dos semanas a tres meses, dependiendo de la temperatura inicial del grano.

Finalmente, Arias Barreto *et al.* (2013a) presentan una validación de los modelos implementados para analizar las etapas de almacenamiento sin aireación, realizan un análisis de sensibilidad del modelo respecto a las propiedades higroscópicas y comparan la migración de humedad en granos de trigo, soja y maíz para condiciones de laboratorio empleadas en la validación del modelo. Arias Barreto *et al.* (2013b) aplican el modelo validado para simular las condiciones de almacenamiento de soja para las condiciones climáticas de Rosario (Lat.32°57'S, Long.60°38'W). Analizan el efecto de la temperatura inicial del grano y permeabilidad en el desarrollo de las corrientes de convección natural y hacen una comparación de la migración de humedad resultante en soja con la que se obtiene para granos de trigo, y maíz.

Visto los antecedentes de simulación para distintas técnicas de almacenaje se observa que, si bien existe en el país un importante desarrollo de modelos relacionados al almacenamiento de granos (transferencia de calor y masa, respiración y difusión de gases, etc) y grupos de investigación con tradición y experiencia en la temática, no se ha incursionado en el desarrollo y validación de un modelo de refrigeración artificial de granos ni tampoco del proceso de aireación natural y refrigeración artificial de granos en distintas regiones agroclimáticas del país. Su desarrollo permitiría estudiar aspectos técnicos y económicos que permitan conocer y comparar la conveniencia de cada técnica de acuerdo a las condiciones ambientales de cada región.

1.10. Evaluación económica.

Las empresas comerciales intentan maximizar las ganancias económicas de las actividades productivas (Mankiw, 2006). El principal objetivo del almacenaje es incrementar los resultados económicos a través de la obtención de mayores precios en la venta de los granos en los meses posteriores a la cosecha. Estas empresas, toman decisiones dentro de las posibilidades tecnológicas disponibles y eligen la combinación de insumos y tecnología que les permite maximizar las ganancias, o lo que es equivalente, minimizar los costos (Varian, 1992). El retorno económico del almacenaje está dado por la diferencia de precios al momento de venta a futuro menos los costos del almacenaje Alexander y Kenkel (2012). Con este objetivo en mente, los usuarios deciden que, cuánto y por cuánto tiempo almacenar así como de que manera acondicionar el grano. Entre estas decisiones se encuentra la elección de la tecnología de conservación de granos en la poscosecha. Específicamente, las técnicas de acondicionamiento aquí evaluadas podrían presentar distinto nivel de costos tales como consumo energético, insecticidas requeridos, merma y calidad final alcanzada lo que podría redundar en distintos niveles de ingresos y costos asociados a cada una de estas tecnologías.

Los antecedentes en la literatura internacional concluyen que la tecnología de refrigeración artificial resulta económicamente conveniente por sobre la tecnología de aireación. Maier y Rulón (1998) a través del uso de modelos concluye que en maíz pisingallo y trigo, para el manejo integral de plagas, los costos operativos de uso de refrigeración artificial fueron del 22 al 56 % menores que el uso de la aireación tradicional más el uso de fumigantes respectivamente. En el mismo sentido Maier *et al.* (1991) mencionan que la refrigeración artificial puede generar ahorros en el costo de secado, reducción de pérdidas de materia seca, y disminución del deterioro de calidad, originando un flujo de caja positivo. En otras regiones

adicionalmente se podría tener el beneficio de ahorro de uso de insecticidas, mas aún en productos orgánicos, los cuales a su vez poseen mayor valor agregado. Otros autores (Rulon *et al.*, 1999) concluyen que los costos operativos anuales para grano de trigo refrigerado artificialmente fue de 1,47 U\$.t⁻¹ y de 2,93 U\$.t⁻¹ en el tratamiento de aireación más refrigeración. Quirino *et al.* (2007) luego de refrigerar dos silos con 16.000 t de maíz concluyen que el costo operacional de la refrigeración artificial fue menor debido al menor consumo de energía y al ahorro de insecticidas. Lacerda *et al.* (2007) concluyen que el costo operacional del enfriamiento de granos, con aire enfriado artificialmente, fue menor que el de ventilación con aire ambiental. Maier y Bakker-Arkema (1992), mencionan que el costo operativo para un ciclo de enfriamiento artificial de granos hasta 7 °C en el otoño es aproximadamente el mismo que para aireación continua para las condiciones del centro de Michigan, EE.UU.

Si bien existen antecedentes que recomiendan la tecnología de refrigeración artificial en comparación a la aireación, no se cuentan con estudios detallados para las condiciones climáticas y económicas de nuestro país. A su vez, dadas las variaciones climáticas en el país se necesitan técnicas de manejo de granos que se adapten a cada necesidad. Para una determinada región, podría resultar conveniente el uso de aireación, mientras que para otra región podría ser conveniente la refrigeración artificial. Por ej. en la región norte del país, en la estación estival y con mayores temperaturas ambientes respecto a otras zonas del país, la aireación tradicional normalmente demanda menores consumos de energía, no obstante las temperaturas finales del grano obtenidas son mayores. Esto implica mayores costos por uso de insecticidas mientras que en regiones de menores temperaturas ambientes, la situación podría revertirse. La evaluación integral de estas técnicas, para las condiciones de nuestro país, brindaría información sobre la conveniencia bio-económica del uso de estas técnicas para prevenir el desarrollo de insectos en el almacenaje.

2. Hipótesis

1. En ciertas regiones geográficas de Argentina, la temperatura lograda mediante aireación en el trigo almacenado inmediatamente después de la cosecha no es lo suficientemente baja como para limitar por sí sola el desarrollo de insectos.
2. Hay una tendencia a una mayor conveniencia económica de la refrigeración artificial por sobre la aireación combinada con el uso de insecticidas bajo condiciones climáticas de mayor temperatura ambiente.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar técnica y económicamente los procesos de refrigeración y aireación artificial de trigo para diferentes condiciones climáticas de Argentina en el marco de un esquema de control integrado de plagas.

3.2. Objetivos Específicos

Realizar una experiencia de refrigeración artificial y documentar el desempeño de un equipo de refrigeración en función de las condiciones del aire ambiente (temperatura y HR), del grano de trigo (temperatura y humedad), horas de funcionamiento, caudal de aire, temperatura del aire acondicionado y consumo energético.

Validar el modelo SAR-Sim (Secado, Aireación y Refrigeración-Simulación) de simulación de intercambio de calor y masa de granos almacenados para refrigeración y para aireación.

Simular el desempeño de la tecnología de refrigeración y aireación en función de temperatura final lograda, consumo energético, tiempo demandado y mermas de humedad para diferentes zonas climáticas del país.

Evaluar económicamente la tecnología de refrigeración artificial y aireación de trigo en el marco de un programa de control integrado de plagas.

4. Materiales y Métodos

La cosecha de trigo coincide con el inicio del verano, que es la etapa más crítica para el control de insectos debido a que las altas temperaturas favorecen su desarrollo. En tal sentido, la implementación de aireación y refrigeración son más necesarias durante esta época del año, por lo que el presente estudio se focalizó en la factibilidad de implementación de estas tecnologías en el período inmediatamente posterior a la cosecha de los cultivos de verano (ej. trigo, cebada, etc).

4.1. Ensayo de aireación

Para la validación del modelo SAR-Sim en aireación se tomaron los datos del ensayo realizado por de la Torre *et al.* (2009). Dicho ensayo de aireación se realizó entre los días 11/03/2008 y 15/08/2008 en las instalaciones de la EEA INTA Balcarce. (latitud 37°46'07" longitud 58°18'31.99")

La estrategia de funcionamiento del ventilador se implementó en base a la utilización de un controlador automático. En dicho controlador se programó una temperatura límite de funcionamiento (18 °C). El controlador registraba las condiciones de temperatura ambiente una vez por hora, encendiendo (o manteniendo encendido) el ventilador si la temperatura ambiente era menor a la programada (18 °C), o apagando (o manteniendo apagado) el ventilador en caso contrario.

La Figura 3 muestra una imagen del controlador equipado con los siguientes componentes:

Módulo de señal

- 1 antena receptora de señal y transmisora de datos vía GPRS a una página web con gabinete de protección.

Módulo de potencia

- 1 gabinete para protección de los componentes de las inclemencias climáticas.
- 1 llave selectora manual-automático.
- 1 termostato.
- 1 cuenta horas.
- 1 contactor.



Figura 3. Vista del controlador compuesto del módulo de señal (izquierda) y de potencia (derecha).

4.1.1. Descripción del silo

El silo empleado tiene las siguientes dimensiones: 4,5 m de diámetro, 7 m de alto y piso cónico equipado con sistema de conductos de distribución de aire perforados (Figura 4). Con una capacidad de 80 t de trigo.

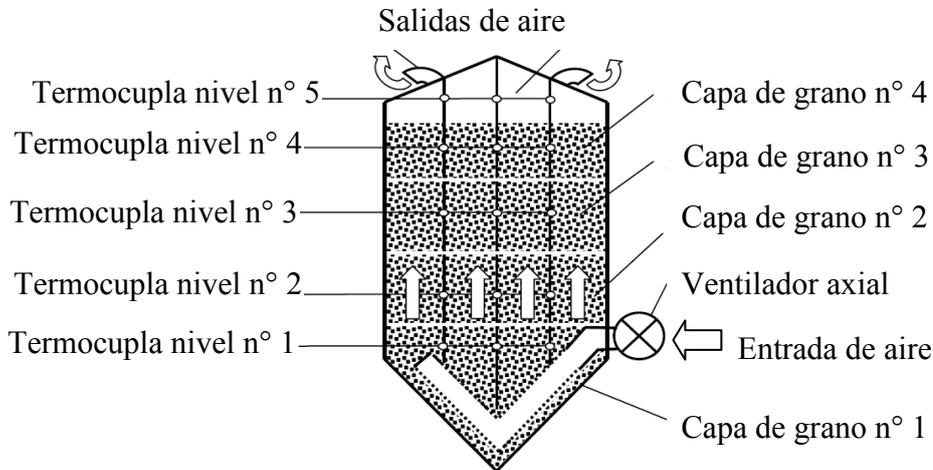


Figura 4. Diagrama del silo usado en el ensayo de aireación. Fuente: de la Torre *et al.* (2009).

4.1.2. Descripción de la conexión al silo

El equipamiento destinado a automatizar la aireación fue instalado en un silo de la EEA INTA Balcarce, provincia de Bs As según el siguiente esquema (Figura 5):

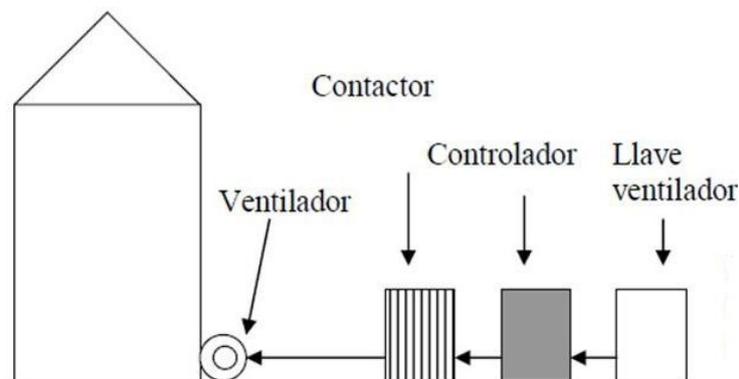


Figura 5. Esquema de conexión del controlador.

4.1.3. Descripción del ensayo

Se programaron a través de una página web las condiciones de encendido del ventilador en cuanto a temperatura y humedad relativa ambiente. El controlador enciende automáticamente los ventiladores cuando las condiciones climáticas se encuentran dentro del rango de parámetros ingresados por el usuario. A su vez el sistema graba y envía en forma automática a la página web los datos de fecha, hora, situación de ventilador encendido o apagado, temperatura y humedad relativa ambiente horaria, temperatura y humedad relativa programada por el usuario. Estos datos se pueden consultar en tiempo real y también quedan almacenados para su análisis posterior.

Al comienzo del ensayo (marzo) la temperatura promedio del grano fue de 18,9°C. La estrategia de enfriamiento consistió en cumplir cuatro ciclos de aireación consecutivos, para lograr un descenso escalonado de la temperatura a medida que las condiciones climáticas se tornaran más frías. Para cada uno de los ciclos se programaron diferentes límites de temperatura. El primer límite de temperatura fue programado en 15 °C es decir que el ventilador funcionó solamente cuando la temperatura ambiente fue inferior a 15 °C. Una vez que el grano estuviera próximo a esta temperatura, el límite fue reprogramado a 10 °C, posteriormente a 5 °C y finalmente a 3 °C. El límite de funcionamiento en cuanto a humedad relativa ambiente durante todo el ensayo fue establecido en 90 %, solamente para evitar que el ventilador funcione en momentos de lluvia o de humedad extremadamente alta. El caudal de aire medido fue de 0,31 m³min⁻¹t⁻¹.

4.1.4. Medición del consumo de energía

El tablero de control eléctrico tiene incorporado un medidor de consumo de energía, el cual se utilizó para medir el consumo eléctrico en cada uno de los ciclos del ensayo.

4.1.5. Medición de temperatura del grano

Durante el ensayo la evolución de la temperatura del grano fue medida diariamente a través del sistema de termometría instalado en el silo, compuesto de 5 cables, uno de estos en el centro, con 5 puntos de medición en altura (aproximadamente a 1,5 m de separación entre niveles), el último de los cuales se encontraba en el espacio aéreo por lo que no fue tenido en cuenta como indicador de temperatura del grano (nivel 5 en Figura 4). La temperatura inicial promedio del grano fue de 18,9 °C.

4.2. Ensayo de refrigeración

El ensayo se llevó a cabo en la planta perteneciente a la firma AgroCasas, zona rural de Rojas, provincia de Bs As, Argentina (latitud 34°16'2.3" longitud 60°52'47.1") durante los meses de enero y febrero de 2011. En dicho ensayo se implementó un tratamiento de refrigeración artificial (RA) como técnica para la disminución de la temperatura de los granos.

4.2.1. Descripción del silo.

Para el tratamiento de RA se conectó el equipo de refrigeración de granos a un silo de chapa de 10,9 m de diámetro, 13,2 m de altura de cilindro, cono inferior de 3,7 m de profundidad, pico superior con 2 m de altura de grano, con una capacidad total a silo lleno de 1.184 toneladas de trigo.

4.2.2. Descripción del equipo de refrigeración

El equipo de refrigeración utilizado fue IMEG modelo #52GA de 300 t diarias promedio de capacidad de refrigeración. Este equipo es de fabricación nacional (Rosario, Santa Fe, Argentina) y tiene una demanda de potencia promedio de 41,5 kW.

El equipo refrigerador está 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. El equipo es móvil, montado sobre un chasis con cuatro ruedas para facilitar su desplazamiento dentro de la playa.

4.2.3. Descripción de la conexión al silo

Para la conexión del equipo al silo se retiró uno de los aireadores y en su lugar se conectó el equipo de frío al sistema de distribución de aire del silo empleando un conducto térmicamente aislado de 4 metros de longitud confeccionado con una manga de tela plástica (Figura 6). Para evitar el escape de aire a través del otro aireador del silo, se tapó su boca de salida mediante un chapón abulonado y posteriormente sellado. Los conductos perforados de aireación de cada aireador estaban conectados entre sí en el interior del silo, permitiendo lograr una distribución uniforme del aire aun cuando este fue inyectado desde una sola entrada.



Figura 6. Vista de la conexión entre el equipo de frío y el silo con 1.184 toneladas de trigo.

4.2.4. Descripción del ensayo

El silo se llenó con trigo a fines de diciembre de 2010, cosechado en el propio establecimiento, a una temperatura de 26 °C en promedio y una humedad de 14 %. El equipo se encendió el día 6/1/2011 a las 18:10 h y se detuvo definitivamente para culminar el ensayo el día 11/1/2011 a las 9:00 h.

Durante este periodo de tiempo, el equipo se detuvo a intervalos no constantes cada día (entre 1 y 2 horas) para registrar la temperatura del grano y realizar actividades de control del equipo. Se contabilizó el tiempo en que el equipo estuvo encendido y apagado.

4.2.5. Medición del consumo de energía

El consumo eléctrico se midió a través de la instalación de un equipo analizador de potencia marca Circutor (CVM-NRG96) obteniendo los kilowatts (kW) totales consumidos (Figura 7) desde el inicio hasta la finalización del ensayo.



Figura 7. Equipo analizador de potencia eléctrica.

4.2.6. Medición de la temperatura de entrada del aire al silo

El día 6/1/2011 a partir de las 21 h se colocaron 2 sensores de medición de temperatura (marca Hobo, modelo Onset) en la parte superior y en el lateral derecho de la transición de conexión al silo, cerca de la boca de entrada de aire al silo (Figura 8). El sensor de temperatura se encuentra en el extremo de un cable el cual se insertó 20 cm en el interior del conducto proveniente del equipo de frío utilizando una guía de alambre. El alambre no toma contacto con el extremo sensor del cable para evitar que la temperatura del alambre afecte la medición del sensor. Los sensores fueron programados para la adquisición del dato de temperatura del aire proveniente del equipo de frío cada 1 minuto, hasta el día 8/1/2011 a las 15:55 h. Posteriormente estos datos de temperatura fueron descargados a una computadora para su procesamiento. Del análisis de los datos de ambos sensores, se evidenció que los valores de temperatura fueron siempre idénticos, independientemente del lugar de medición, por lo que de allí hasta la finalización del ensayo se dejó colocado un solo sensor.



Figura 8. Izquierda: estructura de guía y armado del sensor para insertar en la transición al silo. Derecha: colocación de sensores en la transición al silo.

4.2.7. Medición de la temperatura del grano

El tratamiento de refrigeración se realizó en el silo n° 1 de la planta (Figura 9). El monitoreo de la temperatura del grano se realizó utilizando el sistema de termometría instalado en el silo, compuesto por 4 cables (en los silos n° 01 a n° 04) distribuidos en los cuatro puntos cardinales, cada uno con 9 sensores de

temperatura a distintos niveles (1,5 m de distancia entre niveles). El sensor superior se encontró en el espacio aéreo del silo, sin contacto con el grano, por lo que no se tomó en cuenta su temperatura.

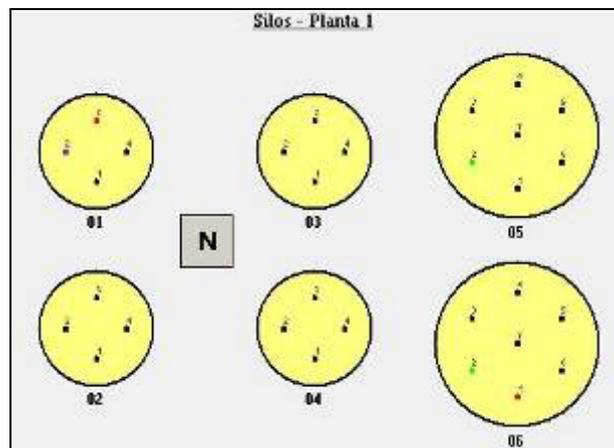


Figura 9. Esquema de la planta de silos donde se desarrolló el ensayo con el detalle de las ubicaciones de los cables de termometría en cada silo. Los silos n° 06 y 07 tienen 7 cables de termometría cada uno. Fuente: Termometría Tesma S.A.I.C., captura de pantalla.

Diariamente, una hora antes de cada medición de temperatura, se detuvo el equipo de frío para evitar interferencias del flujo de aire refrigerado en las lecturas. De esta forma las termocuplas registran la temperatura del grano y no la del aire que circula por el espacio intergranario. A su vez, como se dejó pasar un tiempo entre la circulación del aire de refrigeración y la toma de temperatura, se puede considerar que la temperatura en el interior del grano en el momento de la medición era uniforme. De lo contrario, ya que el proceso de intercambio de calor entre el aire y el grano se da en la superficie del grano, si se mide la temperatura del grano durante el proceso de refrigeración se corre el riesgo de sobreestimar el efecto de enfriamiento (al menos en la zona del granel donde transita el frente de enfriado).

La temperatura inicial promedio del grano fue de 26,3 °C, con una mínima de 22 °C y máxima de 32 °C.

En la Tabla 4 se muestra el promedio de temperatura inicial del grano a distintos niveles, desde 1 (más cercano al suelo) a 8 (a mayor altura en el silo).

Tabla 4. Temperatura del grano de trigo a distintos niveles al inicio del ensayo.

Nivel	Temperatura (°C)
8	32
7	30
6	26
5	26
4	25
3	22
2	25
1	25
promedio	26,3

4.2.8. Programación del funcionamiento del equipo de frío y medición del caudal de aire insuflado

El equipo refrigerador se programó para que insufla aire a 12 °C por ser la menor temperatura que permite el trabajo eficiente del equipo y a 67 % de humedad relativa (HR) por ser el límite mínimo de humedad a partir del cual no pueden desarrollarse los hongos y por estar cercana al equilibrio con la humedad del grano almacenado.

Para determinar el efecto del clima sobre las condiciones de funcionamiento de la unidad de refrigeración se realizaron mediciones de presión estática y del porcentaje de vueltas (rpm) del equipo en distintos días y horarios.

La presión estática se midió en la transición de ingreso del aire frío al silo. Para ello se empleó un manómetro diferencial obteniendo los resultados en milímetros de columna de agua (Figura 10). Por su parte, el % de rpm de funcionamiento del ventilador se obtuvo del tablero de control del equipo.



Figura 10. Medición de la presión estática dentro de la transición que conecta el equipo de frío al silo.

Con el valor de presión estática medida se ingresa a la curva de presión/caudal del ventilador a una determinada condición de funcionamiento (rpm) y se obtiene el caudal ofrecido por el ventilador ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). (Figura 11).

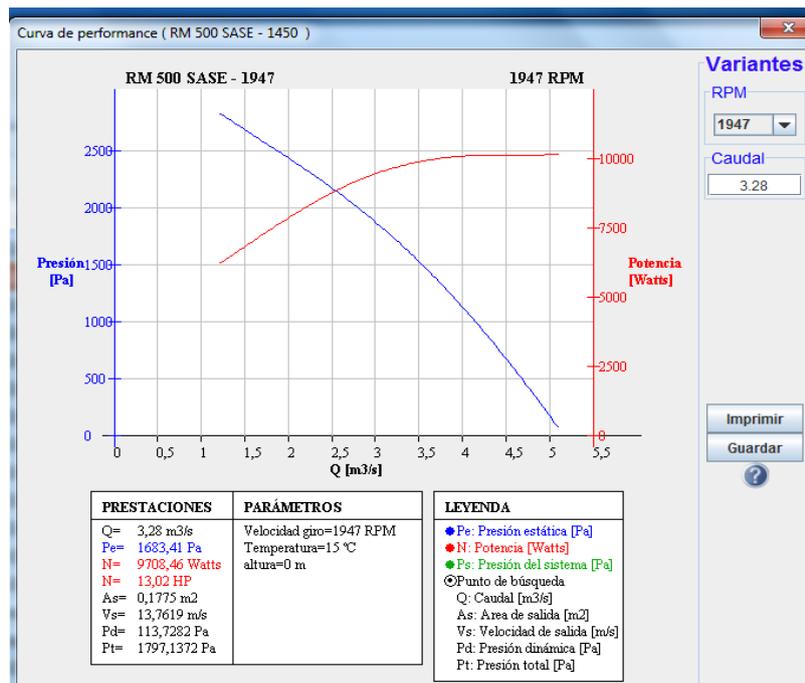


Figura 11. Curva de presión-caudal del ventilador del equipo de frío utilizado en el ensayo.

Ejemplo para determinar el caudal ofrecido por el ventilador basado en la medición de la presión estática y las rpm de funcionamiento:

A las 14 h del día 8 de enero, la temperatura y humedad relativa ambiente fueron de 31 °C y 52,7 %, respectivamente. Bajo dichas condiciones ambientales, el funcionamiento del ventilador fue del 66 % de las máximas rpm (2950 rpm) es decir 1947 rpm y la presión estática medida fue de 1680 Pa. Primero se seleccionan las vueltas del ventilador para ajustar la curva, y luego entrando en el gráfico por el eje de ordenadas (Pa) se interseca la curva y se obtiene en el eje de abscisas el valor de 3,28 m³.s⁻¹ de caudal que entrega del equipo de frío en ese momento (Figura 11).

4.3. Modelo de simulación

La modelización computacional del proceso de refrigeración de granos almacenados en silos convencionales se realizó mediante el modelo SAR-Sim (Secado, Aireación, Refrigeración, Simulación), modelo acoplado de transferencia de masa y energía implementado siguiendo los lineamientos de Khankari *et al.* (1995) y Montross *et al.* (2002a). El modelo SAR-Sim fue desarrollado por la Dra. Rita Abalone y la Dra. Analía Gastón (Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario). Una descripción detallada de los mismos puede consultarse en Abalone *et al.* (2006); Balzi *et al.* (2008) y Gastón y Abalone (2009). Se asume que en cada punto del lecho el aire intersticial se encuentra en equilibrio térmico y sorcional con la masa de granos y que el cambio de volumen del lecho por encogimiento es despreciable, manteniéndose constante la porosidad. El modelo de simulación incorpora propiedades termofísicas dependientes de la temperatura y humedad, diferentes modelos para representar las curvas de equilibrio de los granos (modelos de Henderson, Thompson modificado, Chung Pfost y Hasley), términos fuente para considerar la energía puesta en juego en la sorción/desorción de humedad y en el proceso de respiración. Durante las etapas de aireación o refrigeración, se impone una distribución de flujo uniforme en base al caudal específico empleado.

Este modelo predice la evolución de la distribución de temperatura, el contenido de humedad del grano y la humedad relativa de equilibrio del aire intergranario en función de la condición inicial del grano (temperatura y contenido de humedad), el caudal de aire específico y la temperatura y HR del aire que ingresó al silo. El sistema computacional SAR-Sim ha sido implementado en Compaq Visual Fortran 6.0, basado en Fortran 90, para ser ejecutado en computadoras PC con Sistema Operativo Windows. El modelo SAR-Sim fue contrastado con un modelo 2D de transferencia de masa y energía implementado en COMSOL Multiphysics 4.2a, software comercial para análisis de problemas multifísica que emplea el Método de Elementos Finitos para la resolución numérica de las ecuaciones asociadas. Se obtuvo una buena concordancia entre ambos modelos de simulación, siendo las diferencias del orden de 1 °C.

4.3.1. Módulo de aireación

En la simulación de AN (aireación natural), el programa asume que las condiciones de entrada del aire al silo son iguales a las del aire ambiente (tomada de la base de datos climáticos), más el incremento en la temperatura producto de la fricción y compresión del aire por parte del ventilador (Osborne, 1977) según la siguiente ecuación:

$$\Delta T = \frac{kP}{\rho_{\text{aire}} c_a \varepsilon} \quad \text{Eq. 1}$$

Donde:

ΔT : incremento de temperatura (°C)

kP : presión estática (kPa)

ρ : densidad del aire (kg.m⁻³)

c_a : calor específico del aire (kJ.kg.°C⁻¹)

ε : eficiencia de trabajo del ventilador (0,6)

Calculado el incremento de la temperatura del aire, se ajusta la humedad relativa según las propiedades psicrométricas del aire descritas en el estándar de ASAE D271.1 (ASAE, 2010). A partir de las condiciones de temperatura y HR corregidas, el modelo de simulación calcula los procesos de intercambio de calor y masa entre el aire y el grano. La simulación se da por concluida cuando el grano llega a una determinada temperatura final promedio prefijada para cada localidad. Durante las etapas sin aireación se impone una velocidad del mismo orden de magnitud de las corrientes de convección natural dentro de la masa de granos obtenidas con el modelo 2D implementado en COMSOL Multiphysics. Finalmente, el modelo provee los datos de temperatura y humedad final del grano en las diferentes capas, horas de funcionamiento del ventilador y consumo energético, entre otros.

4.3.2. Módulo de refrigeración

En la simulación de RA (refrigeración artificial), el modelo incorpora un módulo que representa el equipo de refrigeración artificial simulando sus condiciones típicas de funcionamiento. Dado que disminuir la temperatura del aire tiene una demanda de energía (kcal/kg de aire) cuya magnitud depende de la temperatura inicial y final del aire, al módulo de refrigeración se le incorporaron los parámetros de funcionamiento

de un equipo refrigerador, incluyendo el coeficiente de performance (COP), la capacidad térmica de refrigeración y el caudal de aire máximo. Maier y Navarro (2002) indican que el COP establece una relación entre el consumo de energía eléctrica del equipo (kWh) y la capacidad de refrigeración (kW) y que dicho coeficiente se halla en un rango de entre 2,5 y 3,5 para la mayoría de los equipos de refrigeración. El COP depende del refrigerante, la carga de presión en el sistema del equipo, presión de succión y condiciones ambientales (Stoecker, 1958) y es un parámetro de eficiencia. Los equipos de refrigeración tienen una capacidad máxima de refrigeración y cuando se programa una determinada temperatura de trabajo (temperatura de aire refrigerado) el equipo regula el caudal de aire en función de la demanda energética del salto térmico del aire (temperatura ambiente - temperatura programada). Cuanto mayor es el salto térmico (kcal/kg de aire), mayor será la demanda energética (kcal), la cual en algunos casos puede ser superior a la capacidad térmica del equipo (kcal). En dicho caso, el equipo reduce el caudal de aire (kg aire) para compensar la demanda energética de refrigeración con la cantidad de aire a refrigerar.

Una vez prefijados los parámetros del equipo (potencia, COP, caudal de aire, etc) se le debe programar la temperatura y HR del aire acondicionado, tal como se le debe indicar a un equipo real. Con esos datos, el módulo de refrigeración ajusta el caudal de aire en función de las condiciones climáticas (temperatura y HR ambiente, tomadas desde una base de datos climáticos históricos de la localidad) y estima el consumo de potencia.

La demanda total de energía está dada por:

Eq. 2

$$D.e. = \text{Salto energetico aire (kJ / kg)} * \text{Caudal de aire (kg / h)}$$

Donde:

D.e.: demanda de energía (kJ.h⁻¹)

Salto energético aire (kJ.kg⁻¹): diferencia de energía entre un kilogramo de aire ambiente y aire refrigerado

Caudal de aire (kg.h⁻¹): caudal de aire del equipo de refrigeración

Por otra parte, la demanda de energía no puede superar la capacidad del equipo de refrigeración (demanda (kJ) ≤ capacidad del equipo (kJ)), por lo que si la necesidad de energía para enfriar un kg de aire es muy alta (bajar muchos °C), el equipo tiene que compensar reduciendo el caudal que puede ofrecer.

Los parámetros necesarios para el cálculo lógico que utiliza el simulador son los siguientes:

- Características del equipo:

Coeficiente de performance (kW.kWh⁻¹): COP

Caudal máximo de circulación (kg (aire).s⁻¹): Qmax

Consumo máximo del compresor (kW): CECm

Consumo máximo de los ventiladores (kW): CEVm

Consumo eléctrico total máximo (kW): CETm

- Condiciones ambientales:

Temperatura ambiente (°C): Ta

Humedad relativa ambiente (%): HRa

- Características del aire refrigerado:

Temperatura de refrigeración (°C): Tref

Humedad relativa de refrigeración (%): HRref

A partir de las características del equipo se determinan las siguientes magnitudes para cada período de funcionamiento (definido por la frecuencia de datos climáticos de la base de datos, en este estudio la frecuencia fue de 1 hora):

Máxima Potencia de refrigeración (kW): $P_{MAXREF} = COP * CET_m$

Máxima diferencia de entalpía removible (kJ/kg (aire)): $\Delta H_{max} = P_{MAXREF} / Q_{max}$

La Figura 12 muestra esquemáticamente las variables que intervienen en el proceso de funcionamiento del equipo de frío.

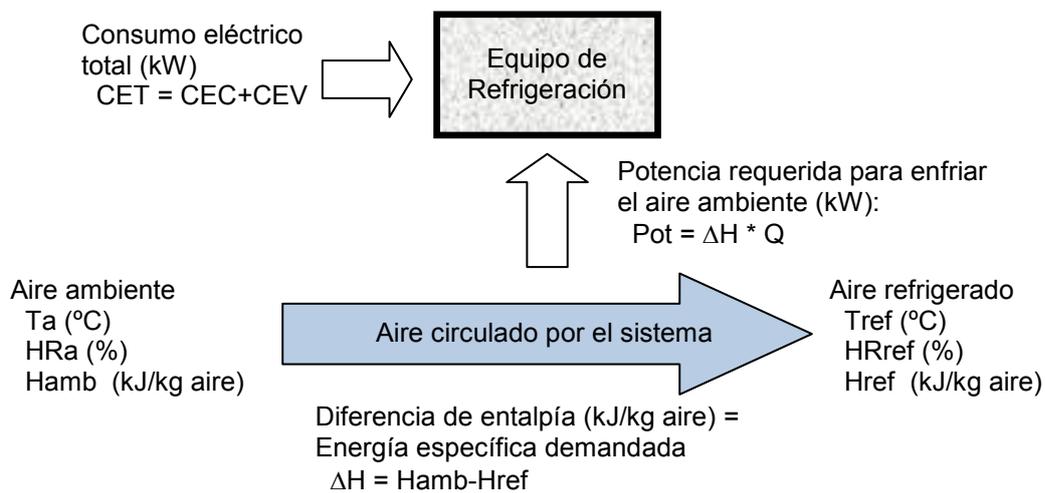


Figura 12. Variables intervinientes en el funcionamiento del equipo de frío.

A partir del cálculo de la diferencia de entalpía ΔH se determina el caudal y consumo efectivo del equipo, de acuerdo al siguiente diagrama de flujo (Figura 13):

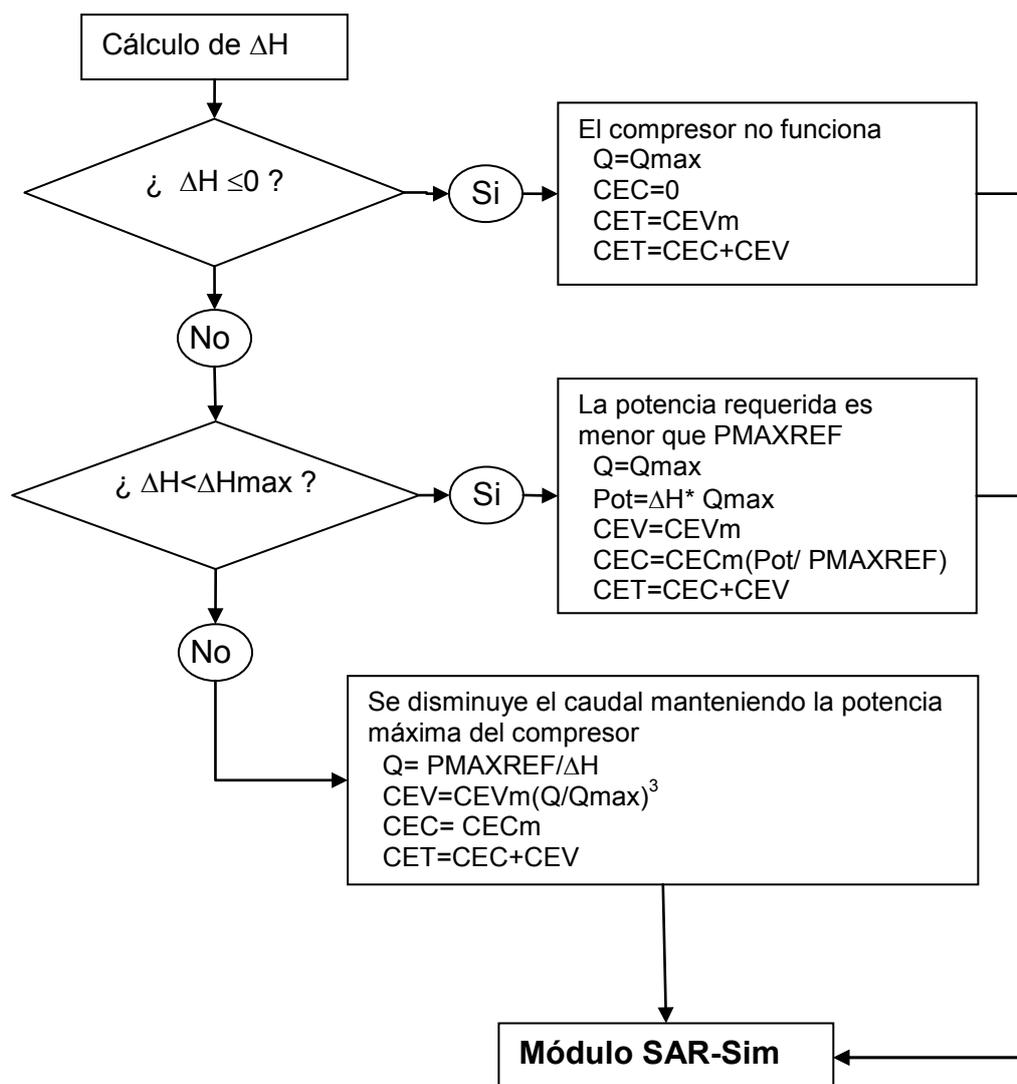


Figura 13. Esquema lógico de funcionamiento del módulo de refrigeración

4.3.3. Validación del modelo SAR-Sim en los tratamientos de aireación y refrigeración

Previo a la utilización del modelo **SAR-Sim** para evaluar el desempeño de aireación y refrigeración en diferentes localidades del país se procedió a realizar la validación del mismo con los datos recolectados experimentalmente para refrigeración y los aportados del ensayo por de la Torre *et al.* (2009) para aireación.

Esta validación consistió en comparar los resultados observados y los predichos durante el ensayo mediante dos indicadores estadísticos: 1) el error estándar de los residuales (S.E.) y 2) el promedio en valor absoluto de los residuales (PVAR). Estos indicadores son los mismos usados por Iguaz *et al.* (2004a y b), Bartosik y Maier (2007) y de la Torre *et al.* (2009) en validaciones de modelos de simulación de secado y aireación.

Eq. 3

$$S.E = \sqrt{\frac{\sum (y - y')^2}{df}}$$

Donde:

S.E.: error estándar de los residuales. Es el promedio de la desviación estándar entre los valores medidos y el valor predicho por el modelo de simulación SAR-Sim. Cuanto más pequeño el valor de S.E. mejor es la predicción del modelo (menor la diferencia entre los valores observados y los predichos)

y: valor medido

y': valor predicho por el modelo

df: grados de libertad (n-1)

Eq. 4

$$PVAR = \frac{\sum |Y - Y'|}{obs.}$$

Donde:

PVAR: promedio valor absoluto de los residuales. Es el promedio de los valores absolutos de las diferencias entre los valores medidos y los predichos por el modelo SAR-Sim. Cuanto más pequeño el valor de PVAR mejor es la predicción del modelo (menor la diferencia entre los valores observados y los predichos)

Y: valor medido.

Y': valor predicho por el modelo.

Obs.: Numero de observaciones.

4.3.3.1. Validación del tratamiento de aireación

Para la validación del modelo **SAR-Sim**, se tomaron los datos del ensayo de la Torre *et al.* (2009) citado previamente.

Se consideró el calentamiento del aire ambiente producido por la fricción y compresión del aire por parte del ventilador (aireación insuflando), el cual reduce la diferencia entre la temperatura ambiente (más baja) y la del grano, reduciendo la eficiencia del intercambio térmico entre el aire ambiente y el granel (Osborne, 1977). Este aumento de temperatura se determinó con la Eq. (1). Los parámetros de simulación involucrados están descritos en la Tabla 5.

Tabla 5. Variables involucradas en la validación del modelo **SAR-Sim** para la aireación de granos, rango de valores y forma de obtención.

Variable	Valor	Medida/Estimada
Temperatura inicial grano (°C)	Programación menor a 15 °C: promedio temperatura del grano 18,9.	Medida con termometría
	Programación menor a 10 °C: promedio temperatura del grano 17,1.	Medida con termometría
	Programación menor a 5 °C: promedio temperatura del grano 12,1.	Medida con termometría
	Programación menor a 3 °C: promedio temperatura del grano 11,2.	Medida con termometría
Humedad inicial grano (% b.h)	14 %	Medida al ingreso del grano en el silo
Caudal específico de aire ($m^3 \cdot min^{-1} \cdot t^{-1}$)	0,31	Medido con anemómetro en la superficie del grano.
Temperatura del aire (°C)	variable	Medida por sensor ambiente a cada hora
HR del aire (%)	variable	Medida por sensor ambiente a cada hora
Fecha comienzo	11/03/2008	Día calendario.
Fecha finalización	15/08/2008	Día calendario.
Incremento de temperatura del aire debido a la compresión del ventilador (°C).	1,502	Osborne (1977)
Pérdida de materia seca por respiración (%)	variable según temperatura del grano	White <i>et al.</i> (1982)

4.3.3.2. Validación tratamiento de refrigeración

Los valores de temperatura obtenidos por el sensor Hobo ubicado en la transición de entrada del aire al silo (Figura 8) fueron utilizados como datos de entrada para el modelo **SAR-Sim** a fin de simular el proceso de refrigeración.

La humedad relativa se consideró constante e igual a 67 % (humedad relativa a la cual fue programado el equipo de refrigeración). La temperatura del grano inicial fue tomada de los datos de termometría registrados al comienzo del ensayo y la humedad del grano inicial fue de 14 %. La misma se determinó en función del registro de la humedad de entrada del grano al silo, siendo esta además la humedad estatutaria de comercialización según norma N° XX Resolución 1262/2004.

El caudal de aire considerado para la validación fue el caudal promedio medido, de $0,17 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$.

El consumo energético por hora de funcionamiento se calculó en base a las especificaciones de un equipo promedio de los que puede hallarse actualmente en el mercado argentino siguiendo la metodología establecida por Maier y Navarro (2002). Para esta validación se estableció un valor de COP de 3.

Debido a la influencia de las condiciones climáticas (altas temperaturas) sobre el aire refrigerado que se transporta por el conducto de conexión entre el equipo de frío y la boca de entrada al silo, se consideró un incremento de temperatura de $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Roskopf y Bartosik, 2011).

Se consideró enfriar en promedio la masa de granos por debajo de $15 \text{ }^\circ\text{C}$, finalizando el ciclo de refrigeración cuando el promedio de temperatura del grano fuera menor a dicho valor y en todo el granel almacenado no se registre un valor superior a $17 \text{ }^\circ\text{C}$. La Tabla 6 resume los parámetros utilizados en la validación del modelo **SAR-Sim** para refrigeración de granos.

Tabla 6. Variables involucradas en la validación del modelo **SAR-Sim** para la refrigeración de granos, rango de valores y forma de obtención.

Variable	Valor	Medida/Estimada
Temperatura inicial grano ($^\circ\text{C}$)	De 22 a 32	Medida con termometría
Humedad inicial grano (% bh)	14	Medida al ingreso del grano en el silo con higrómetro
Caudal específico de aire ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$)	0,176	Medido con manómetro de presión diferencial y derivado de la curva del ventilador.
Temperatura del aire ($^\circ\text{C}$)	variable	Medida cada 1 minuto mediante sensor a la entrada del conducto de aireación
HR del aire (%)	63	Se estimó constante en función de la HR programada en el equipo
Incremento de temperatura del aire entre la salida del equipo y el ingreso al silo ($^\circ\text{C}$)	2,5	Medido del ensayo
Fecha y hora comienzo	6/1/2011 a las 18:10 h.	Día calendario y reloj
Fecha y hora finalización	11/1/2011 a las 9:00 h.	Día calendario y reloj

4.3.3.3. Simulación para diferentes localidades de los tratamientos de aireación y refrigeración

Una vez validado el modelo **SAR-Sim** para aireación y refrigeración se procedió a hacer un estudio de ambas tecnologías para diferentes regiones agro-climáticas del país en el marco de un esquema de control integrado de plagas. Esto implica que el objetivo fundamental de la aireación y refrigeración fue reducir la temperatura para minimizar el desarrollo de insectos. Típicamente el manejo de la aireación se realiza por ciclos, tratando de enfriar el grano a la temperatura más baja posible de acuerdo a las condiciones climáticas típicas de la localidad y la época del año (Abadía y Bartosik, 2013). El primer ciclo, para el caso de la cosecha de cultivos estivales en el mes de la cosecha, tiene como objetivo llevar la temperatura del granel lo más bajo posible, preferentemente por debajo del rango de máxima actividad de los insectos (25 °C). El segundo ciclo normalmente se realiza al comienzo del otoño, cuando las temperaturas ambientales bajaron lo suficiente como para enfriar el grano por debajo del límite de actividad de los insectos. Eventualmente, según cuanto se extienda el período de almacenamiento, se puede realizar un tercer ciclo de aireación durante el invierno para enfriar los granos a la temperatura más baja posible (ej. 5 °C) y así poder extender su almacenamiento hasta la primavera/verano.

El estudio se realizó teniendo en cuenta que el trigo se cosecha en Argentina en la época estival (Diciembre y Enero principalmente). La temperatura a la cual normalmente se almacena el grano luego de la cosecha predispone el desarrollo de plagas, ya que típicamente se encuentran entre los 22 °C y los 35 °C, por lo que enfriarlo con aireación o refrigeración sería beneficioso.

Para cada localidad se realiza un estudio comparativo mediante la simulación de los tratamientos de aireación y refrigeración artificial utilizando la misma condición inicial del grano (temperatura y humedad) y la misma base de datos climática. Una vez que se llega a la temperatura final del proceso de aireación (variable, según la localidad) y refrigeración (15 °C) se asume que la gran masa de granos se puede mantener a dicha temperatura durante el período más crítico (enero-abril). Varios trabajos (Balzi *et al.*, 2008; Montross *et al.*, 2002a y b) indican que una vez que se enfrió el granel, el grano es un mal conductor del calor y, por lo tanto, no se calienta significativamente influenciado por las condiciones externas. El calentamiento del grano enfriado afecta fundamentalmente unos centímetros por debajo de la superficie de la masa de granos y unos centímetros hacia adentro de las paredes del silo. Esto ocurre fundamentalmente cuando se trata de grano seco (baja tasa respiratoria y, por lo tanto, baja generación de calor) y se toma la precaución de sellar la boca del ventilador y evitar de esta manera el calentamiento interno del grano por el denominado “efecto chimenea” (movimientos convectivos del aire) (Navarro *et al.*, 2002a).

Esto implica que si se logra enfriar la temperatura del grano por debajo del límite de actividad de insectos a principios del verano, ésta permanecerá así hasta el otoño (abril), donde se podría realizar un segundo ciclo de aireación y/o refrigeración (este segundo ciclo no fue contemplado en el presente estudio). De igual manera, si durante el almacenamiento estival del grano enfriado hubiera un pequeño recalentamiento en la superficie del granel, este se podría eliminar con pocas horas de funcionamiento de aireación. Por el contrario, si no se logra bajar la temperatura por debajo del límite de actividad de los insectos, entonces se debe complementar el tratamiento de aireación con una medida de control químico (protectante y/o fumigante). Como el tratamiento de refrigeración está programado para llevar la

temperatura por debajo del límite de desarrollo de insectos, queda excluida la necesidad de un tratamiento químico.

Para la simulación se utilizó una base de datos climáticos (históricos horarios) previamente confeccionada y utilizada por de la Torre *et al.* (2009). Se simuló el proceso de aireación y refrigeración de trigo para las siguientes localidades: Balcarce (Bs As), Anguil (La Pampa), Pergamino (Bs As), Manfredi (Córdoba) y Sáenz Peña (Chaco). La disponibilidad de datos climáticos con tales características fue variable según las localidades. La Tabla 7 presenta los años disponibles en la base de datos de cada localidad, donde se puede apreciar que los años con datos climáticos de calidad para realizar esta simulación horaria van desde 5 para Manfredi hasta 16 para Anguil. Se considera que, en líneas generales, con esta serie de años se puede estudiar las condiciones climáticas típicas esperables para una determinada localidad.

Tabla 7. Localidades y años de simulación.

Localidad	Años de simulación
Anguil	1990 al 2006
Balcarce	1991 al 2004
Manfredi	2000 al 2004
Pergamino	2001 al 2006
Sáenz Peña	1999 al 2006

El inicio de simulación en AN y RA se fijó en la fecha promedio de cosecha en cada localidad. Para ello se consultó por región, a dos especialistas calificados del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). El horario de comienzo fue a las 8:00 h, y se consideró como límite máximo de tiempo para completar el proceso de aireación 30 días.

A continuación en la Tabla 8 se muestran las medias, máximas y mínimas medias de temperaturas ambientes para cada localidad, correspondiente al período de tiempo en el que se realizó la simulación.

Tabla 8. Temperatura ambiente promedio, mínima y máxima del mes en el cual se realizó la simulación para las diferentes localidades.

Localidad	Temp. ambiente promedio (°C)	Temp. ambiente mínima (°C)	Temp. ambiente máxima (°C)	Período de simulación
Anguil	22,2	14,5	29,9	15/12-15/01
Balcarce	19,9	13,1	26,7	20/12-20/01
Manfredi	23	16,6	29,3	10/12-10/01
Pergamino	23,1	16,5	29,7	15/12-15/01
Sáenz Peña	23,7	17	30,5	25/10-25/11

4.3.3.4. Parámetros de simulación

Para ambos tratamientos (RA y AN) se consideró un silo de 15,5 m de alto, 10,9 m de diámetro, piso plano, con una capacidad total de almacenamiento de 1.238 t de trigo, siendo este tamaño de silo representativo de lo que se puede encontrar en los acopios o en los establecimientos de productores. El volumen del silo y capacidad de almacenamiento fueron calculadas con el programa AireAR (Bartosik *et al.*, 2009) en base a las dimensiones preestablecidas.

A partir de la base del silo se consideraron puntos de control de temperatura a los 0,15; 2,25; 4,35; 6,45; 8,55; 10,65; 12,75 y 14,85 m de altura. El programa de simulación permite extraer los valores de temperatura del grano de las mencionadas ubicaciones de manera horaria durante todo el período de simulación.

4.3.3.4.1. Tratamiento de aireación

Se consideró un caudal de aire de $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$, el cual es un caudal de aire típicamente recomendado para aireación de mantenimiento (Abadía y Bartosik, 2013). El manejo de la aireación se realizó simulando el funcionamiento de un termostato que enciende el ventilador de aireación siempre que la temperatura ambiente sea igual o inferior a un valor límite de funcionamiento. El límite de funcionamiento del termostato se calculó para cada localidad y fue variable de acuerdo a las condiciones climáticas típicas. Si se fija un valor demasiado bajo, el ventilador no funcionará la cantidad de horas necesarias como para enfriar la totalidad del granel en el período de un mes. Por otra parte, si se fija un límite demasiado alto no se llega a obtener todo el beneficio potencial de la aireación con aire natural. Por lo tanto, la obtención de dicho límite se realizó mediante sucesivas corridas de simulación en las cuales se cambió el límite de funcionamiento hasta lograr que en el período de un mes se pueda enfriar el grano a la menor temperatura posible en el 80 % de los años para cada localidad. Para cada corrida, el criterio de finalización de la aireación fue que el valor máximo de temperatura del grano a cualquier altura del granel sea como máximo dos grados superior al promedio.

De acuerdo a las condiciones climáticas, la temperatura final lograda en cada localidad será diferente. En algunos casos, la temperatura del granel permitiría el desarrollo de insectos (temperatura por encima de los $17 \text{ }^\circ\text{C}$) por lo que es necesario considerar el uso complementario de insecticidas químicos. Entonces, para relacionar los resultados de la AN con el concepto de control integrado de plagas se estableció una clasificación en función de la temperatura final y su efecto sobre los insectos plagas de granos almacenados:

- óptimo: menos de $17 \text{ }^\circ\text{C}$.
- subóptimo: de 17 a $20 \text{ }^\circ\text{C}$.
- medio: 20 a $25 \text{ }^\circ\text{C}$.
- alto: más de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

En base a esta clasificación se estableció que si el resultado de la AN es óptimo, entonces no hace falta complementar con control químico. Si el resultado de la AN es subóptimo, medio o alto entonces hace falta combinar la aireación con una medida de control químico.

Como se estableció previamente, a mayor temperatura del grano, mayor desarrollo de insectos. Por otra parte, altas temperaturas del grano causan volatilización y disminución de la residualidad del insecticida (Mason y Obermeyer, 2010). Por lo tanto, a medida que aumenta la temperatura promedio del grano, la dosis de insecticida fumigante y protectante debe ser mayor. En la sección 4.4.1.1 (análisis económico) se detalla la manera en que se ajustan las dosis del fumigante y protectante en función de la escala propuesta arriba.

Además de condicionar el funcionamiento del ventilador en función de la temperatura ambiente, la estrategia de aireación también establece como criterio que la humedad relativa máxima ambiente para el funcionamiento de los aireadores fuera de 95 %, para evitar su funcionamiento en días de lluvias.

Los resultados de la corrida del modelo de simulación fueron: temperatura promedio y máxima del grano (°C) al finalizar la simulación, humedad del grano promedio final, tiempo de funcionamiento del ventilador (h), consumo total de energía (kWh) y consumo eléctrico específico (kWh.t⁻¹).

4.3.3.4.2. Tratamiento de refrigeración

Se consideró un equipo que actualmente se utiliza en Argentina para el enfriamiento de granos con una potencia de 55,6 HP. Este equipo está conformado por un compresor de 6 cilindros de una capacidad de refrigeración de 119,5 kW, un ventilador centrífugo para impulsar el aire y dos ventiladores axiales ubicados en el condensador. Este equipo, funcionando a silo lleno proveería un caudal de aire de 0,176 m³.min⁻¹.t⁻¹ El aire ingresó al silo a 13,5 °C y HR 63 %.

Se consideró que el ciclo de refrigeración finalizó cuando la temperatura promedio del granel bajó de 15 °C y la máxima por debajo de 17 °C.

Como la temperatura final a la que se logra enfriar los granos está por debajo del límite de actividad de los insectos plagas de granos almacenados (Navarro *et al.*, 2002b), no se considera necesario la realización de ningún tratamiento químico extra sobre el grano.

Los resultados de la corrida del modelo de simulación fueron: temperatura promedio y máxima del grano (°C) al finalizar la simulación, humedad del grano promedio final, tiempo de refrigeración (h), consumo total de energía (kWh) y consumo eléctrico específico (kWh.t⁻¹).

4.4. Análisis económico

4.4.1. Estructura de costos

La evaluación económica de las alternativas considera los costos e ingresos asociados tanto al tratamiento de refrigeración como al de aireación de la cantidad de trigo considerado.

La metodología empleada se realiza en base al presupuesto parcial el cual es el presupuesto de una parte de la empresa, de un problema o de una alternativa productiva que no modifica sustancialmente la integración y/o estructura de capital de una empresa (Frank, 1987). Es decir, se utilizarán ingresos y egresos que se vean modificados por la elección de aireación o refrigeración, mientras que costos e ingresos comunes a ambos tratamientos serán excluidos del análisis.

Se consideró un periodo de almacenaje de tres meses luego de los cuales se procede a la venta del trigo, liberando las instalaciones para limpieza, tratamiento y posterior almacenaje del grano de la próxima cosecha gruesa, resultando esta práctica habitual en el país.

El costo de la energía eléctrica considerada para el análisis fue de 0,64 \$.kW⁻¹.h⁻¹ siendo igual para ambos tratamientos y se obtuvo del tarifario vigente en la región de la planta de acopio donde se desarrolló el ensayo. Además, dado el carácter relativo del análisis y para poder estudiar el efecto del clima sobre el costo de las técnicas de aireación y refrigeración, se utilizó el mismo valor de la energía para todas las localidades analizadas.

4.4.2 Tratamiento de aireación.

4.4.2.1 Costos para el control químico de insectos

Considerando un esquema de control integrado de plagas se propone un uso combinado de dos herramientas de control químico. Por un lado se plantea el uso de protectantes líquidos que se aplican a la carga del grano en el silo o durante un

trasile y que tiene la función de prevenir el desarrollo de insectos cuando las condiciones de temperatura son predisponentes. Por otro lado se propone el uso de un fumigante (fosfina) que tiene la función de controlar todos los insectos cuando estos están presentes (curativo).

Si el grano se logra enfriar en promedio a 17 °C o menos (nivel óptimo), entonces no se considera el uso de químicos, ya que las condiciones de temperatura limitan el desarrollo de insectos. Cuando las temperaturas finales del grano que se logran empleando aireación resultan mayores a 17 °C (límite inferior para el desarrollo de insectos) se consideró el uso de insecticidas protectantes y fumigantes de acuerdo a la temperatura promedio final y la temperatura máxima del grano respectivamente, según se detalla en las tablas 9 y 10.

Las temperaturas del grano tienen influencia sobre la efectividad de los insecticidas. Así, mayores temperaturas resultan en rápida volatilización y reduce las cualidades residuales del protectante causando la ruptura de su acción insecticida (Mason y Obermeyer, 2010; Flanders, 2012). Debido a esto se consideró el uso de dosis creciente de protectante de acuerdo a la temperatura promedio del grano (siempre dentro del rango de las concentraciones de marbete) (Tabla n° 9). El incremento en la dosis se estableció en base de consultas a profesionales del control de plagas y a información técnica de los principios activos.

Los costos de los insecticida protectantes y fumigantes fueron obtenidos mediante la consulta a empresas dedicadas a la venta de insecticidas y al servicio de control de insectos en plantas de acopio. Como insecticida protectante se consideró una formulación a base de pirimifos metil (50 % p/v) + lambdacialotrina (5 % p/v) cuya denominación comercial es Actellic Plus. El costo del insecticida fue de 218,5 \$.l⁻¹. y su costo de aplicación de 2 \$.t⁻¹. De esta forma, por ej. considerando una dosis de 6 cc.t⁻¹ se obtiene un costo total de 3,31 \$.t⁻¹.

Tabla 9: detalle de dosificación y costos de uso de insecticida protectante.

Rango de temperatura promedio del grano	Precio por litro protectante (\$.l ⁻¹)	Dosis (cc.t ⁻¹)	Costo producto \$.t ⁻¹ .	Aplicación \$.t ⁻¹ .	Costo total \$.t ⁻¹ .
menos de 17 °C	218	0	0	0	0
entre 17 y 20 °C	218	6	1,31	2	3,31
entre 20 y 25 °C	218	8	1,74	2	3,74
más de 25 °C	218	10	2,18	2	4,18

El uso de fumigante se toma como reaseguro en caso de que el insecticida protectante no sea suficiente, por sí sólo, para el control de los insectos. Esto debe considerarse porque en Argentina la normativa legal establece la prohibición de comercialización de granos con insectos vivos (Norma XX-Trigo pan). A mayor temperatura del grano, mayor es la posibilidad de falla del protectante y por lo tanto, de presencia de insectos vivos en la masa de granos. Debido a ello la aplicación de fumigante es más probable cuando mayor es la temperatura del grano. Es sabido que cuando se enfría un granel con aireación impulsando el aire desde abajo hacia arriba (insuflando), el nivel superior de la masa de granos tarda más tiempo en enfriarse y resulta con mayor temperatura al final del proceso, siendo por lo tanto la

zona más crítica respecto del desarrollo de insectos. Por los motivos expuestos se toma la temperatura de la capa superior para determinar la posibilidad de uso de fumigante. En base a la consulta a personal especializado de empresas prestadoras de servicio de control de insectos se estableció una escala de probabilidad de aplicación de fumigantes. A su vez, el costo del fumigante y su aplicación se estableció en 6,9 \$.t⁻¹ (Tabla 10).

Tabla 10. Costo de aplicación de fumigante, probabilidad de aplicación y costo anual ponderado según la temperatura máxima del granel.

Rango de temperatura máxima del grano	Costo fumigante (\$.t ⁻¹)	Probabilidades aplicación fumigantes (%)	Costo fumigantes ponderado (\$.t ⁻¹)
Menos de 17 °C	6,9	0	0
Entre 17 y 20 °C	6,9	25	1,73
Entre 20 y 25 °C	6,9	50	3,45
Más de 25 °C	6,9	100	6,9

De esta manera, si en una determinada localidad la temperatura final a la cual se logra enfriar el grano en la capa superior está entre 17 y 20 grados, la probabilidad de uso de fumigante será del 25 % (uno de cada cuatro años habría eclosión de insectos y necesidad de uso de fumigantes). Esto implica que si el costo por aplicación es de 6,9 \$.t⁻¹, en promedio cada año se estaría gastando de fumigante la cantidad proporcional de 1,73 \$.t⁻¹.

En la Tabla 11 se detalla la combinación de aplicación de insecticidas protectantes y fumigantes según la temperatura promedio y máxima (capa superior) lograda al finalizar el proceso de aireación.

Tabla 11. Costos de aplicación de insecticida protectante y fumigante según la temperatura promedio y máxima de los granos.

Temperatura promedio del grano	Costo protectante (\$.t ⁻¹)	Temperatura máxima del grano	Costo fumigante (\$.t ⁻¹)	Costo total control químico (\$.t ⁻¹)
Menos de 17 °C	0	Menos de 17 °C	0	0
	0	Entre 17 y 20 °C	1,73	1,73
	0	Entre 20 y 25 °C	3,45	3,45
	0	Más de 25 °C	6,9	6,90
Entre 17 y 20 °C	3,31	Entre 17 y 20 °C	1,73	5,04
	3,31	Entre 20 y 25 °C	3,45	6,76
	3,31	Más de 25 °C	6,9	10,21
Entre 20 y 25 °C	3,74	Entre 20 y 25 °C	3,45	7,19
	3,74	Más de 25 °C	6,9	10,64
Más de 25 °C	4,18	Más de 25 °C	6,9	11,08

Se debe considerar que las temperaturas promedio y máximas del grano pueden finalizar en distintos rangos (temperatura máxima siempre ≥ que temperatura

promedio). Así, por ejemplo, si la temperatura promedio final del grano se encuentra entre 17 °C y 20 °C, y la temperatura máxima entre 20 °C y 25 °C, el costo incurrido en el uso de protectantes y fumigantes fue de 3,31 \$.t⁻¹ y 3,45 \$.t⁻¹ respectivamente, con un total de 6,76 \$.t⁻¹.

4.4.2.2. Costo de energía eléctrica

Para la elección del ventilador se utilizó el programa Airear (Bartosik *et al.*, 2009). En este programa, introduciendo los datos de tipo de grano, humedad, dimensiones del silo y peso hectolítrico, se puede seleccionar el ventilador necesario de una base de datos de ventiladores cargados en el programa que permita proveer el caudal deseado (m³.min⁻¹.t⁻¹) (Figuras 14 y 15).

The screenshot shows the 'AireAr Carga y Resultado' interface. It is divided into several sections:

- Grano:** A dropdown menu is set to 'Trigo (aireación)'. Below it, 'Humedad *' is 14% and 'PH *' is 77 kg/hL.
- Opciones Avanzadas:** A checkbox for 'Modificar Opciones Avanzadas' is unchecked. 'Multiplicador de la curva de Shedd *' is 1,2.
- Almacenamiento:** Radio buttons for 'Silo' (selected) and 'Celda' are present. A 'Diagrama' link is visible. 'Diámetro *' is 10,9 m. 'Altura *' is 15,5 m. 'Ángulo del Cono *' is 0°. 'Altura del Pico *' is 0 m. 'Caudal Deseado *' is 0,1 m³/(min T) (Caudal de aire recomendado).
- Sistema de Distribución de Aire:** Radio buttons for 'Buen Dimensionamiento' (selected) and 'Pobre Dimensionamiento' are present.

A 'Calcular' button is located at the bottom left of the form.

Figura 14. Captura de pantalla del programa AireAr cargado con los datos de las características del grano y las dimensiones del silo utilizados en la simulación de AN.

En función del resultado del programa AireAr se seleccionó un ventilador centrífugo de 5,5 HP (Chicago Blower, modelo SQDS165). En la Figura 14 se observa que este ventilador trabajando a silo lleno (15,5 m de altura de grano) ofrece un caudal específico de 0,1 m³.min⁻¹.t⁻¹ venciendo una presión estática de 1.300 Pa.

AireAr				
Cultivo: Trigo (aireación)				
Caudal Deseado: 0,1 m ³ /(min T)				
Altura (m) (*)	Peso (T)	Caudal Total (m ³ /min)	Caudal Especifico (m ³ /(min T))	Presión Estática (Pa)
1,55	111,369	156,11	1,402	291,403
3,1	222,739	152,215	0,683	449,243
4,65	334,108	147,271	0,441	595,06
6,2	445,477	140,987	0,316	724,118
7,75	556,846	135,234	0,243	842,277
9,3	668,216	129,537	0,194	948,238
10,85	779,585	124,096	0,159	1.044,028
12,4	890,954	119,105	0,134	1.131,897
13,95	1.002,323	114,886	0,115	1.216,469
15,5	1.113,693	111,363	0,1	1.299,666

Caudal Especifico se encuentra dentro de un 5% del Caudal Deseado.

Ventiladores: 1 --- Disposición: --- Fabricante: Chicago Blower --- Modelo: (50 Hz) SQDS-Agro 165 - 2890RPM --- Tipo: Centrifugo --- HP: 5,5

(*) En caso de seleccionar silo (celda) con cono y pico de grano la altura de la tabla incluye la altura del cilindro (pared de la celda), más la mitad de la altura del cono y del pico de grano

Figura 15. Captura de pantalla de la tabla de caudal y presión estática del programa AireAr para distintas alturas del silo para el ventilador seleccionado.

En base a la curva de trabajo del ventilador seleccionado, publicada por el fabricante (Figura 16) se determinó la potencia insumida y el consumo eléctrico, valores que fueron introducidos en el programa de simulación para el cómputo horario de consumo. De las especificaciones técnicas del ventilador seleccionado se obtiene que, con el silo lleno, ofrece un caudal de 111,36 m³.min⁻¹ (6.681 m³.h⁻¹), y que en dicha condición de trabajo la energía consumida por unidad de tiempo es de 3,4 kW. Posteriormente el consumo total (kWh) se obtiene de multiplicar las horas de funcionamiento del ventilador por 3,4 kW.

Se consideró que la planta contaba con los ventiladores de aireación por ser éste un equipamiento básico, por lo que no se consideró su costo de adquisición en el análisis económico.

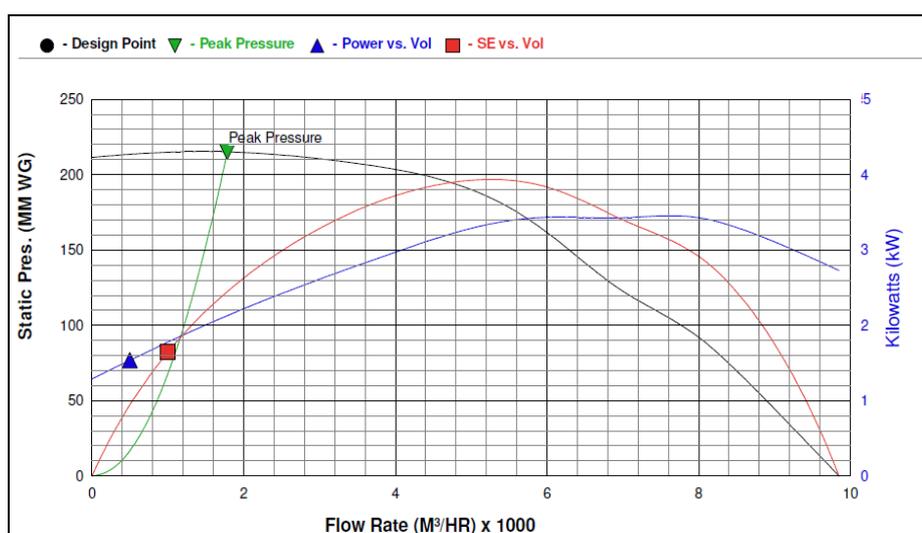


Figura 16. Curva de trabajo del ventilador seleccionado para la simulación en aireación (Chicago Blower SQDS165 de 5,5 HP). Nota: 1300 Pa (resistencia trabajando a silo lleno) es aproximadamente 132,5 mm de agua.

4.4.3. Tratamiento de refrigeración

4.4.3.1. Costos para el control de insectos

Dada la baja temperatura del grano obtenida con esta tecnología (menor a 17 °C) no se considera el uso de insecticidas protectante ni fumigante.

4.4.3.2. Costo de energía eléctrica y alquiler del equipo de frío

En base al consumo energético del equipo refrigerador y las horas de uso se calcularon los costos de energía.

Se consideró el alquiler del equipo refrigerador cuyo monto fue proporcionado por el fabricante siendo de \$ 6.330 semanales. Dicho monto contempla el personal para la instalación, conexión al silo y asistencia técnica.

4.4.4. Estructura de ingresos

Los ingresos generados por cada tratamiento difieren únicamente en el peso final del grano a causa de mermas diferenciales de cada tratamiento. Para cada tratamiento y localidad se estimó mediante el programa de simulación **SAR-Sim**, la merma esperada de peso entre la humedad inicial y final del grano, la cual se afectó por el precio del grano de trigo. Este ingreso se calculó valorizando el trigo al precio promedio registrado entre diciembre de 2002 y mayo de 2011. Los precios de trigo utilizados fueron expresados en moneda constante de marzo de 2011, actualizados según el índice de Precios Internos Mayoristas (IPIM 100=1993, INDEC). La elección de los precios registrados entre diciembre y mayo se debe a que este período concentra la mayor cantidad de las ventas de trigo.

4.4.5. Evaluación económica

La evaluación económica de ambas técnicas se realizó a través del cálculo del valor actual neto (VAN). Este cálculo permite la evaluación de flujos de fondos distribuidos en el tiempo, tal como ocurre en el almacenaje y ha sido utilizado para evaluar distintas tecnologías de manejo de granos en la postcosecha (Rulon *et al.*, 1997; Rulon *et al.*, 1999). Dado que no existen variaciones de capital por el uso de las prácticas propuestas, el cálculo mediante el VAN resulta adecuado para evaluar la conveniencia de las técnicas propuestas. Este método de actualización se utiliza para elegir la alternativa de inversión más conveniente (Frank, 1998). EL VAN calcula el valor actualizado de una serie de erogaciones o ingresos distribuidos a lo largo del tiempo. Al analizar beneficios de una inversión o técnica, la mejor es aquella que presenta el mayor VAN.

Para evaluar la sensibilidad de los resultados ante cambios en las principales variables económicas se realizaron modificaciones del precio del trigo, en $\pm 15\%$ del máximo valor decádico entre los años considerados y aumentos del 15% del costo de energía, insecticidas y alquiler del equipo de frío.

Así el cálculo del VAN para cada tratamiento queda determinado de la siguiente manera:

Para aireación:

Eq. 5

$$VAN_{AN} = \frac{1}{(1+r)^3} (PQ - En - Fum) - Prot$$

Donde:

VAN_{AN} : valor actualizado neto aireación natural.

r : tasa de descuento

P : precio del trigo

Q : cantidad de trigo.

En : costo de la energía

Fum : costo fumigación

$Prot$: costo protectante.

El ingreso por las ventas, PQ , el pago de la energía, En , y el costo de fumigante, Fum , se efectivizan al final del período del almacenaje. Mientras que el pago del protectante, $Prot$, se efectúa al iniciar el almacenaje. La tasa de descuento para el cálculo del VAN para aireación y refrigeración fue fijada en el 12% por ser el promedio de la tasa vigente para plazos fijos de 180 días en los bancos locales al momento de la realización del análisis.

Para refrigeración:

Eq. 6

$$VAN_{RA} = \frac{1}{(1+r)^3} (PQ - En) - Alq$$

Donde:

VAN_{RA} : valor actual neto refrigeración artificial.

r : tasa de descuento

P : precio del trigo

Q : cantidad de trigo.

En : costo de la energía.

Alq : alquiler del equipo de frío.

El ingreso por las ventas, PQ, y el pago de la energía, En, se efectivizan al final del período del almacenaje. Mientras que el pago del alquiler del equipo de frío se efectúa al iniciar el almacenaje.

La Tabla 12 ofrece un resumen de los aspectos relevantes de los tratamientos de aireación y refrigeración.

Tabla 12. Resumen de los tratamientos de aireación y refrigeración

Descripción	Tratamiento	
	Aireación	Refrigeración
Grano	Trigo	Trigo
Condición inicial	Temperatura: 18,9 °C Humedad: 14,0 %	Temperatura 26 °C. Humedad: 14,0 %
Período de ensayo	Marzo - Agosto	Enero
Lugar	Balcarce, provincia de Bs. As. (latitud 37°46'07" longitud 58°18'31.99")	Rojas, provincia de Bs As, (latitud 34°16'2.3" longitud 60°52'47.1")
Características del silo	4,5 m de diámetro, 7,0 m de altura. 80 t de capacidad.	10,9 m diámetro, 13,2 m de altura. 1.184 t de capacidad
Caudal de aire	0,31 m ³ .min ⁻¹ .t ⁻¹	Variable, de acuerdo a las condiciones climáticas
Modo de funcionamiento	Se programó un controlador automático de aireación que encendía el motor cada vez que la temperatura ambiente se encontraba por debajo de un determinado límite. Los sucesivos límites programados fueron 15 °C, 10 °C, 5 °C y 3 °C	El equipo de refrigeración se programó para que funcione de manera continua, salvo por breves períodos donde se detuvo para hacer mediciones de temperatura. Las condiciones de funcionamiento fueron de 12 °C y 67 % de HR.
VARIABLES medidas	Fecha, hora, situación de ventilador (encendido o apagado), temperatura y humedad relativa ambiente horaria, temperatura y humedad relativa programada por el usuario, temperatura del grano, consumo de energía.	Fecha, hora, temperatura y humedad relativa ambiente horaria, temperatura y humedad relativa programada por el usuario, temperatura de entrada del aire al silo, RPM de funcionamiento del ventilador, temperatura del grano, consumo de energía.
Parámetros simulados	Humedad y temperatura del grano, caudal de aire, temperatura y humedad del aire, pérdida de materia seca por respiración, tiempo de aireación.	Humedad y temperatura del grano, caudal de aire, temperatura de aire, pérdida de materia seca por respiración y tiempo de refrigeración.
Parámetros calculados	Sobresecado, consumo de energía, costo sobresecado, costo consumo de energía, costo de control químico y valor actualizado neto (VAN)	Sobresecado, consumo de energía, costo sobresecado, costo consumo de energía y valor actualizado neto (VAN)

5. Resultados y discusión.

5.1. Validación del modelo de simulación para aireación.

La validación del modelo **SAR-Sim** para aireación se realizó en cuatro diferentes etapas, correspondiendo cada una de ellas a un ciclo de aireación sucesivamente más frío. Las figuras 17 a 20 muestran la evolución de las temperaturas observadas y calculadas mediante simulación para cada uno de los niveles de granos, de 1 a 4, y para los mencionados ciclos de aireación programados (15 °C, 10 °C, 5 °C y 3 °C). [Nota: en el eje de abscisas el día “cero” corresponde a las 0:00 h del día 1 de enero].

En líneas generales se puede apreciar que hubo variabilidad en el error de predicción entre los diferentes ciclos de enfriamiento y entre los diferentes niveles de un mismo ciclo. Por otra parte, no se observa que el error en la predicción haya sido particularmente mayor hacia el final del período de evaluación, tal como se observó en el ensayo de refrigeración.

La diferencia entre los valores predichos y los observados se explican en la sección correspondiente a la validación del proceso de refrigeración 5.2.5.

Los resultados de las simulaciones realizadas presentan un comportamiento similar a las simulaciones realizadas por Montross *et al.* (2002b).

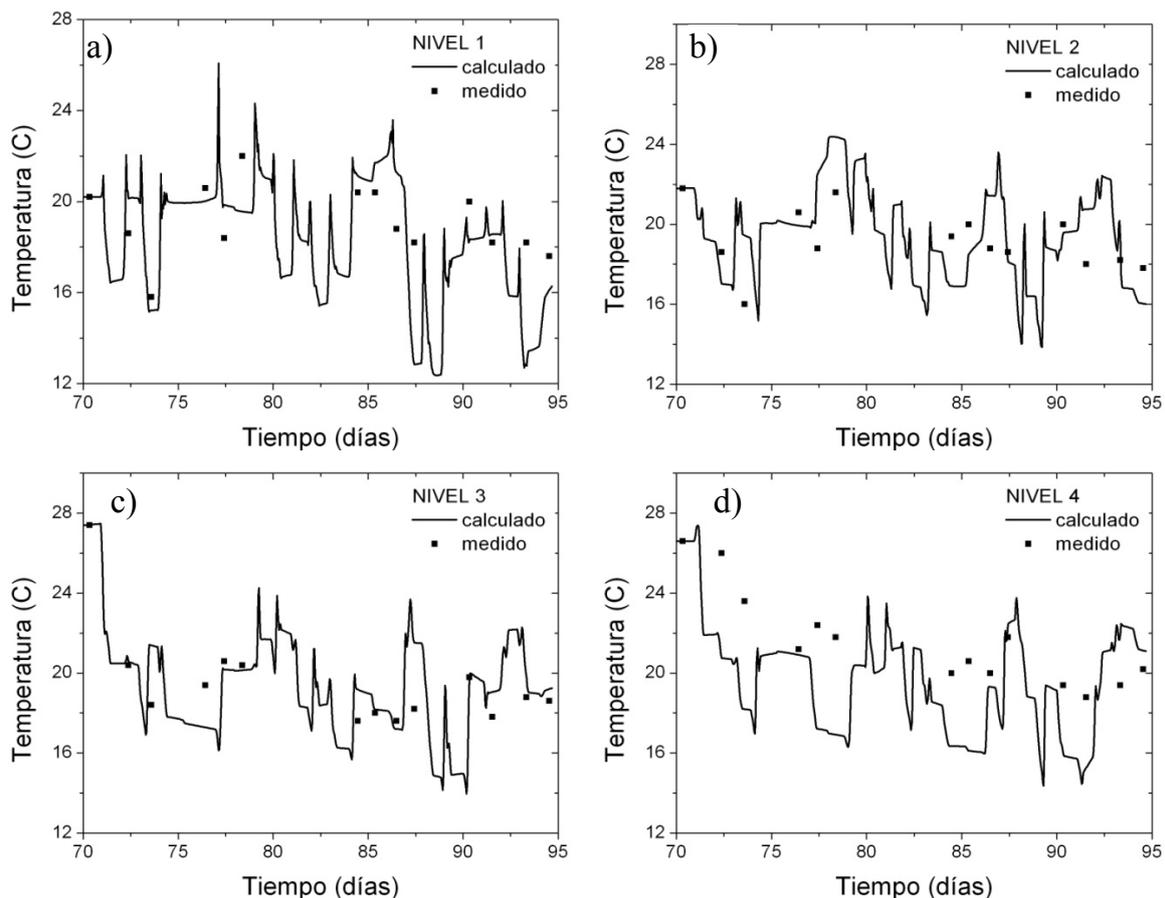


Figura 17. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para los niveles 1 a 4 (a, b, c y d, respectivamente) para el ciclo de aireación con condiciones ambientales menores a 15 °C.

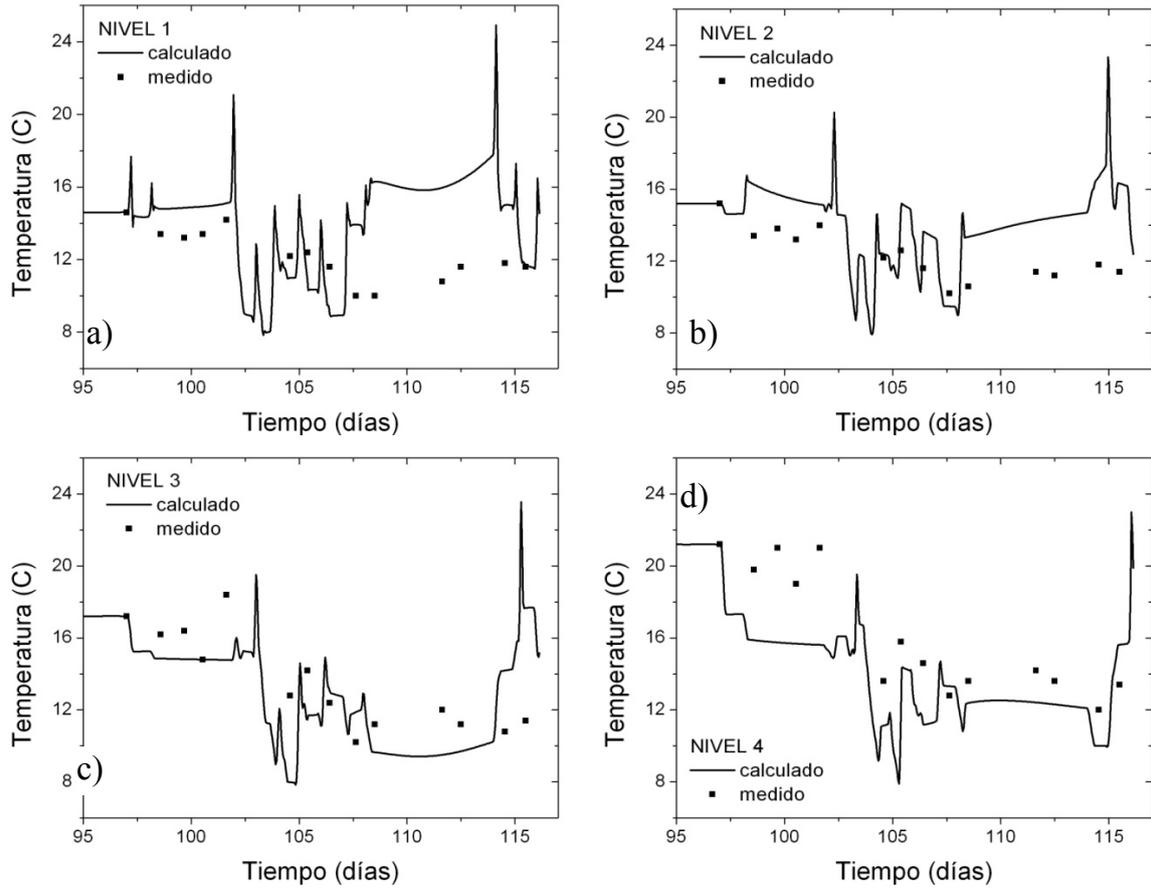


Figura 18. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para los niveles 1 a 4 (a, b, c y d, respectivamente) para el ciclo de aireación con condiciones ambientales menores a 10 °C. [Nota: entre los 115 días y 125 días no funcionó aireación].

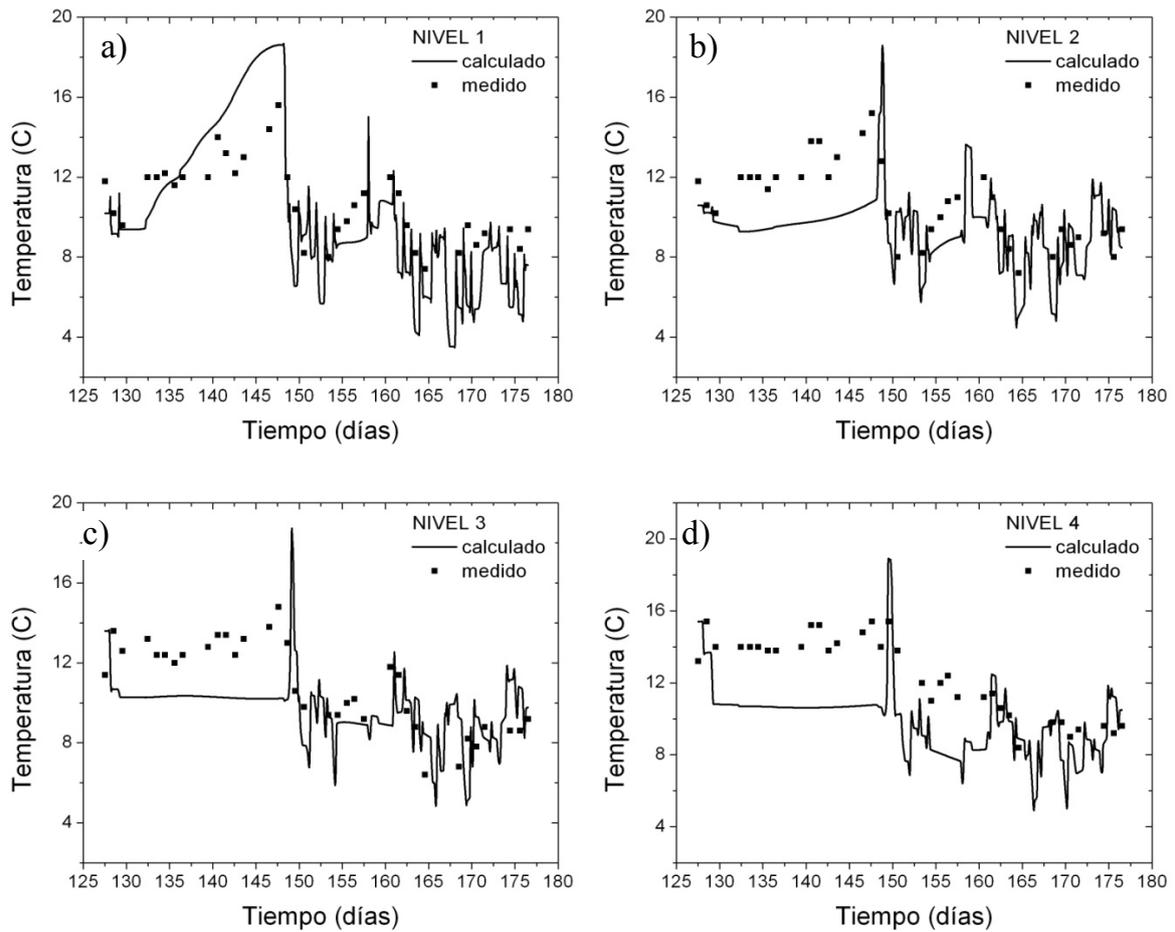


Figura 19. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para los niveles 1 a 4 (a, b, c y d, respectivamente) para el ciclo de aireación con condiciones ambientales menores a 5 °C. [Nota: entre los 175 días y 195 días no funcionó aireación].

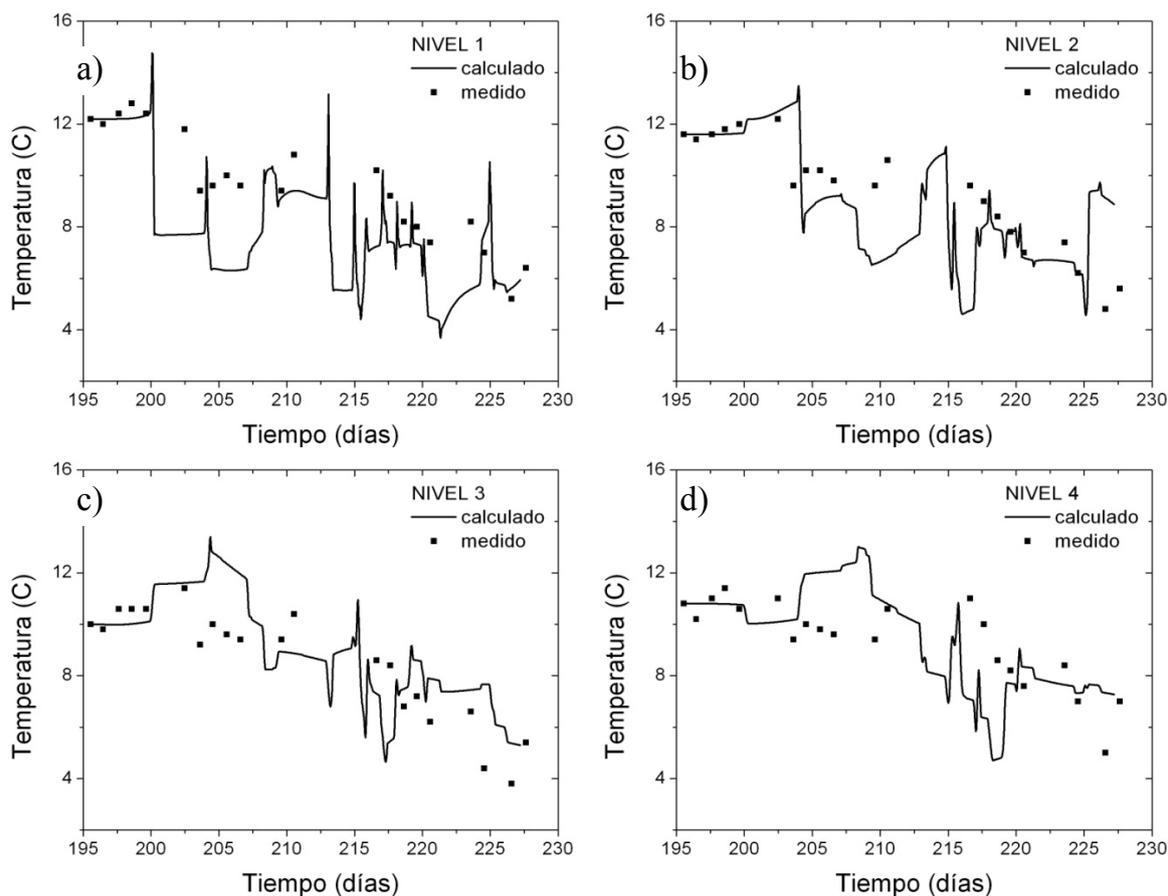


Figura 20. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para los niveles 1 a 4 (a, b, c y d, respectivamente) para el ciclo de aireación con condiciones ambientales menores a 3 °C.

La cuantificación del error, en promedio para todos los niveles y ciclos de aireación, resultó con un S.E. de 2,17, mientras que el PVAR fue de 1,94 °C (Tabla 13). El ciclo de aireación con mejor predicción fue el de 3 °C, donde el S.E. fue de 1,62 y el PVAR de 1,4, en tanto que el ciclo de peor predicción fue el de 10 °C, con un S.E. de 2,74 y un PVAR de 2,4. Este ciclo fue el que tuvo mayor cantidad de períodos sin funcionamiento del ventilador de aireación.

Los valores estadísticos de S.E. 2,17 y PVAR 1,94 para todo el ciclo de simulación son mayores a los reportados por Iguaz *et al.* (2004b) simulando cambios de temperatura de arroz con aireación (S.E. 0,32 y PVAR 0,49) pero cercanos a los S.E. 1,46 °C y PVAR de 1,33 reportados por los mismos autores que simularon el almacenamiento de arroz sin aireación (Iguaz *et al.*, 2004a). Así mismo, son menores a los reportados por de la Torre *et al.* (2009) validando la simulación de aireación de trigo en Argentina con valores de S.E. 2,57 y PVAR 2. En líneas generales el modelo **SAR-Sim** resultó con errores en la predicción similares a la de los modelos previamente citados, por lo que se considera que predijo en forma aceptable la aireación de trigo para las condiciones en las que se desarrolló el ensayo.

Tabla 13. Error estándar de los residuales (S.E.) y promedio en valor absoluto de los residuales (PVAR) de las temperaturas del grano medidas y simuladas para los diferentes ciclos de aireación programados (15 °C, 10 °C, 5 °C, y 3 °C).

temperatura de programación < 15 °C					
	Prom.	nivel 1	nivel 2	nivel 3	nivel 4
S.E. (°C)	2,04	2,12	1,79	1,01	3,24
PVAR (°C)	1,76	1,69	1,67	0,96	2,72
temperatura de programación < 10 °C					
S.E. (°C)	2,74	2,92	2,51	2,65	2,89
PVAR (°C)	2,40	2,45	2,29	2,25	2,61
temperatura de programación < 5 °C					
S.E. (°C)	2,28	2,22	2,04	2,05	2,80
PVAR (°C)	2,19	2,04	2,01	2,05	2,64
temperatura de programación < 3 °C					
S.E. (°C)	1,62	1,76	1,84	1,38	1,53
PVAR (°C)	1,40	1,51	1,39	1,35	1,33
promedio de todo el periodo de aireación					
S.E. (°C)	2,17	2,25	2,05	1,77	2,61
PVAR (°C)	1,94	1,92	1,84	1,65	2,33

5.2. Validación del modelo de simulación para refrigeración

5.2.1. Horas de funcionamiento durante el ensayo

En la Tabla 14 se muestran las horas diarias y totales en las que el equipo estuvo insuflando aire al silo desde el comienzo del ensayo (6 de enero) hasta la finalización (11 de enero). En la misma se puede apreciar que el total de horas de funcionamiento del equipo de frío fue de 103,5 h.

Tabla 14. Horas de funcionamiento diarias y acumuladas del equipo de frío durante el ensayo.

Día	Horas diarias de funcionamiento	Horas acumuladas
06-ene	5,8	5,8
07-ene	19,6	25,4
08-ene	22,8	48,2
09-ene	22,8	71,0
10-ene	23,0	94,0
11-ene	9,5	103,5

5.2.2. Temperatura del grano

En la Tabla 15 se muestran los promedios por nivel de la temperatura del grano registrada por el sistema de termometría desde el inicio hasta el final del ensayo en los diferentes niveles, siendo el nivel 1 el más cercano a la base del silo y el nivel 8 el más cercano a la superficie.

Tabla 15. Temperatura registrada (°C) por el sistema de termometría instalado en el silo para diferentes alturas del grano (promedio de todos los cables para una misma altura o nivel) y diferentes momentos del proceso de refrigeración.

nivel	Horas acumuladas de refrigeración.						
	(0 h)	(5,8 h)	(25,4 h)	(48,2 h)	(71,0 h)	(94,0 h)	(103,5 h)
8	32,3	30,3	27,0	26,0	22,8	21,8	21,8
7	30,3	28,8	27,0	26,0	23,3	22,3	23,3
6	26,3	27,0	25,0	23,8	21,0	21,0	21,0
5	26,8	26,0	23,3	21,3	20,3	21,0	19,3
4	25,5	24,5	21,5	20,8	21,0	20,8	19,5
3	22,0	22,8	17,5	19,5	19,5	19,0	19,0
2	25,0	23,0	21,0	20,5	19,0	20,5	19,5
1	25,0	19,0	18,3	20,0	17,8	18,5	17,8
promedio	27,3	25,2	22,6	22,2	20,6	20,6	20,1

El sistema de termometría evidencia que el frente de enfriado atravesó la masa de granos y concluyó el enfriamiento del silo el día 11/1, con una temperatura promedio final del grano de 20,1 °C (con un rango de 17,8 °C a 23,3 °C). En dicha fecha se decide dar por concluido el ensayo ya que, en las condiciones de funcionamiento del equipo, se habría llegado a una temperatura estable en el tiempo en los diferentes niveles del silo lo que preveía que un futuro descenso no sería significativo. En un lapso de 103,5 h la temperatura promedio descendió 7,2 °C (de 27,3 °C a 20,1 °C) y el análisis por capa revela que en la capa inferior la temperatura se redujo en 7,2 °C (de 25 °C a 17,8 °C), mientras que en la superior la reducción fue de 10,5 °C (de 32,3 °C a 21,8 °C). El nivel 3 fue el que menos variación tuvo durante el ensayo, reduciendo su temperatura solo en 3 °C (de 22 °C a 19 °C). Las temperaturas finales logradas en el grano resultaron 9 °C por encima de la temperatura programada en el equipo de frío (11 °C).

Las condiciones climáticas durante el período de refrigeración pueden afectar el desempeño del equipo, especialmente si se registran temperaturas elevadas. La temperatura promedio ambiente durante los días del ensayo fue de 22,9 °C, la mínima de 16 °C y la máxima de 31,2 °C.

Roskopf y Bartosik (2010 y 2011) reportan temperaturas finales del grano promedio de 13,8 °C y 15,6 °C luego de refrigerar artificialmente grano de maíz y trigo, respectivamente. El primer resultado fue obtenido en condiciones de menores temperaturas ambientes, promedio de 18,2 °C, mientras que en el segundo caso el promedio de temperatura ambiente fue de 24,6 °C. En ambos casos la temperatura de programación para el aire frío fue de 11 °C.

Ensayos realizados en plantas de acopio en EE.UU. reportan valores finales de temperatura en granos de maíz (Maier *et al.*, 1989) menores a 6 °C con temperaturas ambientes muy inferiores a las del presente ensayo, de entre -2 °C a 18 °C, sin informar el promedio ni la temperatura de programación del equipo de refrigeración. En un ensayo posterior, Maier *et al.* (1993) luego de aplicar refrigeración artificial en arroz, informan temperaturas finales del grano de 12 °C,

pero con temperaturas ambientes también menores, comprendidas entre 7 °C y 17 °C, y un promedio de 13,4 °C. En este ensayo no se reporta la temperatura de programación del equipo. En otro ensayo Maier *et al.* (1997) reportan una temperatura final promedio del grano de 14,4 °C luego de cinco ciclos de enfriamiento artificial de un silo de maíz durante el verano, con temperaturas promedio ambiente de 23,8 °C, mínimas de 9,2 °C y máximas de 40,7 °C. La temperatura objetivo del grano fue de 15 °C pero no informa la temperatura de programación del equipo.

Lacerda *et al.* (2007) luego de 872,8 horas efectivas de funcionamiento del equipo de frío en Brasil, reportan temperaturas finales de la masa de granos de maíz en un silo de 16.000 t de entre 10 °C y 17 °C con temperaturas ambientes de entre 18 °C y 35 °C, sin informar la temperatura promedio del grano ni la temperatura de programación del equipo.

Aunque los equipos de enfriamiento artificial para granos insuflan aire a temperaturas más bajas que la del ambiente, existe influencia de las condiciones ambientales sobre la capacidad térmica de enfriamiento por parte del equipo, y por ende, sobre la temperatura final a la que puede lograr enfriarse el grano. Si en el presente ensayo se hubiera continuado con la refrigeración, eventualmente a largo plazo, todo el silo se habría enfriado a una temperatura cercana a los 19 °C, tal como lo evidencia la temperatura del grano en las capas inferiores, pero este descenso extra de temperatura se habría hecho con un costo de energía importante. De cualquier manera, tal como se expresara anteriormente, según la temperatura de programación del equipo de frío se debería haber llegado a una temperatura promedio más baja de la que realmente se logró. Los motivos de esta diferencia podrían ser esencialmente dos: 1) el aire sufre un calentamiento en su paso por la manga que conecta el equipo de frío con el silo, por lo que siempre el aire que ingresa al silo tiene una temperatura mayor a la temperatura de programación del equipo. Este calentamiento puede ser más importante cuanto mayor es la temperatura ambiente o la radiación solar incidente sobre la manga de conexión, o cuando el conducto no se encuentra aislado (en este ensayo el conducto se encontraba aislado). Sin embargo, el calentamiento del aire por el conducto típicamente no excede los 2 °C, por lo que no sería suficiente para explicar la diferencia encontrada; 2) existe una diferencia entre la temperatura real del aire a la salida del equipo de frío y el valor de temperatura registrado por el equipo, lo cual le impide realizar un adecuado control de la misma. Esta diferencia puede darse por un incorrecto funcionamiento o calibración del sensor de temperatura, o por una inadecuada ubicación del mismo, lo que le impediría, en este último caso, tener un registro de la condición promedio de la temperatura del aire.

5.2.3. Caudal de aire y temperatura de refrigeración

Cuando mayor es la temperatura ambiente, el equipo debe reducir su caudal para tratar de adecuar la temperatura del aire insuflado a la temperatura programada por el operario, tal como se explicara en la sección 4.3.2. Por ejemplo, el día 8/1/2011 a las 15:10 h con una temperatura ambiente de 30,4 °C, el ventilador funcionó al 66 % de su máxima rpm, insuflando un caudal específico de $0.15 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ mientras que ese mismo día, a las 10:15 h y con una temperatura ambiente de 25.9 °C el ventilador funcionó al máximo de su caudal (75 % de las rpm) insuflando un caudal de $0,18 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ (20 % superior).

Cuando el salto térmico es muy alto, algunos fabricantes recomiendan realizar el enfriado en dos o tres ciclos. Por ejemplo si se intenta enfriar la masa de granos

desde 27 °C a 14 °C cuando durante el día las temperaturas del aire ambiente pueden llegar a 35 °C, el equipo se ve forzado a restringir enormemente el caudal de aire, demorando excesivamente el ciclo de refrigeración. Bajo estas circunstancias se puede poner en serio riesgo la calidad de una porción importante de la masa de granos, ya que tardaría muchos días en llegar a enfriar la capa superior debido al bajo caudal de aire suministrado por el equipo. En estos casos lo conveniente sería realizar un ciclo de refrigeración hasta lograr que la temperatura del grano descienda a los 21 °C, y luego otro ciclo hasta los 14 °C. Esto asegura que rápidamente se logre enfriar toda la masa de granos a una condición relativamente segura (21 °C), luego, a través de un nuevo ciclo, que puede tardar más tiempo, se puede seguir enfriando la masa de granos hasta la temperatura final deseada, sin arriesgar la mercadería.

La Figura 21 muestra la temperatura programada en el equipo, la temperatura de entrada del aire al silo y la diferencia entre la temperatura programada y la de entrada al silo en función de la temperatura ambiente.

Se pudo determinar que el sensor del equipo que comanda la regulación de la temperatura del aire refrigerado estaba posicionado en un lugar inconveniente, registrando una temperatura de 4 a 5 °C más baja que el promedio de la temperatura del aire de refrigeración, lo cual, como se manifestara anteriormente, impidió llevar la temperatura del aire enfriado y, por lo tanto la del grano, a un valor inferior. Producto de la inadecuada ubicación del sensor, cuando el equipo estaba programado para ofrecer una temperatura de 12 °C la temperatura del aire refrigerado era en promedio 4-5 °C superior (16 °C). Tal como muestra la figura, es esperable una oscilación en la temperatura provista por el equipo, ya que el sistema de control tiene un retraso en el tiempo de reacción, lo que típicamente genera una variación de 2 a 3 °C en la temperatura de salida del equipo.

Por otra parte, las temperaturas extremas durante el día (que en algunos casos superaron los 30 °C) tuvieron dos efectos claramente marcados. Por una parte, la diferencia entre la temperatura promedio del aire refrigerado y la temperatura programada se incrementó hasta 8 °C en promedio y, por otro lado, cuando la temperatura ambiente supera los 25 °C parecería que la oscilación en la temperatura de entrada al silo también se incrementa. Una posible causa del aumento de la temperatura del aire refrigerado con el aumento de la temperatura ambiente puede ser que el sistema de control no restringió el paso del aire lo suficiente como para compensar la mayor demanda de energía por m³ de aire ambiente caliente con un menor caudal de aire. Todas estas observaciones fueron comunicadas al fabricante del equipo para hacer las modificaciones necesarias y lograr una regulación de la temperatura más apropiada en las futuras unidades.

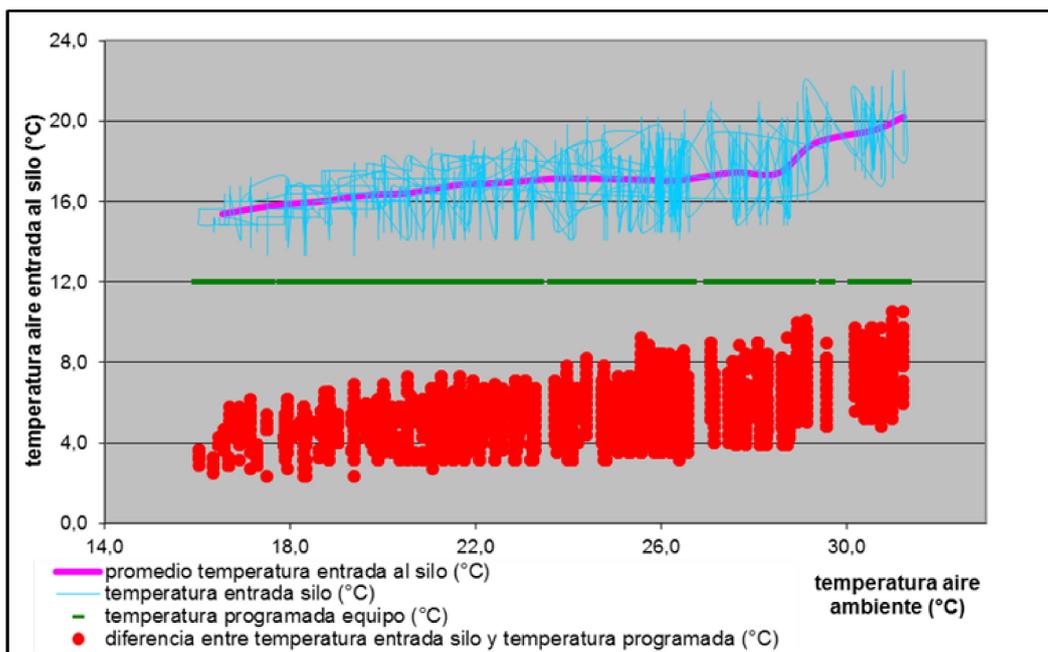


Figura 21. Temperatura programada en el equipo, temperatura de entrada del aire al silo y diferencia entre la temperatura programada y de entrada al silo en función de la temperatura ambiente.

Se puede concluir que la diferencia entre la temperatura lograda (20,1 °C promedio) y la temperatura objetivo (menor a 17 °C) se debe, al menos, a tres situaciones: la incorrecta ubicación del sensor de temperatura que comanda el control del equipo de frío, el incremento de temperatura del aire en su paso a través de la manga de conexión debido a una insuficiente aislación, y una deficiente regulación del caudal de aire para mantener una temperatura constante de salida a medida que varía la temperatura ambiente.

5.2.4. Consumo eléctrico del equipo.

El total del consumo registrado fue de 5.012 kWh, que relacionado a las toneladas almacenadas resulta en un consumo eléctrico específico de 4,04 kWh.t⁻¹. Relacionando el consumo eléctrico específico con los grados de temperatura que se logró reducir (7,2 °C) se llega a que el consumo específico térmico fue de 0,56 kWh.t⁻¹.°C⁻¹ (Tabla 16).

Tabla 16: valores de consumo energético registrado.

Masa almacenada total (t)	1.238
Consumo energético total (kWh)	5.012
Consumo específico kWh.t ⁻¹	4,04
Diferencia en grados de temperatura (°C)	7,2
Consumo específico térmico kWh.t ⁻¹ .°C ⁻¹	0,56

Experiencias realizadas en Argentina reportan valores de consumo específico de 2,58 kWh.t⁻¹ con temperaturas ambientes promedio de 18,2 °C y de 4,09 kWh.t⁻¹ con temperatura ambiente promedio de 24,6 °C (Roskopf *et al.*, 2009; Roskopf y Bartosik, 2011). Los autores reportan que los consumos de energía son mayores a mayores temperaturas ambientes. Esto sucede porque a temperaturas ambientes más elevadas, el equipo debe funcionar al máximo de su capacidad frigorífica y

durante más tiempo debido a la gran diferencia térmica entre la alta temperatura ambiente y la temperatura de entrega del aire frío por parte del equipo. Si la temperatura ambiente es elevada, las necesidades de acondicionamiento del aire son también mayores y por lo tanto se eleva el consumo de energía por tonelada refrigerada.

De Dios (1994) expresa un valor aproximado de consumo específico de 7 kWh.t^{-1} para un ensayo en Argentina sin mencionar las condiciones ambientales ni la temperatura inicial y final del grano. Los trabajos reportados por este autor estaban realizados con equipos con tecnología antigua (probablemente desarrollados en la década del 70), menos eficiente que la tecnología estándar actual, lo cual explicaría el alto consumo específico.

Ensayos realizados en Brasil mencionan un consumo de $2,12 \text{ kWh.t}^{-1}$ luego de refrigerar 16.000 t de maíz hasta una temperatura final de entre 10 °C y 17 °C con temperaturas ambientes de entre 18 y 35 °C (Lacerda *et al.*, 2007). En otro ensayo refrigerando 30.000 t de maíz hasta una temperatura final de entre 12 °C y 17 °C , en el mismo país se obtuvo un consumo específico de $4,16 \text{ kWh.t}^{-1}$ con temperaturas ambientes entre 10 y 30 °C (Quirino *et al.*, 2007).

Por su parte Maier *et al.* (1989) reporta un valor de consumo de energía eléctrica de $2,94 \text{ kWh.t}^{-1}$ luego de enfriar maíz a valores finales de entre 4 y 6 °C con temperaturas ambientes de entre -2 °C y 18 °C . En general, salvo por los valores reportados por De Dios (1994) los valores de consumo específico reportados en la literatura son similares a los obtenidos en el presente ensayo.

5.2.5. Validación del modelo de simulación para refrigeración

En las figuras 22 a 30 se muestra la evolución de las temperaturas observadas y calculadas mediante simulación para cada uno de los niveles de granos, de 1 a 8, siendo 1 el nivel inferior y 8 el nivel superior del sistema de termometría. En la figura 30 se muestra la evolución de las temperaturas observadas y calculadas mediante simulación para todos los niveles de granos. [Nota: el día cero corresponde a las 0.0 h del día 1 de enero, el ensayo de refrigeración comenzó el día 6 de enero].

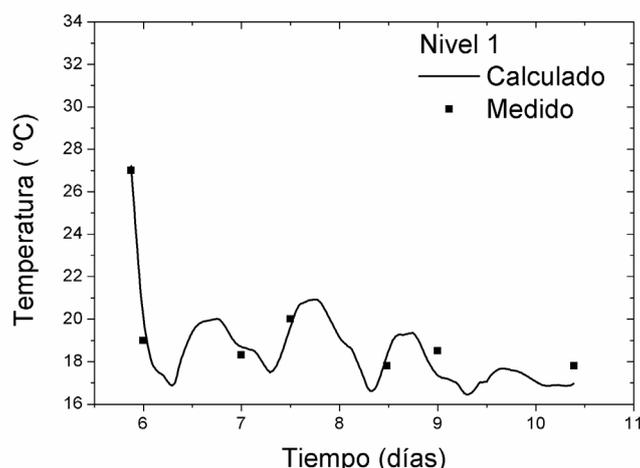


Figura 22. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 1 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.

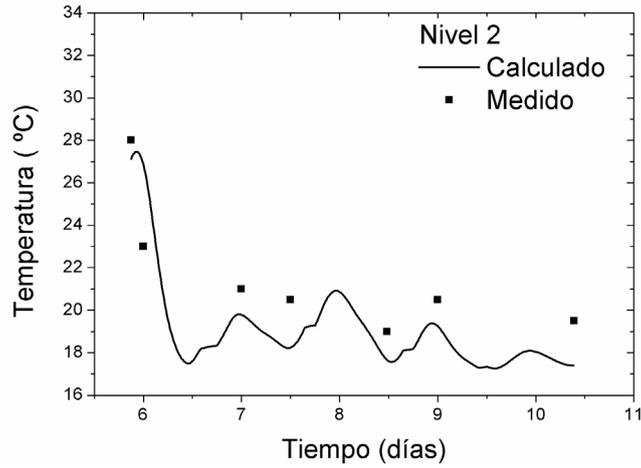


Figura 23. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 2 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.

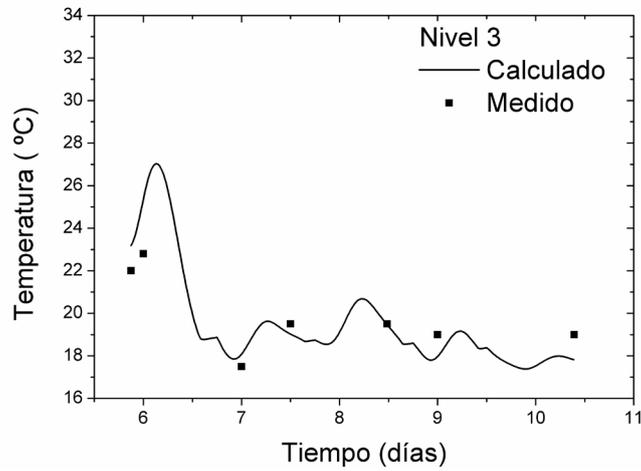


Figura 24. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 3 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.

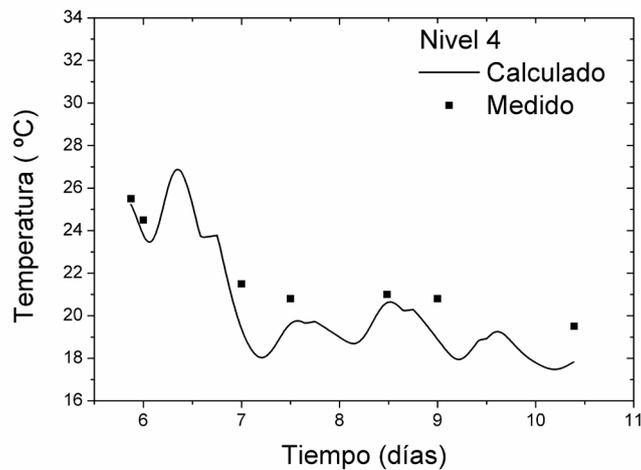


Figura 25. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 4 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.

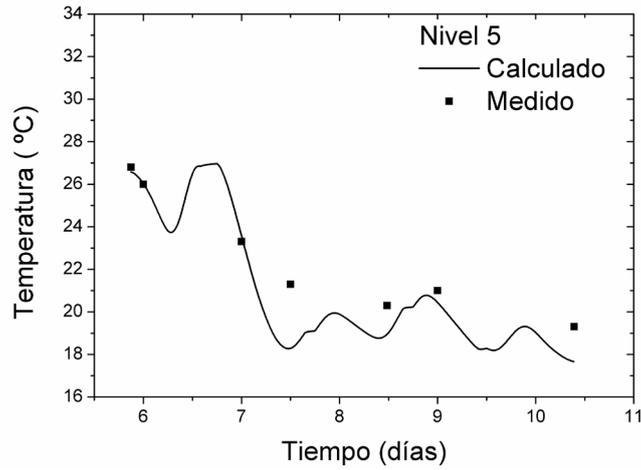


Figura 26. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 5 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.

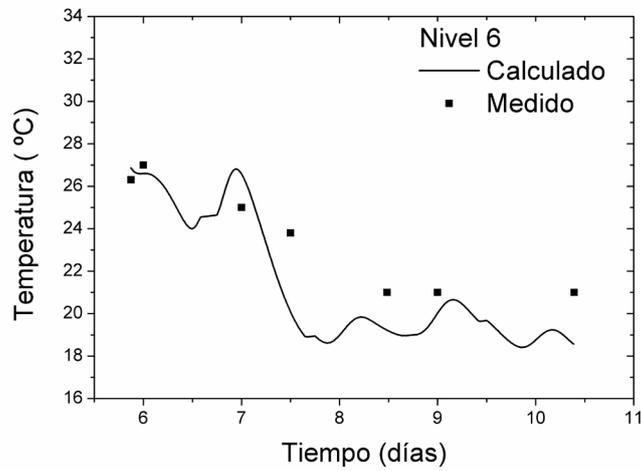


Figura 27. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 6 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.

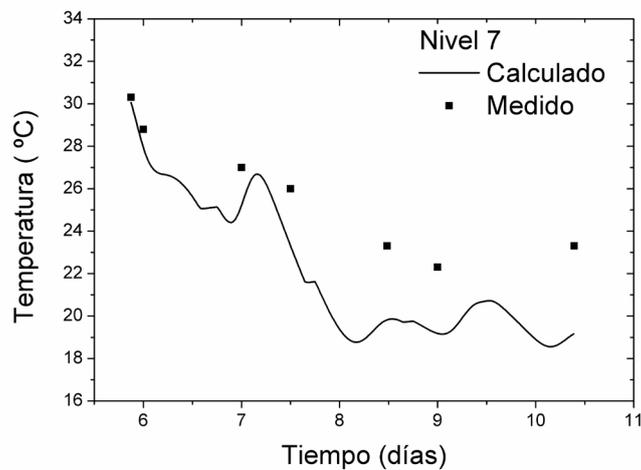


Figura 28. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 7 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.

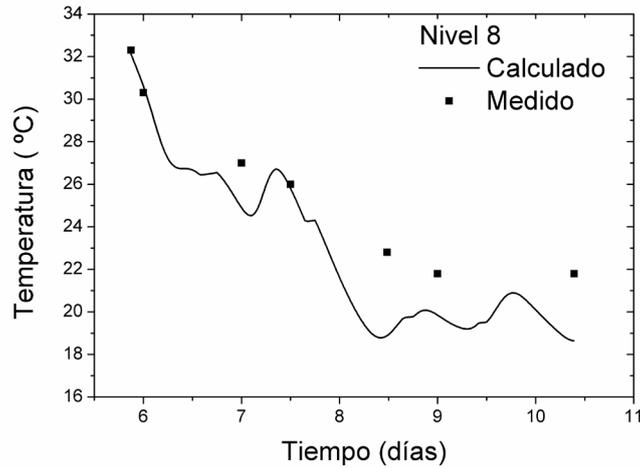


Figura 29. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para el nivel 8 de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.

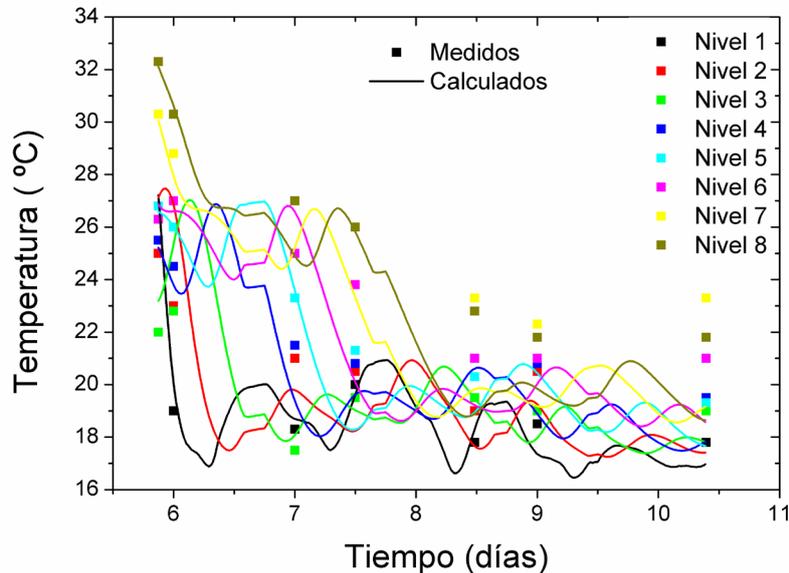


Figura 30. Temperaturas del grano medidas y calculadas mediante simulación para todos los niveles de granos durante el desarrollo del ensayo de refrigeración.

El S.E. promedio de la validación del modelo fue de 1,70, mientras que el PVAR fue de 1,41, lo que indica que, en líneas generales, la diferencia promedio entre lo observado y lo predicho fue de 1,41 °C (Tabla 17).

El error en la predicción fue variable entre las capas. En líneas generales a través de la figura 22 a 30 se puede apreciar que el error fue menor en los niveles 1, 3, 4 y 5 y mayor en los niveles 2, 6, 7 y 8, indicando que hubo una tendencia a predecir mejor los cambios de temperaturas en las capas inferiores que en las superiores. Una conclusión similar puede derivarse de la tabla 16, la cual muestra que los valores de S.E. y PVAR de los niveles 2, 6, 7 y 8 fueron mayores que el promedio.

Tabla 17. Error estándar de los residuales (S.E.) y promedio del valor absoluto de los residuales (PVAR) de las temperaturas del grano medidas y simuladas.

	promedio.	nivel 1	nivel 2	nivel 3	nivel 4	nivel 5	nivel 6	nivel 7	nivel 8
S.E. (°C)	1,70	0,72	2,06	1,25	1,36	1,41	1,96	2,67	2,19
PVAR (°C)	1,41	0,63	1,83	1,00	1,17	1,01	1,63	2,32	1,68

A su vez, la predicción parece ser más ajustada al comienzo del ensayo de refrigeración, y más errática hacia el final del mismo, lo cual se hace más evidente en los niveles 7 y 8. También se puede apreciar que el modelo tiene una tendencia a sobreestimar el proceso de refrigeración.

Una posible causa del aumento en el error de predicción en las capas superiores es un efecto de recalentamiento de dichas capas producto de la radiación incidente en el techo del silo (no tenido en cuenta por el modelo).

Existen otras causas que pueden explicar diferencias entre los valores predichos y los observados que podrían afectar a la predicción en general (no aplicables exclusivamente a una determinada capa de granos). Los valores medidos por las termocupas corresponden a lecturas en sitios puntuales de la masa de granos con una precisión en un rango de ± 2 °C, lo cual puede derivar en un error en la comparación con los datos predichos. La ubicación exacta de cada una de las termocupas es difícil de precisar ya que durante la carga del silo se producen desplazamientos de los cables respecto de su posición nominal. Por su parte, el modelo genera valores de temperatura en lugares puntuales en la masa de granos. Dada la incertidumbre en el posicionamiento de las ocho termocupas, el lecho de granos se dividió en ocho capas y se realizó la validación comparando la temperatura medida con la temperatura promedio de la capa correspondiente, lo cual puede derivar en diferencias entre la temperatura predicha (promedio para una capa de granos) y la medida en un sitio indeterminado de dicha capa.

Se puede apreciar que los datos predichos muestran una oscilación de temperatura mayor que los datos observados. Esto en parte se debe a que los datos predichos de temperatura a las diferentes alturas fueron calculados con una frecuencia horaria, mientras que los datos observados tienen una frecuencia diaria. Una mayor frecuencia de medición captura las oscilaciones horarias de temperatura como lo muestran los datos experimentales presentados por Montross *et al.* (2002b) y Navarro *et al.* (2002c). En el presente trabajo, el sistema de termometría no permitía cambiar la frecuencia de medición.

Otra fuente de error puede estar en los parámetros utilizados por el modelo **SAR-Sim** para calcular el proceso de enfriado. La humedad del grano tiene varios efectos en el proceso de enfriamiento. Por una parte tiene un efecto en los parámetros térmicos del grano, como por ejemplo calor específico y conductividad térmica del granel (Montross *et al.*, 2002a). También tiene un efecto en la tasa de respiración y, por ende, en la generación de calor por actividad biológica (Navarro *et al.*, 2002c). Finalmente, el efecto más importante es a través del enfriamiento evaporativo. Cuanto más húmedo está el grano más rápido se enfría debido al calor que insume la evaporación, reduciendo levemente a su vez el contenido de humedad del grano. En la validación del modelo se consideró una humedad del grano uniforme en función de las muestras de grano obtenidas y de los registros de ingreso de la mercadería al silo, las cuales fueron altamente uniformes. Sin embargo, si la humedad del grano tuvo variabilidad entre capas (que no fue detectada por el

muestreo) pudo haber influenciado el efecto de enfriado y afectado, por lo tanto, la validación del modelo.

Los parámetros del modelo de contenido de humedad de equilibrio aire-grano (curvas de sorción) fueron tomados de la literatura, utilizándose los valores estándares para maíz dentado. Si el grano utilizado en el ensayo tuviera parámetros ligeramente diferentes a dichos valores estándares, entonces la predicción del modelo también sería afectada.

Por último, el caudal de aire real puede ser diferente al caudal medido (y utilizado en el modelo), lo cual tiene un efecto en la velocidad de avance del frente de enfriado. Si bien el caudal de aire no es uniforme en toda la masa de granos, el modelo de simulación asume un caudal promedio el cual puede en algunos sectores subestimar el avance del frente de enfriado mientras que en otro puede sobreestimarlos.

Es esperable que los errores en la predicción sean causados por una combinación de las causas enumeradas, por lo cual es importante comparar los resultados de esta validación con los resultados de validaciones de modelos implementados en procesos similares.

Comparando los estadísticos con valores de la literatura, se observa que son mayores que los reportados por Iguaz *et al.* (2004b) simulando cambios de temperatura de arroz en aireación (SE 0,32 y PVAR 0,49) pero similares a los reportados por los mismos autores (Iguaz *et al.* 2004a) en la simulación de almacenamiento de arroz sin aireación, donde reportaron valores de S.E. 1,46 °C y PVAR de 1,33. De la misma manera, los valores obtenidos en el presente trabajo son menores a los reportados por de la Torre *et al.* (2009) validando la simulación de aireación de trigo en Argentina con valores de S.E. 2,57 °C y PVAR 2. En base a los valores reportados en la literatura se puede apreciar que el modelo **SAR-Sim** predijo la refrigeración de trigo en las condiciones del presente ensayo con errores del mismo orden de magnitud de los modelos previamente citados.

A su vez, en el estudio de un proceso de refrigeración de un silo de 1238 t un error hipotético de 1,41 °C en la predicción sería aceptable, tanto desde el punto de vista físico del proceso como desde su implicancia biológica (efecto de la temperatura sobre los componentes bióticos del granel).

5.3. Simulación del comportamiento de aireación en distintas regiones agroclimáticas del país.

La Tabla 18 muestra los resultados de la simulación de aireación para las diferentes localidades consideradas. El tratamiento de aireación logró enfriar los granos a una temperatura promedio entre 16,9 °C a 23,8 °C, dependiendo de la temperatura ambiente de la localidad durante el período de aireación, la cual varió entre 17,7 °C y 25,6 °C. La humedad final promedio fue de 13,6 %, con muy poca variación (0,4 puntos porcentuales entre mínimo y máximo). El tiempo demandado para lograr enfriar la totalidad de la masa de granos fue de 95 h en promedio con una importante amplitud entre mínimo y máximo (38-226 h), resultando con un consumo eléctrico promedio de 347 kWh (140-829 kWh), mientras que el consumo específico fue de 0,29 kWh.t⁻¹ (0,11-0,70 kWh.t⁻¹).

Tabla 18. Valores promedios, mínimos y máximos de la temperaturas promedio inicial del grano, temperaturas promedio y máxima final del grano, temperatura y humedad relativa ambiente promedio, promedio de humedad final del grano, tiempo de aireación y consumos total y específico de energía para diferentes localidades.

Localidad	Temp. de corte simulación (°C)	Valores	Temp. objetivo grano (°C)	Temp. prom. inicial grano (°C)	Temp. prom. final grano (°C)	Temp. máxima final grano (°C)	Temp. prom. amb. (°C) * ¹	Hum. rel. amb. prom. (%)	Hum. final prom. (% bh)	Tiempo aireación (h)	Consumo total (kWh)	Consumo específico (kWh.t ⁻¹)
Anguil	20	prom.	21	29	19,4	23,2	22,2	61	13,6	94	343	0,29
		min.	-	-	16,9	22,9	19,6	52	13,5	75	272	0,22
		max.	23	-	20,7	25,7	24,7	74	13,7	138	504	0,42
Balcarce	19	prom.	20	25	19,2	22,4	19,9	76	13,8	105	384	0,32
		min.	-	-	17,7	21,9	17,7	70	13,7	38	140	0,11
		max.	22	-	22,6	26,9	23,0	82	13,9	169	618	0,52
Manfredi	23	prom.	24	32	22,2	25,9	22,8	73	13,6	79	289	0,24
		min.	-	-	21,3	25,9	21,4	71	13,5	69	252	0,21
		max.	26	-	23,3	26,0	24,0	75	13,6	100	366	0,30
Pergamino	22	prom.	23	31	21,5	25,6	22,7	67	13,6	76	277	0,23
		min.	-	-	18,8	24,9	21,6	60	13,5	69	251	0,21
		max.	25	-	23,8	28,7	24,6	79	13,7	86	315	0,26
Saenz Peña	20	prom.	21	29	19,7	24,0	22,6	70	13,6	121	442	0,37
		min.	-	-	17,6	22,9	19,9	63	13,6	75	275	0,23
		max.	23	-	22,1	28,8	25,6	78	13,7	226	829	0,70
Total general		prom.		29,2	20,4	23,2	22,0	69	13,6	95	347	0,29
		min.		-	16,9	21,9	17,7	52	13,5	38	140	0,11
		max.		-	23,8	28,8	25,6	82	13,9	226	829	0,70

Obs: *¹: corresponde únicamente a los periodos de los días en que se desarrolló la simulación, cuando las temperaturas del ambiente estuvieron por debajo de la temperatura de corte de simulación.

El promedio general de temperatura final del grano fue de 20,4 °C. Todas las temperaturas finales del grano son superiores a 17 °C, que es el límite para el desarrollo de insectos, implicando que en muchas regiones climáticas no sería posible implementar un esquema de prevención y control de insectos basado exclusivamente en aireación. Las temperaturas mínimas y promedio del grano obtenidas mediante aireación fueron diferentes de acuerdo a las condiciones climáticas durante el período de aireación y a la temperatura inicial del grano, relacionada a la temperatura promedio del mes del año en que se cosecha el trigo en cada región. Por ejemplo, en Balcarce se logró la menor temperatura del grano (19,2 °C), mientras que en Manfredi se logró la mayor temperatura del grano (22,2 °C). Esto está en coincidencia con las temperaturas iniciales del grano de 25 °C y 32 °C y el promedio de temperatura ambiente durante los días de aireación de 19,9 °C y 22,8 °C para Balcarce y Manfredi, respectivamente. La relación entre temperatura ambiente durante el período de aireación y la temperatura que se logra en el grano muestra una asociación significativa (Figura 31). Debido a que la temperatura límite a la cual se enciende el ventilador en cada región fue determinada en base a lograr disminuir la temperatura del grano por debajo de dicho valor en el 80 % de los años, y, en función de valores históricos promedios de temperatura, el ajuste (medido por el R²) podría haber sido mayor si la temperatura límite para el encendido del ventilador se determina en cada año y para cada localidad.

Las horas necesarias para lograr la temperatura promedio objetivo en Sáenz Peña fueron las mayores respecto del resto de las localidades. Esto se podría fundamentar en la variación interanual climática para esta localidad con años en los que fueron necesarias una elevada cantidad de horas para lograr bajar la temperatura del grano (la mayor cantidad de horas necesarias para completar un

ciclo de aireación también corresponde a Sáenz Peña, con 226 h). El funcionamiento del aireador con temperaturas ambientes ligeramente por debajo de límite prescripto tiene escasa influencia en la disminución de la temperatura del grano. Cuando mayor es la diferencia de temperatura entre el grano y el aire ambiente, mayor será el intercambio térmico entre el grano y el aire, consecuentemente, más eficiente y rápido será el proceso de enfriamiento de la masa de granos (Afonso, 2010). En Saenz Peña, la temperatura promedio final del grano fue menor a la obtenida en Manfredi (19,7 vs 22,2) aun cuando el promedio de temperaturas ambientes fueron similares (22,8 °C vs 22,6 °C). Esto podría deberse a que el enfriamiento del grano es un proceso dinámico donde interviene la temperatura y la HR del aire. En Saenz Peña la HR del aire fue 3 % menor, esto podría facilitar el enfriamiento evaporativo del grano a través de la evaporación del agua desde el grano (Yanucci, 2007). En este proceso, el aire con menor humedad provoca la evaporación del agua desde el grano, absorbiendo energía lo cual ocasiona el enfriamiento evaporativo del grano (Maier y Navarro, 2002). La figura 32 y su análisis estadístico indica que no hay relación significativa entre la temperatura ambiente promedio y las horas necesarias para completar un ciclo de aireación. Esto implica que los límites prescriptos para cada localidad fueron adecuados en relación a la temperatura ambiente promedio (con la excepción de Sáenz Peña, donde quizás el límite prescripto debería haber sido ligeramente superior). De haberse mantenido un mismo límite de funcionamiento de aireación para todas las localidades se hubiera obtenido un resultado muy diferente, con mucha mayor cantidad de horas de aireación en las localidades de climas más cálidos.

Las horas de funcionamiento del ventilador están relacionadas al consumo eléctrico. Como no se encontró una relación entre las horas de funcionamiento y las condiciones climáticas tampoco es esperable encontrar una relación entre el consumo de energía y las condiciones climáticas, tal como lo muestra la figura 33.

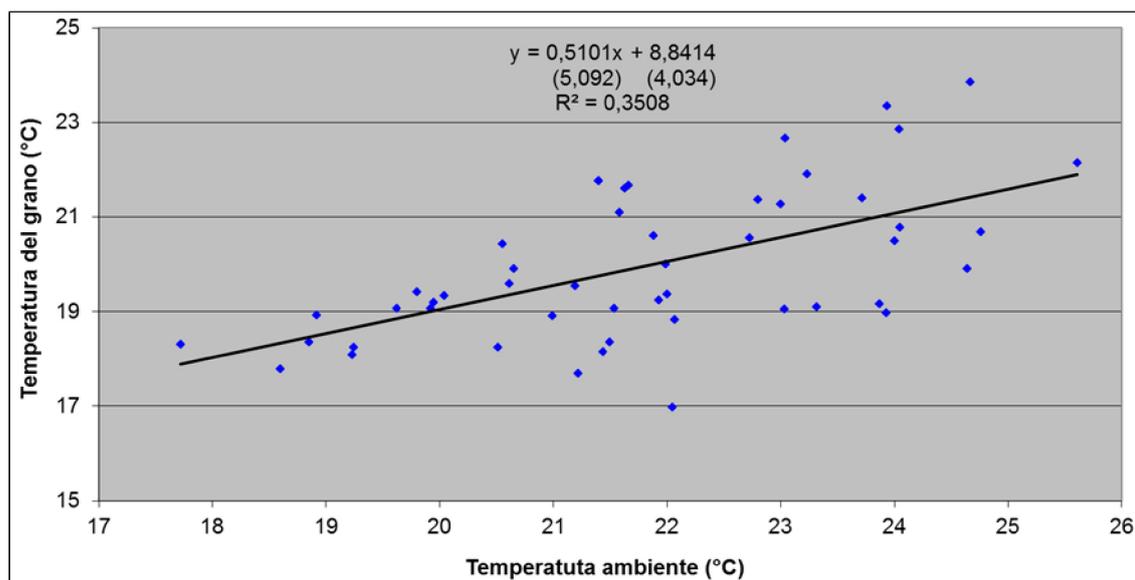


Figura 31. Relación entre la temperatura del grano lograda luego del ciclo de aireación y la temperatura ambiente promedio durante el período de aireación para las distintas localidades y años considerados. Nota: “los valores entre paréntesis son los estadísticos t para el intercepto y la pendiente de regresión”

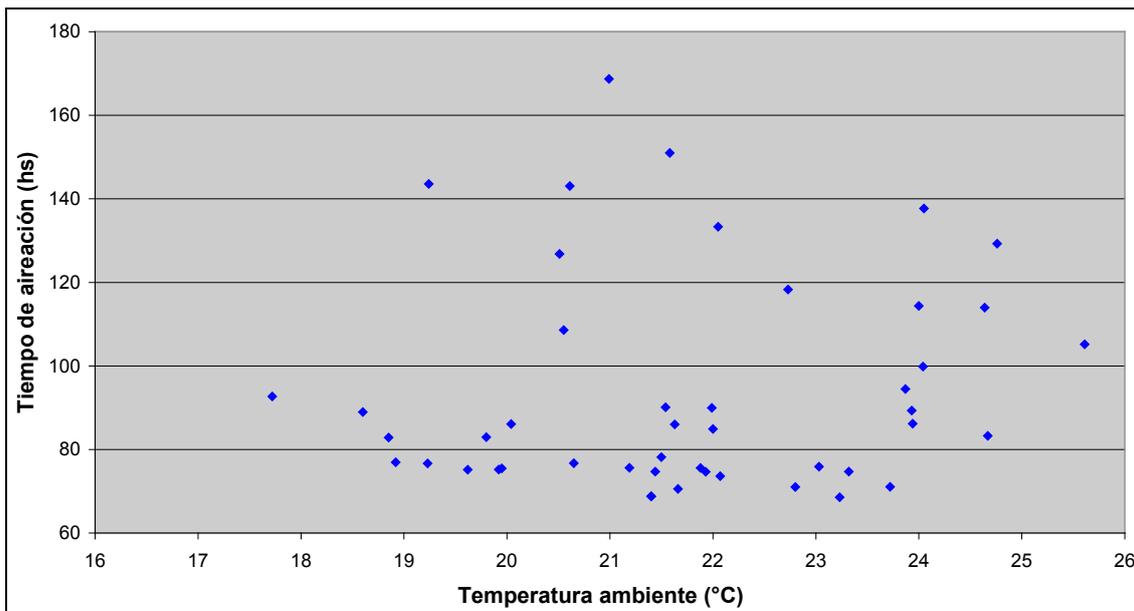


Figura 32. Relación entre horas de aireación necesarias para completar un ciclo y la temperatura ambiente promedio durante el período de aireación para las distintas localidades y años considerados. (P-value 0,6043)

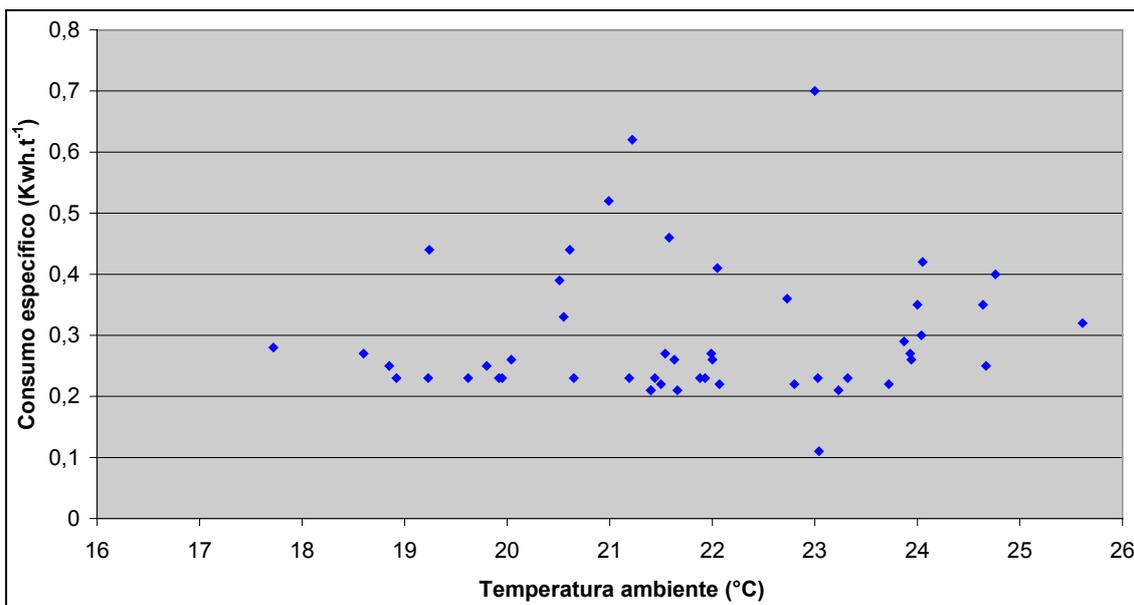


Figura 33. Relación entre consumo energético específico para lograr un ciclo de aireación y la temperatura ambiente promedio durante el período de aireación para las distintas localidades y años considerados. (P-value 0,5862)

5.4. Simulación del comportamiento de refrigeración en diferentes regiones agroclimáticas del país.

La Tabla 19 muestra los resultados de la simulación de refrigeración para las diferentes localidades consideradas. En general, el tratamiento de refrigeración logró enfriar los granos a una temperatura promedio cercana a 14,4 °C (13,5-14,7 °C) independientemente de la temperatura ambiente promedio durante el período de refrigeración, la cual varió entre 14,8 y 31,2 °C. La humedad final fue de 13,4 %, con

muy poca variación (0,3 puntos porcentuales entre mínimo y máximo). El tiempo demandado para lograr enfriar la totalidad de la masa de granos fue de 63 h en promedio (52-97). El consumo eléctrico total fue de 2.009 kWh en promedio (581-3190), mientras que el consumo específico fue de 1,69 kWh.t⁻¹ (0,49-2,69).

Tabla 19. Valores promedios, mínimos y máximos de la temperaturas promedio inicial del grano, temperaturas promedio y máxima final del grano, temperatura y humedad relativa ambiente promedio, promedio de humedad final del grano, tiempo de refrigeración y consumos total y específico de energía para diferentes localidades. Objetivo: temperatura promedio y máxima del grano, 15 °C y 17 °C, respectivamente.

Localidad	Valor	Temp. prom. inicial grano (°C)	Temp. prom. final grano (°C)	Temp. máx. final grano (°C)	Temp. prom. amb. (°C) * ¹	Hum. rel. amb. prom. (%)	Hum. final prom. (% b.h.)	Tiempo refrig. (h)	Consumo total (kWh)	Consumo específico (kWh.t ⁻¹)
Anguil	prom.	29	14,4	17,0	22,1	61	13,4	59	1801	1,52
	min.	-	13,5	17,0	17,8	34	13,4	53	581	0,49
	max.	-	14,7	17,0	27,7	77	13,4	71	2435	2,05
Balcarce	prom.	25	14,5	17,0	18,7	74	13,6	56	1521	1,28
	min.	-	14,3	17,0	14,8	57	13,6	52	998	0,84
	max.	-	14,6	17,0	23,5	82	13,6	63	2128	1,79
Manfredi	prom.	32	14,6	17,0	23,6	70	13,3	69	2315	1,95
	min.	-	14,6	17,0	22,0	61	13,3	58	1800	1,51
	max.	-	14,6	17,0	25,2	82	13,3	88	2961	2,50
Pergamino	prom.	31	14,5	17,0	22,6	66	13,3	61	2011	1,69
	min.	-	14,5	17,0	17,5	57	13,3	54	860	0,72
	max.	-	14,7	17,0	24,4	78	13,3	71	2537	2,14
Saenz Peña	prom.	29	14,5	17,0	24,7	67	13,4	72	2398	2,02
	min.	-	14,5	17,0	20,4	55	13,4	54	1237	1,04
	max.	-	14,5	17,0	31,2	83	13,4	97	3190	2,69
General	prom.	29,2	14,4	17,0	22,4	68	13,4	63	2009	1,69
	min.	-	13,5	-	14,8	34	13,3	52	581	0,49
	max.	-	14,7	-	31,2	83	13,6	97	3190	2,69

Obs: *¹: corresponde únicamente a los días en que se desarrolló la simulación de refrigeración.

Se puede observar que en las localidades más cálidas las horas de refrigeración necesarias para lograr una misma temperatura final fueron mayores. Por ejemplo, las horas de refrigeración necesarias para lograr las mismas temperaturas finales del grano fueron 28,9 % mayores en Sáenz Peña que en Balcarce (72 h y 56 h, respectivamente). Esto ocurre porque, tal como se lo explicara anteriormente, el caudal de los equipos de frío se ajusta en función de la capacidad de refrigeración, de manera de mantener la temperatura del aire refrigerado constante (Maier *et al.*, 1997). En consecuencia, mayores temperaturas ambientes, al reducir el caudal de aire del equipo, extienden el tiempo de refrigeración, aumentando consecuentemente los consumos energéticos (Figura 34). Así por ejemplo el consumo específico en Saez Peña fue 57,8 % mayor que para Balcarce (2,02 kWh.t⁻¹ y 1,28 kWh.t⁻¹ respectivamente). Coincidentemente, Roskopf y Bartosik (2011) mencionan que el consumo específico varía en función de la temperatura y humedad relativa ambiente. Si ambas variables son mayores, las necesidades de acondicionamiento del aire son también mayores y por lo tanto se eleva el consumo de energía por tonelada refrigerada. En líneas generales se pudo observar que por cada 1 °C de aumento de temperatura ambiente (desde los 14,8 °C y hasta los 31,2 °C) el tiempo de refrigeración aumenta 2 horas y el consumo específico 0,11 kWh.t⁻¹.

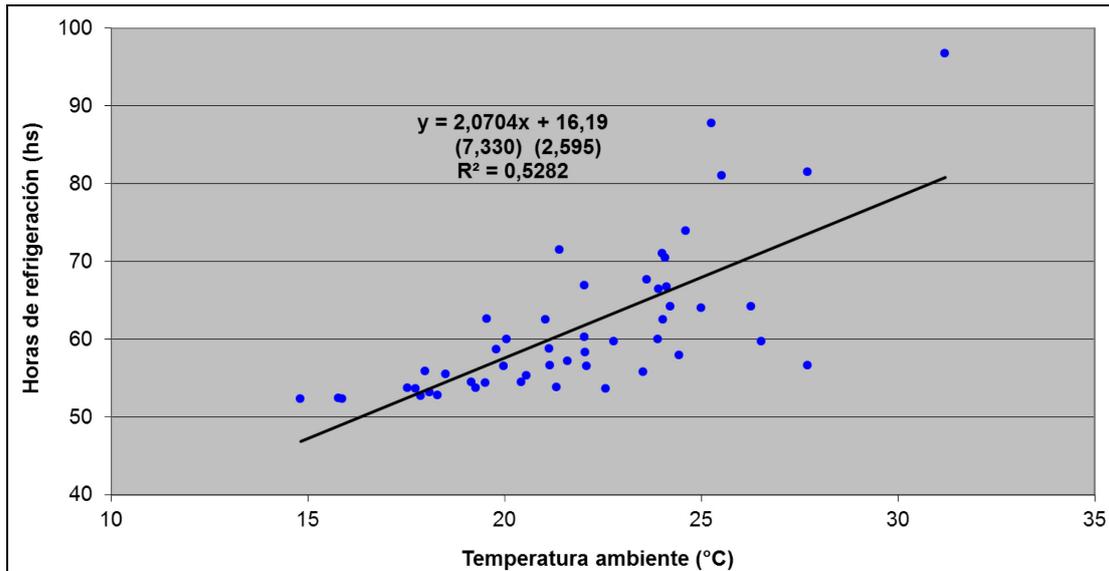


Figura 34. Horas de refrigeración necesarias en función de la temperatura ambiente.
 Nota: “los valores entre paréntesis son los estadísticos t para el intercepto y la pendiente de regresión”

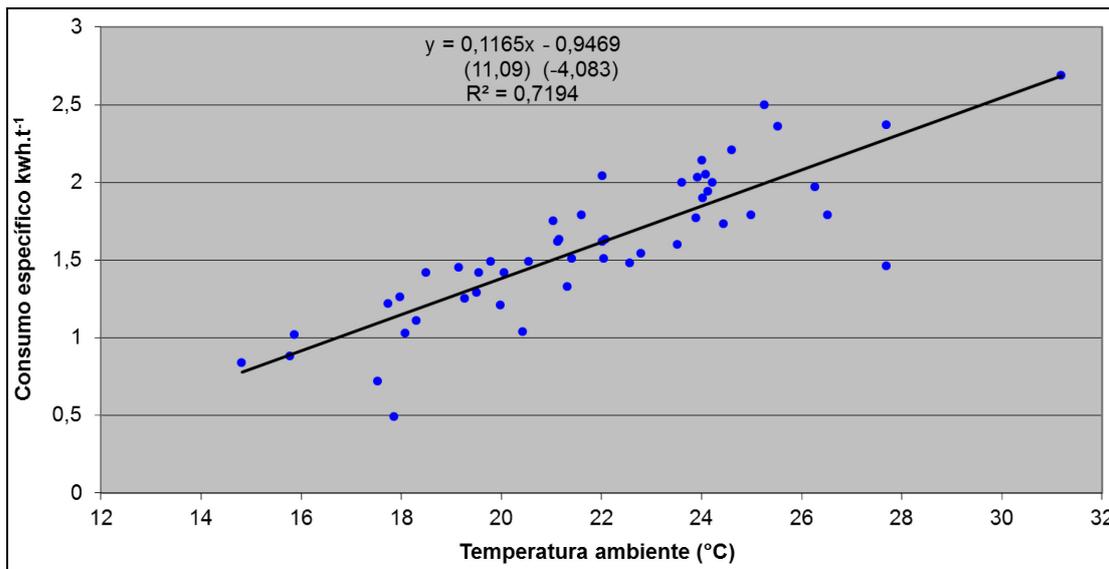


Figura 35. Consumo específico de energía en función de la temperatura ambiente.
 Nota: “los valores entre paréntesis son los estadísticos t para el intercepto y la pendiente de regresión”

5.5. Comparación entre refrigeración y aireación.

En la Tabla 20 se muestra el resumen de la comparación entre aireación y refrigeración de las principales variables en cada una de las localidades.

Tabla 20. Promedio de temperatura final del grano, tiempos de aireación, consumo específico y merma de humedad para las localidades simuladas para los tratamientos de RA y AN.

Localidad	Tratamiento	Temperatura promedio final grano (°C)	Tiempo de aireación o refrigeración (h)	Consumo específico (kWh.t ⁻¹)	Merma por humedad (t)
Anguil	RA	14,4	59	1,52	7,39
	AN	19,4	94	0,29	5,1
Balcarce	RA	14,5	56	1,28	5,05
	AN	19,2	105	0,32	2,46
Manfredi	RA	14,6	69	1,95	9,02
	AN	22,2	79	0,24	5,42
Pergamino	RA	14,5	61	1,69	8,57
	AN	21,5	75	0,23	5,25
Sáenz Peña	RA	14,5	72	2,02	7,39
	AN	19,7	121	0,37	4,55
Promedio	RA	14,5	63	1,69	7,04
	AN	20,4	95	0,29	4,32

Se observa que el promedio de temperatura final del grano fue significativamente menor en RA que en AN (14,5 °C y 20,4 °C, respectivamente). Esta diferencia de temperatura, entre 5 °C y 8 °C, se mantiene en todas las localidades.

El tiempo de aireación, en promedio, fue 59 % mayor para el tratamiento de AN. Estas diferencias de tiempo para lograr la temperatura objetivo del grano fueron de 88 % en el caso de la localidad de Balcarce (RA 56 h y AN 105 h) mientras que en la localidad de Pergamino las diferencias fueron notablemente reducidas a 14 % (RA 61 h y AN 75 h).

El consumo específico fue notablemente mayor (483 %) en el tratamiento de RA respecto de AN (1,69 kWh.t⁻¹ y 0,29 kWh.t⁻¹, respectivamente). Analizando las distintas localidades se puede apreciar que la menor diferencia se da en las localidades con promedio de temperatura más bajo, como Balcarce (300 % mayor), y la mayor diferencia se da en las localidades con promedio de temperatura ambiente más alto, como Manfredi (713 % mayor). El consumo de energía de todos los componentes del equipo de frío (compresor de refrigerador, ventilador de aireación y ventiladores del condensador) hace que, aun cuando el tiempo de refrigeración sea menor, el consumo energético resulta mayor.

En promedio y para todas las localidades la merma de grano fue mayor en RA que en AN (7,04 t y 4,32 t, respectivamente) (Tabla 21). Esto se debió a que, con excepción de Anguil, en el resto de las localidades la humedad relativa de entrada del aire al silo fue menor en el tratamiento de RA (63 %) que en el tratamiento de AN (69,1 %), resultando el aire de refrigeración con mayor capacidad de secado que el aire de aireación. Esta diferencia en merma se puede disminuir si se incrementa la HR del aire de refrigeración, aunque en ese caso se perdería cierta capacidad de enfriamiento evaporativo por lo que el ciclo de refrigeración se extendería y por lo tanto el consumo de electricidad sería mayor.

Un estudio mediante simulación desarrollado en EE.UU. por Maier y Bakker-Arkema. (1992) determinó que en los tratamientos de refrigeración desarrollados en otoños de 1989, 1990 y 1991, los cambios en las condiciones ambientales afectan significativamente el desempeño del equipo de frío con variaciones de hasta 1,5 días

en ciclos de aireación promedio de 8 días. En la presente simulación las variaciones climáticas estacionales y regionales afectaron principalmente los tiempos de refrigeración (horas) en un rango similar a lo reportado por la literatura y, por lo tanto, los consumos específicos de energía (kWh.t^{-1}). Por el contrario, debido a que la aireación se realiza exclusivamente con aire ambiente, la temperatura del mismo tiene notable influencia sobre la temperatura final del grano. Sin embargo, no se aprecia un gran efecto en las horas de funcionamiento del ventilador ni en el consumo energético, tal como se describiera anteriormente.

5.6. Análisis económico.

La Tabla 21 muestra las mermas de peso, humedad relativa de entrada del aire al silo y peso final del grano al momento de la venta para las distintas localidades y ambos tratamientos.

Tabla 21. Merma de peso, humedad relativa del aire de entrada al silo y peso final de grano al momento de la venta.

	Tratamiento	Merma de peso (t)	Humedad relativa promedio (%)	Peso final grano (t)	Diferencia RA-AN (t)
Anguil	RA	7,39	63,0	1.176,8	
	AN	5,10	61,0	1.179,1	2,3
Balcarce	RA	5,05	63,0	1.179,2	
	AN	2,46	75,6	1.181,8	2,6
Manfredi	RA	9,02	63,0	1.175,2	
	AN	5,42	72,9	1.178,8	3,6
Pergamino	RA	8,57	63,0	1.175,7	
	AN	5,25	66,8	1.179,0	3,3
Sáenz Peña	RA	7,39	63,0	1.176,8	
	AN	4,55	69,6	1.179,7	2,9
Promedio	RA	7,04	63,0	1.177,2	
	AN	4,32	69,1	1.179,9	2,7

En promedio, en el tratamiento de RA, la merma fue 2,7 t mayor respecto de AN. Una merma de humedad resulta directamente en una merma de peso que comercialmente implica pérdida física de mercadería. A consecuencia de esto, los ingresos por venta del grano serán menores en el tratamiento de RA que en los tratamientos de AN e impactan directamente en la evaluación económica de la tecnología.

En la Tabla 22 se muestran los costos por tonelada para los tratamientos de RA y AN. Los costos se presentan por tonelada de grano y comprenden el costo de alquiler del equipo de frío, el costo de la energía demandada para enfriar el grano y el costo del control químico, separado en el costo del protectante y el costo del fumigante. En el caso de RA dada la baja temperatura del grano (menor a 17 °C) no se utilizan insecticidas protectantes ni tampoco fumigante, por lo que para este tratamiento no se considera costo de control químico.

Tabla 22. Costo por tonelada de alquiler del equipo de frío, consumo de energía, protectante y fumigante.

	Tratamiento	costo alquiler equipo de frío (\$·t ⁻¹)	costo energía (\$·t ⁻¹)	costo protectante (\$·t ⁻¹)	costo fumigante (\$·t ⁻¹)
Anguil	RA	5,35	0,95	0,00	0,00
	AN	0,00	0,18	3,23	3,54
Balcarce	RA	5,35	0,80	0,00	0,00
	AN	0,00	0,20	3,40	3,59
Manfredi	RA	5,35	1,22	0,00	0,00
	AN	0,00	0,15	3,72	6,68
Pergamino	RA	5,35	1,06	0,00	0,00
	AN	0,00	0,15	3,65	3,90
Sáenz Peña	RA	5,35	1,27	0,00	0,00
	AN	0,00	0,23	3,46	4,18
Promedio	RA	5,35	1,00	0,00	0,00
	AN	0,00	0,19	3,41	4,01

El tratamiento de AN no involucra el alquiler de equipamiento, por lo que en dicho caso el costo es cero.

El costo de energía siempre fue mayor en promedio y para todas las localidades en el tratamiento de RA. Aún con escasas diferencias entre localidades, en Sáenz Peña se registró el mayor costo por consumo de energía eléctrica, 1,27 \$·t⁻¹, dada la mayor temperatura ambiente promedio en dicha localidad, 24,7 °C.

Los costos por uso de protectantes en el caso de AN presentan escasas diferencias entre localidades, mientras que el costo por uso de fumigantes es notablemente mayor en Manfredi 6,68 \$·t⁻¹ a consecuencia de que en dicha localidad se registraron las mayores temperaturas finales del grano, 25,9 °C versus 23,2 °C promedio para todas las localidades.

Tabla 23. Costos totales por tratamientos, diferencias de costos (RA-AN), VAN por tratamiento y diferencia de VAN (RA-AN).

	Costo RA \$·t ⁻¹	Costo AN \$·t ⁻¹	Diferencia de costos (RA-AN) \$·t ⁻¹	VAN RA \$·t ⁻¹	VAN AN \$·t ⁻¹	Diferencia de VAN (RA-AN) \$·t ⁻¹
Anguil	6,30	6,95	-0,65	715,13	715,89	-0,76
Balcarce	6,15	7,18	-1,03	716,71	717,27	-0,56
Manfredi	6,57	10,55	-3,98	713,86	712,09	1,77
Pergamino	6,41	7,69	-1,28	714,30	715,05	-0,75
Sáenz peña	6,61	7,87	-1,26	714,82	715,3	-0,48
Promedio	6,35	7,61	-1,26	715,30	715,7	-0,40

El costo por tonelada fue mayor para todas las localidades en el tratamiento de AN, en mayor magnitud, en la localidad de Manfredi. Si solamente se comparan los costos energéticos y las mermas, la AN tendría un menor costo total que RA. No obstante debido a que el estudio se realiza en el marco de un programa de manejo integrado de plagas, la diferencia principal de costos entre ambos tratamientos la

establece el uso de los insecticidas, aumentando con ello los costos en el tratamiento de AN.

El VAN fue mayor en todas las localidades para el tratamiento de AN a excepción de la localidad de Manfredi, sin embargo las diferencias son escasas. Si bien los costos de los tratamientos de AN fueron mayores que en RA (debido a la necesidad de complementar el control de insectos mediante la utilización de productos químicos), el ingreso también fue mayor debido a la menor merma por humedad. En el caso particular de Manfredi la tendencia se invierte con un VAN de $1,77 \text{ \$} \cdot \text{t}^{-1}$ a favor del tratamiento de RA, debido fundamentalmente al alto costo del tratamiento de fumigación incurrido para el tratamiento de AN. En esta localidad, para todas las series de años simulados, las temperaturas máximas estuvieron por arriba de los $25 \text{ }^\circ\text{C}$, elevando el promedio de temperatura de granos que se puede obtener con AN y consecuentemente el uso de protectante. A su vez, las temperaturas máximas de grano, siempre mayores a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (valor a partir del cual aumenta la dosis de fumigante) incrementaron también la dosis de uso de fumigante, incurriendo con ello en mayores costos que impactan negativamente en el VAN de AN. Esto podría indicar que en aquellas regiones y/o años en donde con AN no se logre disminuir las temperaturas a valores inferiores a los $25 \text{ }^\circ\text{C}$, la RA podría ser económicamente conveniente. En este caso, para un volumen de almacenamiento promedio anual de trigo, en una planta de acopio de 10.000 t., el beneficio económico asciende a un monto total de $\$ 17.700$ en el caso de uso de RA.

5.6.1. Composición de costos.

En la Figura 36 se muestra la composición porcentual de costos en el tratamiento de RA y AN. En RA, el mayor componente de la estructura de costos se debe al alquiler del equipo de frío (84%) y el restante costo corresponde a energía, representando el 16% del total. Debido a ello es de esperarse que variaciones en el precio de alquiler tengan un importante impacto en la estructura de costos del tratamiento. El mayor costo del tratamiento de AN está dado por el uso de insecticidas, con el 53% y 44% para el uso de fumigantes y protectantes, respectivamente. Debido al bajo consumo de energía, la incidencia en el costo es baja y representa sólo el 3% .

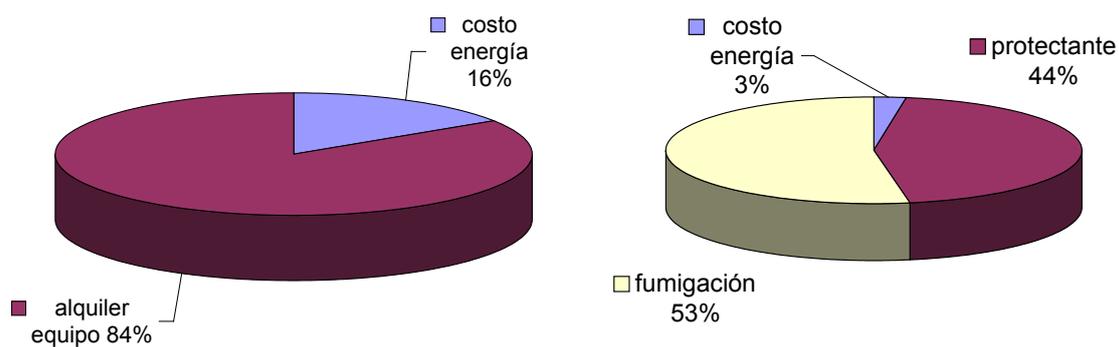


Figura 36. Composición de costos: a la izquierda RA, a la derecha AN.

A continuación (Tabla 24) se muestra el análisis económico de sensibilidad en base al (VAN) considerando secuencialmente aumentos del 15% en los costos de energía, insecticidas y alquiler de equipo de frío. Se consideraron también aumentos (y disminuciones) en el precio del trigo del 15% sobre el máximo (y mínimo) precio registrado en la serie de años considerados, 2002 – 2011. La tabla 25 muestra la diferencia entre los VAN de RA menos los VAN de AN. Valores con signo negativo

indican que el VAN correspondiente al tratamiento de AN fue mayor que el VAN correspondiente a RA.

Tabla 24. Análisis económico de sensibilidad considerando aumentos del 15 % en costo de energía, insecticidas y alquiler del equipo de frío.

	Tratamiento	VAN con aumento 15 % costo energía \$.t ⁻¹	VAN con aumento 15 % costo insecticidas \$.t ⁻¹	VAN con aumento 15 % del max. precio decádico \$.t ⁻¹	VAN con reducción 15 % del min. precio decádico \$.t ⁻¹	VAN con aumento 15 % alquiler equipo frío \$.t ⁻¹
Anguil	RA	714,99	715,13	1.031,66	476,43	714,33
	AN	715,77	714,88	1.033,03	476,73	715,89
Balcarce	RA	716,59	716,71	1.033,86	477,54	715,91
	AN	717,13	716,22	1.035,12	477,57	717,27
Manfredi	RA	713,68	713,86	1.029,95	475,49	713,06
	AN	711,87	710,53	1.029,14	472,99	712,09
Pergamino	RA	714,14	714,30	1.030,51	475,84	713,50
	AN	714,91	713,92	1.032,15	475,91	715,05
Sáenz Peña	RA	714,63	714,82	1.031,34	476,12	714,01
	AN	715,14	714,16	1.032,59	476,03	715,30
Promedio Nacional	RA	715,15	715,30	1.031,91	476,53	714,49
	AN	715,55	714,59	1.033,05	476,38	715,70

Tabla 25. Valores expuestos como diferencia entre VAN de RA menos VAN de AN. Valores negativos implican la conveniencia económica de AN.

	VAN \$.t ⁻¹	VAN con aumento 15 % costo energía \$.t ⁻¹	VAN con aumento 15 % costo insecticidas \$.t ⁻¹	VAN con aumento 15 % del max. precio decádico \$.t ⁻¹	VAN con reducción 15 % del min. precio decádico \$.t ⁻¹	VAN con aumento 15 % alquiler equipo frío \$.t ⁻¹
Anguil	-0,76	-0,78	0,26	-1,37	-0,29	-1,56
Balcarce	-0,55	-0,54	0,49	-1,25	-0,03	-1,36
Manfredi	1,78	1,81	3,34	0,81	2,51	0,97
Pergamino	-0,75	-0,77	0,38	-1,64	-0,08	-1,55
Sáenz Peña	-0,49	-0,51	0,66	-1,25	0,09	-1,29
Promedio Nacional	-0,40	-0,41	0,71	-1,13	0,15	-1,12

Para todas las localidades el aumento del 15 % en el costo de energía no modifica sustancialmente el resultado económico, aunque hace más conveniente el uso de AN. No obstante el incremento del costo de energía, en Manfredi, se mantiene la tendencia favorable de RA. Lo mismo ocurre en esta localidad al aumentar 15 % el costo de insecticidas, 15 % el costo de alquiler del equipo de frío en el tratamiento de refrigeración y un aumento o disminución del precio del trigo. Dados los costos incurridos en aplicaciones contra insectos (representan el 97 % de los costos por tonelada debido a protectantes y fumigantes) en el tratamiento de AN para todas las

localidades, un aumento del 15 % del costo de insecticidas repercute negativamente, resultando económicamente más conveniente la RA. Aumentos en el costo de alquiler del equipo de frío no modifican la tendencia y continúa siendo económicamente más favorable la AN.

En la Figura 37 se muestra la tendencia de evolución del VAN conforme se modifica el precio de los insecticidas (protectantes mas fumigantes).

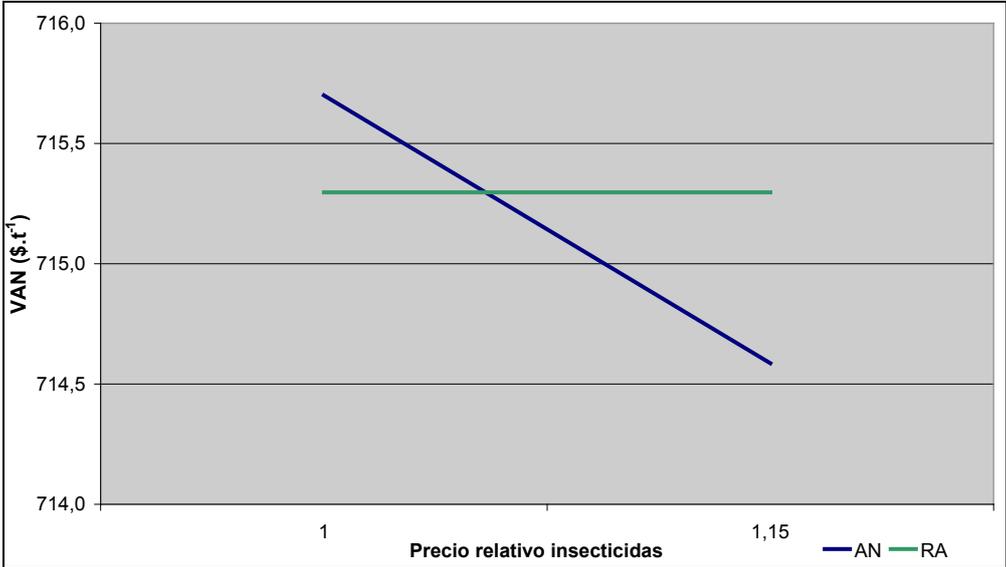


Figura 37. Incidencia del aumento del precio de insecticidas en el resultado económico expresado a través del VAN en \$·t⁻¹.

Aumentos en el precio de insecticidas mayores al 10 % causan que sea más conveniente la RA debido a que el tratamiento de RA no conlleva el uso de insecticidas, su VAN se mantiene constante. Esto hace que la conveniencia económica de uno u otro tratamiento dependa del precio de los insecticidas.

La figura 38 muestra la evolución del VAN para ambos tratamientos con distintos precios del trigo.

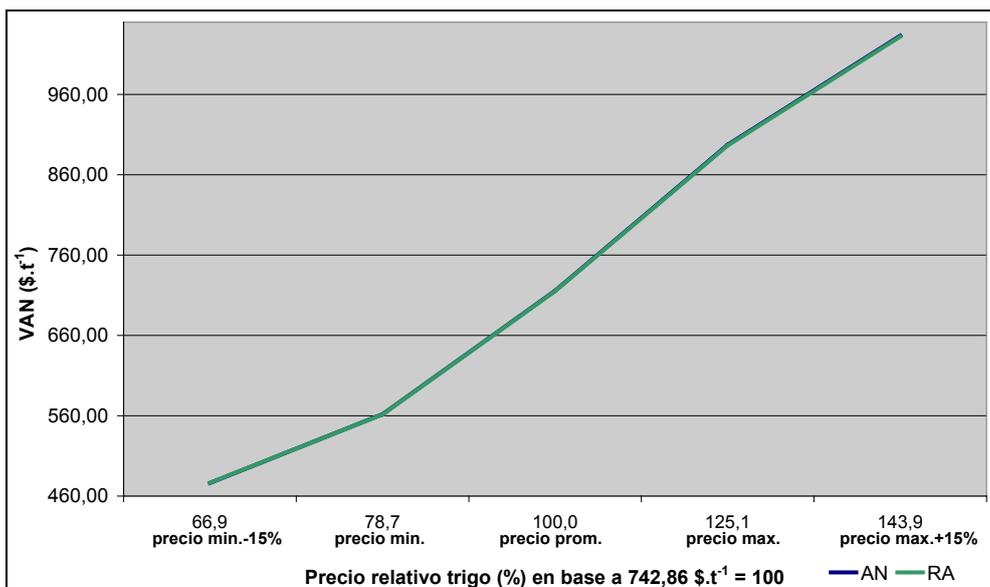


Figura 38. Evolución del VAN para aireación y refrigeración en función del precio relativo del trigo. [Nota: debido a la superposición de ambas series sólo se visualiza la correspondiente a RA].

Los tratamientos de AN y RA, generan mermas de peso distintas al finalizar el tratamiento (Tabla 21). Esto tiene diferentes impactos económicos de acuerdo a la variación del precio del trigo. A mayor precio del trigo la aireación incrementa su VAN respecto de la RA ya que AN genera menores mermas de peso en el volumen total del silo lo que redundaría en un mayor ingreso. Por la misma razón, reducciones del precio de trigo provocan que los VAN de cada tratamiento disminuyan sus diferencias hasta incluso llegar a invertirse (Figura 39). Sin embargo estas diferencias son reducidas llegando como máximo a $-1,2 \text{ \$·t}^{-1}$ al aumentar el precio del trigo.

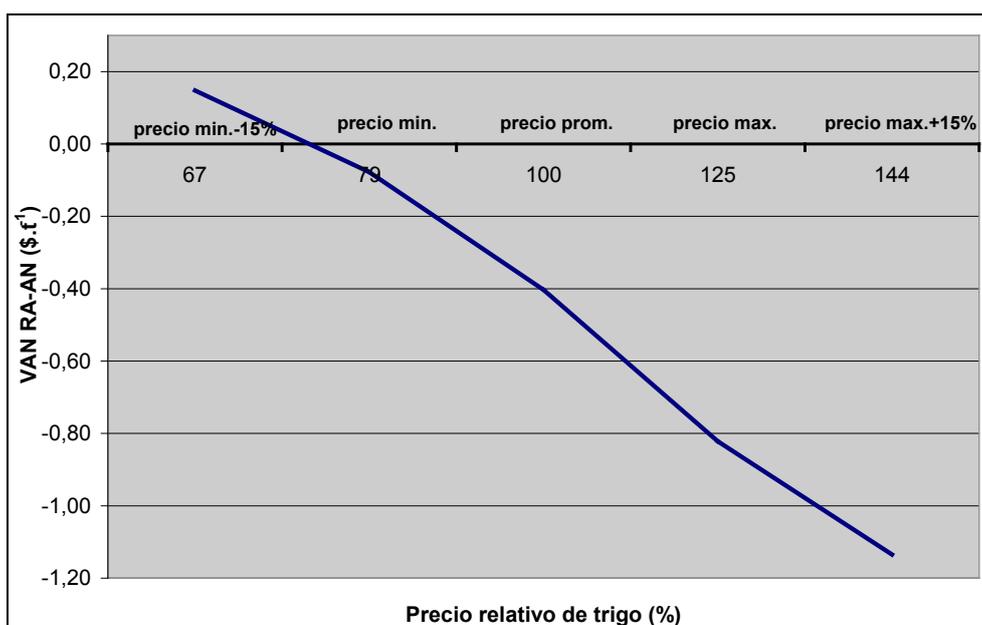


Figura 39. Evolución del VAN RA-AN en función del precio relativo del trigo.

6. Consideraciones finales

Se considera validado el modelo **SAR-Sim** para simular procesos de refrigeración artificial en trigo almacenado en silo. El modelo predijo los cambios de temperaturas del grano con un error estándar de 1,7 °C y un promedio del valor absoluto de los residuales de 1,41 °C.

Las temperaturas simuladas en refrigeración fueron suficientemente bajas (menor a 17 °C) como para limitar el desarrollo de insectos en todas las localidades, por lo que no se considera un control químico complementario.

Se constató que mayores temperaturas ambientes extienden el tiempo de refrigeración y aumentan los consumos de energía. Por cada un 1 °C de aumento de temperatura ambiente entre los 14,8 °C y hasta los 31,2 °C, el tiempo de refrigeración aumenta 2 horas y el consumo específico 0,11 kWh.t⁻¹.

Los tiempos de refrigeración y consumos de energía fueron diferentes para las localidades simuladas, con una variación máxima del 28,9 % y del 57,8 % entre las localidades de Sáenz Peña y Balcarce, respectivamente.

Con refrigeración se consiguió la temperatura de almacenamiento en menos tiempo y se alcanzaron menores temperaturas de grano con un mayor consumo de energía y mayor pérdida de peso respecto a aireación natural”

Se considera validado el modelo **SAR-Sim** para simular procesos de aireación natural en trigo almacenado en silo. El modelo predijo los cambios de temperaturas del grano con un error estándar de 2,17 °C, y un promedio del valor absoluto de los residuales de 1,94 °C.

Las temperaturas del grano logradas con aireación natural no resultaron lo suficientemente bajas como para limitar el desarrollo de insectos y sería necesario complementar la aireación con un control químico. La menor temperatura alcanzada fue de 19,2 °C en Balcarce y la mayor de 22,2 °C en Manfredi.

En refrigeración artificial la mayor incidencia de costos se debe al alquiler del equipo de frío, con el 84 % del total. A su vez, el costo por t refrigerada fue escasamente variable entre las localidades.

En aireación natural la mayor incidencia de costos corresponde al uso de insecticidas (protectantes más fumigantes), con el 97 % del total. A diferencia de lo observado para refrigeración artificial, el costo por t utilizando aireación natural fue variable entre las localidades, motivado por las mayores dosis de aplicación de fumigantes a mayores temperaturas del grano.

Si bien los costos de aireación natural fueron mayores, la merma de peso fue menor para esta alternativa. Como consecuencia de ello, el Valor Actualizado Neto fue levemente mayor en todas las localidades para el tratamiento de aireación natural, a excepción de la localidad de Manfredi. Esto implica que considerando la tecnología como una parte del esquema de control integrado de plagas, ambas alternativas tienen un impacto económico similar, aunque levemente superior en el caso de aireación natural más control químico complementario.

El análisis de sensibilidad indicó que el aumento de hasta un 15 % en el costo de alquiler del equipo de frío, del costo de energía y del precio del trigo, no modifica la tendencia de conveniencia económica de aireación por sobre refrigeración artificial.

El aumento de costo del insecticida a valores levemente superiores al 10 % impacta negativamente en el resultado económico de la aireación natural, favoreciendo la refrigeración artificial.

Las diferencias económicas entre ambas tecnologías son pequeñas. La elección de una u otra técnica probablemente estará en función de la practicidad de cada una,

tiempo requerido de enfriamiento, calidad final del grano o nivel demandado de residuos de insecticidas sobre el grano, entre otras. Conviene destacar la posibilidad de utilizar refrigeración artificial en el manejo de granos especiales o para consumo humano directo, ya que el impacto económico es similar al uso de aireación natural pero se prescinde del uso de químicos, garantizando la inocuidad de los granos.

7. Conclusiones

Las temperaturas del grano logradas con aireación natural no resultaron lo suficientemente bajas como para limitar el desarrollo de insectos y sería necesario complementar la aireación con un control químico. Por lo tanto no existen evidencias para rechazar la Hipótesis 1 “En ciertas regiones geográficas de Argentina, la temperatura lograda mediante aireación en el trigo almacenado inmediatamente después de la cosecha no es lo suficientemente baja como para limitar por si sola el desarrollo de insectos”

El tratamiento de refrigeración artificial logró temperaturas suficientemente bajas (menor a 17 °C) como para limitar el desarrollo de insectos en todas las localidades, por lo que no sería necesario considerar un control químico complementario.

En condiciones climáticas de mayor temperatura (que imposibilitan enfriar el grano con aireación por debajo de 25 °C), la refrigeración artificial es económicamente conveniente respecto de la aireación natural combinada con insecticidas. Por lo tanto no existen evidencias para rechazar la Hipótesis 2 “Hay una tendencia a una mayor conveniencia económica de la refrigeración artificial por sobre la aireación combinada con el uso de insecticidas bajo condiciones climáticas de mayor temperatura ambiente”

Las mayores temperaturas ambientes extienden el tiempo del tratamiento de refrigeración y aumentan los consumos de energía.

En condiciones de mayor temperatura ambiente el tratamiento de aireación natural requiere mayor uso complementario de insecticidas químicos.

En aireación natural la mayor incidencia de costos corresponde al uso de insecticidas (protectantes más fumigantes). A diferencia de lo observado para refrigeración artificial, el costo por t utilizando aireación natural fue variable entre las localidades, motivado por las mayores dosis de aplicación de fumigantes a mayores temperaturas del grano.

8. Recomendaciones.

Como futuros temas de investigación en la temática se propone:

- 1) Estudiar las diferencias sobre la calidad final de grano de acuerdo a la técnica de enfriamiento utilizada en granos especiales (por ej. arroz, maíz pisingallo, cebada, etc.).
- 2) Evaluar diferentes alternativas para mejorar la eficiencia energética de la refrigeración, como por ejemplo refrigeración de granos ligeramente húmedos respecto de granos secos o selección de las horas de funcionamiento del equipo de refrigeración en función de las condiciones meteorológicas comparado con la refrigeración continua.
- 3) Evaluar diferentes alternativas de programación de temperatura y humedad del aire refrigerado por el equipo de frío para lograr una mayor eficiencia energética y menor merma de humedad.

9. Bibliografía.

- Abadía, B.; Bartosik, R. 2013. Manejo eficiente del grano en la poscosecha. En Manual de Buenas prácticas en poscosecha de granos. Hacia el agregado de valor en origen de la producción agropecuaria. Abadía Bernatte y Bartosik Ricardo. Ediciones INTA 2013. 194 p. ISBN 978-987-679-264-6.
- Abalone, R.; Gastón, A.; Cassinera, A.; Lara, M. 2006. Modelización de la distribución de la temperatura y humedad en granos almacenados en silos. *Mecánica Computacional v.XXV*, p.233-247.
- Abalone, R.; Gastón, A.; Bartosik, R.; Cardoso, L.; Rodríguez, J. 2011a. Gas Concentration in the Interstitial Atmosphere of a Wheat Silo-Bag. Part I: Model Development and Validation. *Journal of Stored Product Research*, 47 (2011) 268-275.
- Abalone, R.; Gastón, A.; Bartosik, R.; Cardoso, L.; Rodríguez, J. 2011b. Gas Concentration in the Interstitial Atmosphere of a Wheat Silo-Bag. Part II: Model sensitivity and effect of grain storage conditions. *Journal of Stored Product Research*, 47 (2011) 276-283.
- Afonso, A. 2010. Aireación de granos: funcionamiento y manejo. *Revista Granos & poscosecha latinoamericana. De la semilla al consumo. Año 17 n° 77 agosto/septiembre 2010.* pp 13-15 .
- Alexander, C.; Kenkel, P. 2012. Economics of Commodity Storage. In *Stored Product Protection (Vol. 1, pp. 1-11)*. Manhattan, KS: Kansas State.
- Arias Barreto, A; Abalone, R; Gastón, A. 2013a. Mathematical modelling of momentum, heat and mass transfer in grains stored in silos. Part I: Model development and validation. Aceptado en *Latin American Applied Research (LAAR MS 92-12)* .
- Arias Barreto, A.; Abalone, R.; Gastón, A. 2013b. Mathematical modelling of momentum, heat and mass transfer in grains stored in silos. Part II: Model application. Aceptado en *Latin American Applied Research (LAAR MS 93-12)*.
- ASAE. 2005. American Society of Agricultural and Biological Engineers - Standard D535. Shelled Corn Storage time for 0,5 % dry matter loss.
- ASAE. 2010. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Standard D271.2 Psychrometric Data.
- Balzi, U.; Gastón, A.; Abalone, R. 2008. Efecto de la convección natural en la distribución de temperatura y migración de humedad en granos almacenados en silos. *Actas ENIEF 2008. Mecánica Computacional, vol.XXVI*, p.1471-1485.
- Bartosik, R.; Maier, D. 2005. Field testing of a new variable heat low temperature in bin drying control strategy. *ASABE 2005 Vol. 21 (3)* 445-453.
- Bartosik, R.; Rodríguez, J.; de la Torre, D.; Cardoso, L. 2009. AireAr: a new software for sizing aeration fans. *CIGR. Section V. International Symposium, 1-4 septiembre. Rosario, Argentina.*
- Bartosik, R.; de la Torre, D.; R.; Cardoso, L.; Rodríguez, J. 2011a. <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/postcosecha/ControladorEconomicoAireacionGranosAlmacenados.asp>. Acceso marzo 2012.
- Bartosik, R., de la Torre, D., Urcola, H., Cardoso, L. y Rodríguez, J. 2011b. Reconditioning overly dried soybeans with aeration. *XXXIV CIOSTA and CIGR V Conference, 29 y 30 de junio de 2011, Viena, Austria.*
- Bartosik, R. 2012a. Mermas en el acopio de granos. *Revista APOSGRAN. Año XXI - N°117 - Volumen 1/2012*

- Bartosik, R. 2012b. Eficiencia de poscosecha. Control de insectos en granos almacenados. Gacetilla de divulgación. Febrero de 2012. PRECOP.
- Bartosik, R. 2013. La Poscosecha en Argentina: contexto Actual. Gacetilla de prensa. <http://inta.gob.ar/documentos/la-poscosecha-en-argentina-contexto-actual>. Acceso setiembre 2013.
- Batista, J. 2010. Demandas externas de calidad y biotecnología. Medidas correctivas en el mercado interno. Conferencia Simposio Granos SAC 2010. 13° expo post-cosecha internacional. 8 y 9 de setiembre 2010.
- Bogliachini, A. 2006. Refrigeración. Revista Granos & Postcosecha Latinoamericana. De la semilla al consumo. Año 11-N° 56. Agosto del 2006. Pp 18-20
- Casini, C. 2006. Trigo: en la poscosecha se pierden casi 150 millones de dólares. Gacetilla de presa. <http://www.todoagro.com.ar/noticias/nota.asp?nid=2180> acceso setiembre 2009.
- COPAL. 2013. Coordinadora de las industrias de productos alimenticios. http://www.copal.com.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=91%3Aharina-de-trigo-y-premezclas&catid=63%3Aitems-cadenas&Itemid=64 Accedido mayo del 2013.
- De Dios, C. 1994. Refrigeración de granos: calidad a bajo costo. Material de prensa para difusión. Poyecto IPG-Intensificación de la producción de granos.
- De Dios, C. 2007. Controles automáticos de aireación. En Curso de conservación de granos: aireación, limpieza y temas afines. Asociación Argentina de poscosecha de granos.
- de la Torre, D.; Bartosik, R.; Piñero, E. 2009. Validation of a simulation model for wheat aeration in Argentina. International commission of agricultural and biological engineers, section V. Conference "Technology and management to increase the efficiency in sustainable agricultural system. Rosario, Argentina. 1 al 4 de septiembre del 2009.
- de la Torre, D.; Bartosik, R. 2013. Climate Effect On Strategy Selection and Energy Consumption for in-Bin Drying of Corn with Natural Air / Low Temperature. Agric Eng Int: CIGR Journal, 15 (2). 304-317. Open access at <http://www.cigrjournal.org>.
- FAIM. 2013. Federación Argentina de la industria molinera. Disponible en www.faim.org.ar/ Acceso setiembre 2013.
- FAO. 1985. Prevención de pérdidas de alimentos en poscosecha: manual de capacitación. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Roma, 1985.
- FAO, 2009. How to feed the World 2050. The technology challenge. High-level Expert Forum, Roma 12 y 13 de Octubre.
- Fields, P. 1992. The control of stored-product insects and mites with extreme temperatures, J. Stored Prod. Res. 28 (2), 89-118.
- Flanders, K. 2012. Insect control recomendations for 2012. Insect management. Alabama Cooperative Extensión system. IPM-330.
- Frank, R. 1987. Introducción al Cálculo de Costos Agropecuarios. Ed. El Ateneo. Bs. As. 37 p.
- Frank, R. 1998, Evaluación de inversiones en la empresa. Cap 4, 5 y 6. Ed El Ateneo. BsAS.
- Gastón, A.; Abalone, R. 2009. "Modelización de la Transferencia de Energía, Masa y Momento en Granos Almacenados en Silos". Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del MERCOSUR. UNR Editora. CD-ROM, 2493-2502. ISBN978-950-673-748-1

- Gastón, A.; R. Abalone; R.E. Bartosik y J.C: Rodríguez. 2009. Mathematical modelling of heat and moisture transfer of wheat stored in plastic bags (silobags). *Journal of Biosystem Engineering*. Volume 104, Issue 1, September 2009, Pages 72-85.
- Gornatti, C.; Apro, N. 2004. Refrigeración de granos en plantas de almacenamiento. INTI. 5ta Jornadas de desarrollo e innovación.
- Hack, A. 2008. Almacenamiento de granos. Aireación y secado. 119 p. ISBN 3-86037-247-5.
- Hagstrum, D.; Flinn, P.; Howard, R. 1996. Department of Agriculture, Manhattan, Kansas. En *Integrated management of insects in stored products*. Edited by Bhadriraju Subramanyam) AACCC, St. Paul, MN.
- Huarte, A. 1999. Personal communication. Surago, Olavarria. Argentina.
- Iguaz, A.; Arroqui, A.; Esnoz, P.; Virseda. 2004a. Modelling and validation of heat transfer in stored rough rice without aeration. *Biosystems Engineering* 88 (4) 429-439.
- Iguaz, A.; Arroqui, A.; Esnoz, P.; Virseda. 2004b. Modelling and simulation of heat transfer in stored rough rice with aeration. *Biosystems Engineering* 89 (1) 69-77.
- Khankari, K.; Morey, R.; Patankar, S. 1995. Application of a numerical model for prediction of moisture migration in stored grain. *Trans. of ASAE*, v.38(6), p.1789-1804.
- Lacerda, F.; Demito, A.; Miranda, L. 2007. Resultados comparativos del enfriamiento artificial y ventilación con aire ambiental durante el almacenamiento de 16.000 t de maíz a granel. En informe final de actividades técnicas. Universidad Federal de Viçosa. Brasil.
- Lacey, J.; Hill, S.; Stewards, M. 1980. Microorganisms in stored grains: their enumeration and significance, *Trop. Stored Prod. Inform.*, 38, 19-32.
- Lacey, J.; Hill, S.; Stewards, M. 1988. Purdue University (1988). Plant Pathology Department Publications, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA. Microorganisms in stored grains: their enumeration and significance, *Trop. Stored Prod. Inform.*, 38, 19-32.
- MAGYP. 2013. Ministerio de Agricultura, ganadería y Pesca de la Nación. <http://www.minagri.gob.ar/site/> acceso: marzo 2013.
- Maier, D.; Kelley, R.; Bakker, F.; Brunner, H. 1989. Long-term chilled grain storage. ASABE. Paper n° 89-6541.
- Maier, D.; Weidmayer, K.; Bakker-Arkema, F. 1991. Regular and chilled aeration of grains in texas. Paper ASAE N° 91-6092
- Mair, D.; Bakker-Arkema, F. 1992. Analisis of chilled corn storage in the Midwest. Paper n° 92-6045. ASAE.
- Maier, D.; Adams, W.; Hudson, P.; Guiffre, A. 1993. Chilled conditioning of milled rice. ASABE. Paper n° 936515.
- Maier, D.; Adams, W.; Throne, J.; Mason, L. 1996. Temperature management of the maize weevil, *Sitophilus zeamais* Motsch. (Coleoptera: Curculionidae), in three locations in the United States. *J. Stored Prod. Res.* Vol. 32 N° 3 pp 255-273.
- Maier, D.; Rulon, R.; Mason, L. 1997. Chilled versus ambient aeration and fumigation of stored popcorn. Part. 1: temperature management. *J. Stored Prod. Res.* Vol. 33 N° 1. pp 39-49.
- Maier, D; Rulon, R. 1998. Economic analysis of new post-harvest IPM technologies. Proceedings of the 7th international working conference on stored product protection-Volumen 2. departament of Agricultural and Biological Engineering, Purdue University.

- Maier, D.; Navarro, S. 2002. Chilling of grain by refrigerated air. En: Navarro, S.; Noyes, R. The mechanics and physics of modern grain aeration management. New York: CRC Press. LLC
- Maier, D. 2006. Chilled aeration and storage of U.S. crops-a review. Proceeding of the 6th International working conference on stored product protection-volumen 1.
- Mankiw, N. 2006. Principles of microeconomics. Fourth edition.
- Mason, L.; Obermeyer, J. 2010. Stored grain insect pest management. Department of entomology. Purdue extensión. E-66-W.
- Martinello, A.; Giner, S. 2010. Simulation of natural air drying of maize in a typical location of Argentina: Influence of air heating through the fan. Biosystems engineering 107 (2010) 36-45.
- Montross, D; Maier, D; Haghghi, K. 2002a. Development of a finite-element stored grain ecosystem model. Trans. of ASAE, v.45(5), p.1455-1464.
- Montross, D; Maier, D; Haghghi, K. 2002b. Validation of a finite-element stored grain ecosystem model. Trans. of ASAE, v.45(5), p.1465-1474.
- Navarro, S.; Calderon, M. 1982. Aeration of grain in subtropical climates. FAO Agricultural Services Bolletin N° 52, Rome.
- Navarro, S.; Noyes, R.; Armitage, D.; Maier, D. 2002a. Objectives of Aeration en: Navarro, S.; Noyes, R. The mechanics and physics of modern grain aeration management. New York: CRC Press. LLC
- Navarro, S.; Noyes, R.; Armitage, D.; Maier, D. 2002b. Operating Aireation Systems, S.; Noyes, R. The mechanics and physics of modern grain aeration management. New York: CRC Press. LLC
- Navarro, S.; Noyes, R.; Jayas, D. 2002c. Stored Grain Ecosystem and Heat, and Moisture Transfer in Grain Bulks. En Navarro, S.; Noyes, R. The mechanics and physics of modern grain aeration management. New York: CRC Press. LLC
- Navarro, S. 2006. Modified atmospheres for the control of stored-product insects and mites. en: Insect Management for Food Storage and Processing, Second Edition. Heaps, J. W. Ed., AACC International, St. Paul, MN, pp. 105-146.
- NORMA XX TRIGO PAN. 2004. "Norma de Calidad para la Comercialización de Trigo Pan" Resolución de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos N° 1.262/04. <https://www.bcr.com.ar/Normas/> acceso julio 2015.
- Osborne, W.C. 1977. Citado por Noyes, R. y Shlomo, Navarro S. Operating aeration system Cap 7 sección 7.4.5 de Navarro, S.; Noyes, R. The mechanics and physics of modern grain aeration management. New York: CRC Press. LLC.
- PRECOP. 2012. Eficiencia de poscosecha. Refrigeración artificial de granos. Gacetilla INTA-PRECOP. Ministerio de Agricultura, ganaderia y Pesca.
- Quirino, J.; de Lacerda A.; Demito, A. 2007. Utilizaçao do resfriamiento artificial na armazenagem de grãos. Material de comunicación interna.
- Romero, G. 2010. Control de plagas en granos almacenados. I Curso Internacional de Actualización técnica en Poscosecha INTA-APOSGRAN. 28/9 al 2/10 2009.
- Roskopf, R.; Bartosik, R.; Cardoso, L. 2009. Refrigeración artificial de un silo de maíz: ensayo exploratorio. X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del Mercosur. Rosario, Argentina.
- Roskopf, R.; Bartosik, R. 2010. Evaluación de la refrigeración artificial de un silo de maíz. IX Congreso Nacional de maíz. Simposio Nacional de sorgo. 17 al 19 de noviembre del 2010. Rosario.
- Roskopf, R.; Bartosik, R. 2011. Refrigeración artificial de un silo de trigo. Granos & poscosecha latinoamericana de la semilla al consumo. Red Argentina de Postcosecha de granos. Año XVIII-n° 80. Febrero/marzo 2011.

- Rulon, R.; Maier, D.; Boehlje, M. 1997. A post-harvest economic model to evaluate new pest control technologies. Paper n° 97-6063. ASAE, St Joseph, Mi
- Rulon, R.; Maier, D.; Boehlje, M. 1999. A post-harvest economic model to evaluate grain chilling as an IPM technology. *Journal of stored products research* 35 (1999) 369-383.
- Saini, E.; Rodriguez, M. 2008. Insectos perjudiciales a los productos almacenados. Instituto de microbiología y zoología agrícola-CICVyA Inta Castelar.
- SENASA. 2013. Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria <http://www.senasa.gov.ar/> acceso: marzo 2013.
- Stoecker, W. 1958. Refrigeration and air conditioning, McGraw-Hill Ser. Mech. Eng. Mc Graw-Hill Book Co. New York.
- Stroshine, R., Tuite, J.; Foster, G.; Baker, K. 1986. Self study guide for grain drying and storage. Guía de estudio del Departamento de Ingeniería Agrícola y Biológica, Universidad de Purdue, West Lafayette, Indiana, EE.UU. Pp 131.
- Thorpe, G. 2002. Ambient air properties in aeration. En Navarro, S.; Noyes, R. *The mechanics and physics of modern grain aeration management*. New York: CRC Press. LLC.
- Varian, H. 1992. *Microeconomic analysis*. Third edition. ISBN 0-393-95735-7.
- White, N.; Sinha, R.; Muir, W. 1982. Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat. *Canadian Agricultural Eng.*, 24(1): 35-42.
- Wicklow, D. 1995. The mycology of stored grain: an ecological perspective. En *Stored grain ecosystem*. Jayas, D.; White, N.; Muir, W.
- Yanucci, D. 2005. Manual de prácticas de manejo recomendadas post-cosecha de granos. Libro de actualización técnica n° 6.
- Yanucci, D. 2007. Aireación y refrigeración. En la post-cosecha de granos y semillas. Libro de actualización técnica n° 7.