

Monitoreo de Temperatura de Granos y Forrajes Almacenados en Bolsas Plásticas Herméticas (Silo bolsas) Mediante Mediciones de Radiación Infrarroja Cercana de 890 Nanómetros

MSc. Juan Pons^{1,2} and Dra. Claudia Pons^{1,2}

¹ Universidad Abierta Interamericana (UAI)
Av. Montes de Oca 745. CABA.

² Comisión Nacional de Investigaciones Científicas de Buenos Aires

Resumen. El sistema de almacenaje en bolsas plásticas herméticas (silo bolsas) ha sido adoptado ampliamente en todo el país y se utiliza con éxito para almacenar granos con destino a industrialización. En este trabajo presentamos un método novedoso, no reportado hasta ahora en la literatura, que permite observar la evolución de temperatura en todo el volumen del silo bolsa con una resolución inferior a un metro. Está basado en un numeroso conjunto de mediciones de radiación infrarroja en la banda de 890 nanómetros (NIR, siglas en inglés que significan Near Infra-Red) tomadas en el exterior del silo bolsa. Finalmente se exponen los resultados de un ensayo realizado en una planta perteneciente a la empresa OLEAGINOSA MORENO SA en la localidad de Dai-reaux provincia de Buenos Aires.

Palabras Clave: Silo Bolsa, radiación infrarroja, modelos computacionales.

1 Introducción

El sistema de almacenaje en bolsas plásticas herméticas (silo bolsa) ha sido adoptado ampliamente en todo el país y se utiliza con éxito para almacenar granos con destino a industrialización.

En los sistemas tradicionales de almacenaje generalmente es posible manejar el proceso de homogenización de la humedad del grano mediante acondicionamiento, a diferencia de estos el sistema silo bolsa no cuenta con dicha posibilidad y la homogeneización de humedad se produce debido a características propias del mismo.

Algunos trabajos desarrollados por INTA en el Proyecto de Eficiencia de Cosecha y Post-cosecha PRECOP [1] concluyeron que durante la evolución del almacenaje en el silo bolsa se observa la homogeneización de la humedad individual de los granos a los 30-60 días de almacenamiento. Además se produce una estratificación de la humedad y temperatura más o menos significativa dependiendo de las características hi-

grosópicas del material almacenado. Los valores finales de humedad de la masa granaria deben mantenerse dentro de valores recomendables y resultan determinantes para calcular los diferentes riesgos de pérdida que se asumen al almacenar granos durante períodos de tiempo prolongados. En **Tabla 1** [3] pueden verse valores de humedad recomendados para ensilar girasol mientras que en la **Tabla 2** [3] se presentan los riesgos de pérdida asumidos en función de la humedad del material y el tiempo de ensilaje.

Tabla 1. Riesgo por humedad del grano (valores orientativos) para girasol.

Riesgo Bajo	Bajo-Medio	Medio-Alto
Hasta 11%	11%-14%	Mayor 14%

Tabla 2. Riesgo por tiempo de almacenamiento (valores orientativos)

% humedad	RIESGO BAJO	RIESGO MEDIO	RIESGO ALTO
Hasta 11%	6 meses	12 meses	18 meses
11%-14%	2 meses	6 meses	12 meses
Mayor 14%	1 mes	2 meses	3 meses

Teniendo en cuenta los riesgos presentados en **Tabla 2** resulta necesario observar la evolución de humedad que se produce dentro del silo bolsa desde el momento mismo del ensilado, hasta que la bolsa se abre para retirar los granos. Los valores finales de humedad son llamados “humedad en equilibrio” (ERH / EMC) y dependen de la humedad promedio de la masa de granos recibidos.

En resumen, el proceso de homogeneización dentro de cada silo bolsa produce diferentes valores de humedad en equilibrio. Observar los valores finales de humedad promedio en la masa de granos, considerando su evolución, permite seleccionar cuáles de los silo bolsa están en mejores condiciones para almacenar los granos durante más tiempo y cuál de ellos debe ser procesado lo antes posible. Se pueden ver descripciones de estos procesos en [1][3] y [6].

Además de la humedad es importante observar también la evolución de temperatura en los granos almacenados. Este parámetro sirve para detectar actividad biológica dentro del almacenamiento. Si bien se conoce que el patrón de temperatura en el estrato superior del silo bolsa está fuertemente influenciado por las condiciones ambientales, este fenómeno no se observa en la capa media e inferior del mismo [4]. Los estratos medio e inferior presentan valores equilibrados que describen de forma temporal la evolución del almacenaje. Los incrementos de temperaturas en una región equilibrada del silo sirven junto con otros parámetros (concentración de O₂, CO₂, pH) para detectar mayor actividad biológica que perjudica la calidad del almacenamiento. Esta actividad biológica puede ser producida por diversos factores tales como rotura de la bolsa hermética, bolsones de aire producidos en el momento de confeccionar el silo u otro proceso anaeróbico. Si bien hay información científica que hace referencia a la problemática de la utilización de la temperatura como indicador de actividad biológica debido a la gran influencia de la temperatura externa sobre la capa superficial del silo

bolsa nuestro trabajo propone un método para suprimir tal influencia. Suponemos que durante el periodo de muestreo todo el silo bolsa recibe la misma cantidad de energía infrarroja exterior en todo el volumen expuesto. Esta premisa resulta razonable ya que realizamos las mediciones durante la noche, cuando la fuente de energía infrarroja externa más significativa (i.e, el sol) no influye en el muestreo. Reforzamos la validez de esta suposición teniendo en cuenta los diferentes colores (blanco exterior/negro interior) en la bolsa plástica del silo. El color blanco (factor de reflexión cercano a 100%) en la capa exterior actúa reflejando gran cantidad de la radiación infrarroja recibida durante el día mientras que el color negro (factor de reflexión cercano a 0%), del plástico interno, permite transferir la energía infrarroja interior hacia el exterior sin ninguna atenuación. Podemos entonces suponer que el material del silo bolsa entrega energía infrarroja al ambiente exterior durante la noche (i.e. se enfría) y que las condiciones ambientales externas son constantes durante todo el periodo de muestreo que demanda aproximadamente una hora. Observar la evolución de focos de temperaturas altas en alguna región del silo bolsa permitirá decidir si se deben a procesos propios del sistema o por el contrario nunca se extinguen y tienden a incrementarse debido a factores indeseados que ocurren en el interior de la masa granaria. Es necesario tener en cuenta que, en esa situación, los valores de temperatura continuarán incrementándose mientras no se tome alguna medida para revertir el problema que lo origina.

Siempre debe recordarse que el objetivo del ensilaje es mantener el grano frío, seco y limpio durante la mayor cantidad de tiempo posible [5].

2 Materiales y Métodos Utilizados

El ensayo presentado en esta publicación fue realizado en un lote de siete silo bolsas. Se instalaron termómetros (Texas Instruments LM35) e higrómetros (Honeywell HIH-4000) en tres de ellos mientras que todos los silos del lote fueron estudiados mediante termografía infrarroja. La radiación IR fue medida usando un termómetro Fluke 59 cuyo espectro de detección está centrado en 890 nanómetros. Para individualizarlos se rotuló con códigos cada silo, estos fueron rotulados A01, A02, A03, A05, A06, A07 y A08. Los sensores de temperatura y humedad instalados en el interior de cada silo bolsa registraron estos dos parámetros con una frecuencia de 15 / 21 días. Fueron instalados el día 1 de Abril de 2013 y registraron datos hasta el día 14 de Junio del mismo año. La **Fig. 1a** muestra la ubicación de los sensores dentro de cada silo (derecha) y los lugares donde se midió radiación IR (izquierda).

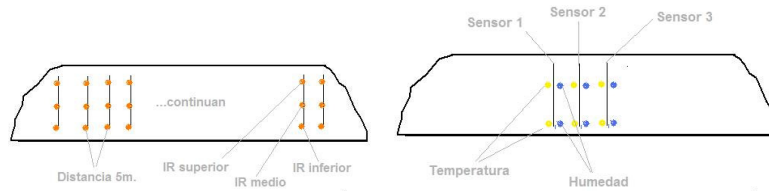


Fig. 1a. Posición de los sensores dentro del silo.

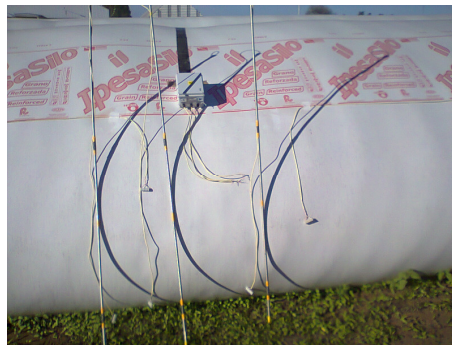


Fig. 1b. Varillas con termo-higrómetros y estación de telemetría.

Como muestra la **Fig. 1a** (derecha) cada sensor tiene dos conjuntos de termo-higrómetros que quedaron ubicados en el interior del silo, un conjunto en la capa inferior (20 cm del piso) y el otro en la capa media-superior (120 cm del piso). Esta distribución permitió registrar el proceso de estratificación de humedad y temperatura que describen los trabajos realizados por INTA. Se dispusieron tres sensores por cada silo bolsa separados entre sí a una distancia de diez metros. Los sensores se comunicaron de manera inalámbrica (WI FI) con una computadora ubicada dentro de la planta a una distancia de 400 metros. Para determinar la ubicación de dicha computadora realizamos un estudio de propagación radioeléctrica en el lugar del ensayo con el objetivo de determinar la posición y cantidad de routers necesarios para asegurar el funcionamiento óptimo del sistema.

En la computadora se instaló un software que desarrollamos, llamado SiloWB, que permitió registrar en archivos históricos los datos enviados por los sensores. Este software tiene herramientas de análisis que permiten entre otras funciones, comparar en tiempo real la evolución de temperatura y humedad para cada silo bolsa. Ampliando la descripción del sistema SiloWEB podemos decir que se trata de una plataforma concentradora de estaciones de telemetría. Los datos de temperatura y humedad enviados por las estaciones de telemetría ubicadas en cada silo (**Fig. 1b**) son recibidos, procesados y archivados en el servidor de SiloWEB para su post-procesamiento. En cuanto al modelo que sirve para elaborar la termografía infrarroja podemos decir que se trata de un modelo descriptivo no predictivo. El modelo toma un numeroso conjun-

to de datos de temperatura infrarroja medidos en cada silo y los ingresa en una matriz. Los valores de dicha matriz son normalizados usando el procedimiento Matlab `normc()` y estos resultados son presentados mediante gráficos de colores utilizando una paleta Hot standard de Matlab. El procesamiento de la información también incluye varias técnicas de interpolación y filtrado digital aplicadas a los valores normalizados aportados por el procedimiento `Plot()` con interpolación “cubic”..

2.1 ¿En qué consiste la termografía infrarroja?

La termografía infrarroja en la banda de 890 nanómetros (NIR) se obtiene midiendo con un termómetro de radiación infrarroja la temperatura en varios puntos de la superficie exterior del silo bolsa, sin necesidad de “calar”. Posteriormente este numeroso conjunto de datos se procesa mediante un software desarrollado e integrado al sistema SiloWEB de la manera descrita en la sección anterior. La hipótesis enunciada al iniciar el ensayo es la siguiente: los valores de temperatura superficial del silo bolsa se producen como resultado de la temperatura exterior y del calor aportado por el material ensilado. Bajo las suposiciones realizadas en la sección anterior y las restricciones impuestas en el método de muestreo, consideramos que los mecanismos más significativos de transferencia de energía infrarroja fueron tenidos en cuenta. Entonces es posible usar esa información para detectar variaciones de temperatura en el interior del silo. Teniendo en cuenta que el sistema silo bolsa actúa transportando la humedad y también la temperatura dentro del silo es esperable que las variaciones de temperatura en el interior de la bolsa terminarán, luego de un período de tiempo relativamente corto, trasladándose hacia el exterior y finalmente detectándose en la superficie del silo. Para demostrar nuestra hipótesis desarrollamos el modelo computacional descrito a grandes trazos en la sección anterior. Analizamos un numeroso conjunto de datos reales teniendo en cuenta diversos factores tales como: variaciones diurnas y nocturnas de temperatura exterior, factores climáticos o externos como por ejemplo sombra de árboles próximos al silo bolsa, nubosidad presente en el momento de realizar las mediciones, rocío o escarcha depositados sobre la superficie de la bolsa. Debido a que se trata de un modelo descriptivo (i.e. muestra el estado del silo para el momento que se realizó el muestreo) nuestro ensayo validó de manera experimental su capacidad para describir posibles estados del material ensilado, e.g. el silo realizó su proceso de estacionamiento y llegó a valores estables como describe la bibliografía, e.g. el silo comenzó su proceso de estacionamiento mostrando más actividad en el estrato inferior que en el medio, e.g. el silo terminó su proceso de estacionamiento y comenzó a notarse un aumento de temperatura en el extremo abierto de la bolsa.

2.2 Lugar y Oportunidad del Ensayo.

El ensayo se desarrolló en la Planta de la empresa OLEAGINOSA MORENO HNOS. S.A. ubicada en la localidad de Daireaux desde el 1 de Abril de 2013 hasta el 14 de Junio del mismo año. El estado y avance del ensayo fue divulgado mediante

reuniones con profesionales de la empresa y publicaciones en el sitio www.siloweb.mibvc.com.ar.

3 Resultados Obtenidos

En las **Fig. 2 - Fig. 7** pueden observarse los resultados obtenidos durante el ensayo, Estas figuras permitieron comparar las mediciones de temperatura de los termómetros instalados en el interior de los silos A02, A03 y A05 con sus respectivas termografías infrarrojas (NIR). Las vistas de izquierda a derecha para cada termografía corresponden a las fechas 26/04, 22/05 y 14/06 respectivamente.

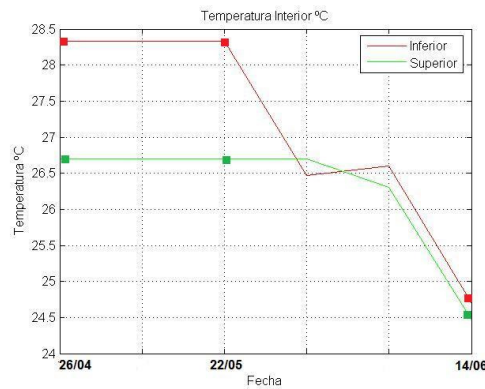


Fig. 2. Evolución de temperatura en silo A02

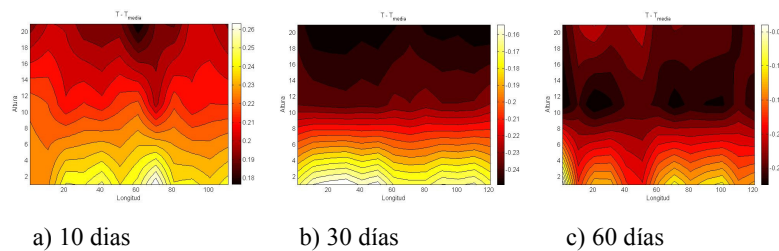


Fig. 3. Termografías NIR para silo A02.

Al continuación llamaremos estrato superior del silo bolsa a aquel ubicado a 120 cm del piso y estrato inferior al ubicado a 20 cm. Hacemos esta salvedad porque en la bibliografía consultada generalmente se denomina medio al estrato que aquí llamamos superior. La **Fig.2** muestra las temperaturas promedio obtenidas en el centro del silo A02 para los estratos superior e inferior respectivamente. Estas temperaturas se obtienen promediando las mediciones de los tres termómetros dispuestos dentro del silo. La termografía presentada en **Fig.3(a)** corresponde a los valores del principio del gráfico presentado en **Fig.2** (del día 26/04), La dispersión de valores que puede apreciarse en

el gráfico de colores a la derecha de **Fig 3(a)** muestra magnitudes en el rango (0.18 , 0.26) estos números no corresponden a temperaturas absolutas sino que resultan del proceso de normalización que elimina la influencia de temperatura exterior y permite independizar las mediciones de la temperatura exterior. Los colores están representados en una paleta Hot Standard de Matlab. La distribución de colores muestra que las temperaturas varían en todos los estratos del silo siendo estos resultados coherentes con el inicio del proceso de estabilización de temperatura dentro del silo, a los 10 días de confeccionado, ampliamente descrito en la bibliografía. Puede observarse que la temperatura inferior es mayor que la superior, siendo esta una apreciación que se verifica también en **Fig. 2**. La **Fig 3(b)** se corresponde con la medición del día 22/05 de **Fig 2.**, tomada a los 30 días de ensilado. Podemos ver que la dispersión toma valores en el rango (-0.16 , -0.24) y en términos absolutos no ha variado respecto de la anterior. Puede apreciarse una estratificación de temperatura resultando más caliente el estrato inferior, luego el medio y luego el superior. Estos resultados son coherentes con las descripciones de estratificación de temperatura presentadas en la bibliografía. La **Fig 3(c)** se corresponde con la medición del día 14/06 de **Fig.2**, tomada a los 60 días de ensilado. Podemos ver que la dispersión toma valores en el rango (-0.05 , -0.25). Se observan valores homogéneos con una estructura de estratificación de temperatura que todavía puede distinguirse claramente. La secuencia de imágenes presentada por **Fig.3(a)(b)(c)** puede asociarse con el comportamiento de un silo bolsa que va completando su proceso de estabilización sin inconvenientes.

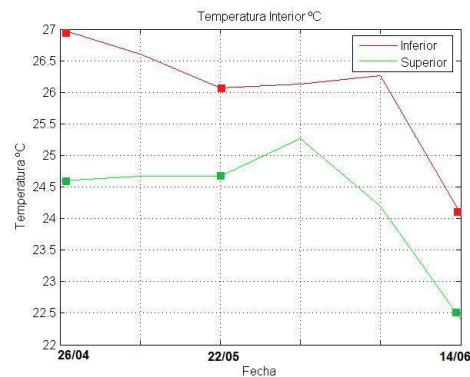
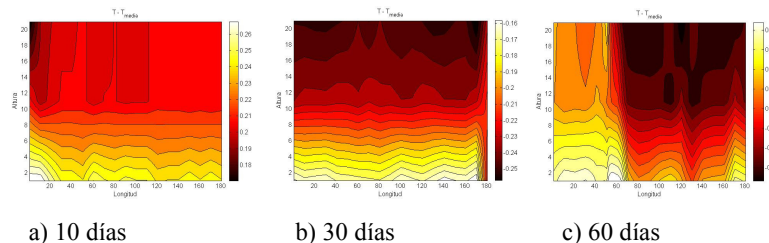


Fig. 4. Evolución de temperatura en silo A03



a) 10 días

b) 30 días

c) 60 días

Fig. 5. Termografía NIR para silo A03

En la **Fig 5(a)** vemos valores de dispersión en el rango (0.18 , 0.26) y en **Fig. 5(b)** dispersiones en el rango (-0.16, -0.25). Los comportamientos en relación a **Fig. 4** son similares a los descriptos para la **Fig. 3(a)** y **Fig. 3(b)**. En la **Fig. 5(c)** aumentan los valores de dispersión que se ubican en el rango (0.40, -0.30) y corresponden a la muestra con fecha 14/06 (60 días de ensilado) de **Fig. 4**. Atribuimos este aumento de dispersión a un incremento de temperatura en el extremo izquierdo del silo. Esta posición coincide con el extremo de la bolsa que quedó abierta luego confeccionar el silo y como se sabe es más propensa a tener problemas de ingreso de aire y humedad. Como puede verse en **Fig. 4** los termómetros ubicados en el centro del silo bolsa no registran directamente estos incrementos de temperatura aunque puede observarse que los valores de temperatura superior (22.5 C) e inferior (24°C) están mas distanciados que en la muestra del día 14/06 de la **Fig.2** (ambas 24.5°C). La secuencia de imágenes presentada en **Fig.5(a)(b)(c)** describe el comportamiento de un silo bolsa que desarrolló su proceso de estabilización presentando algunos inconvenientes en el extremo abierto de la bolsa a los 60 días de ensilado.

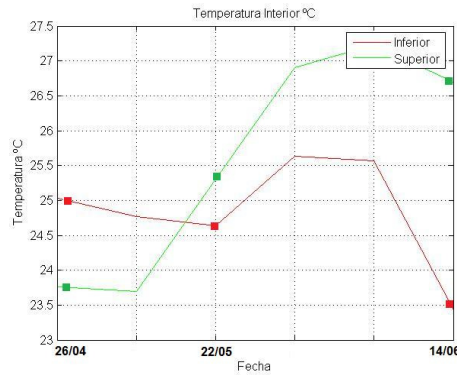


Fig. 6. Evolución de temperature in silo A05

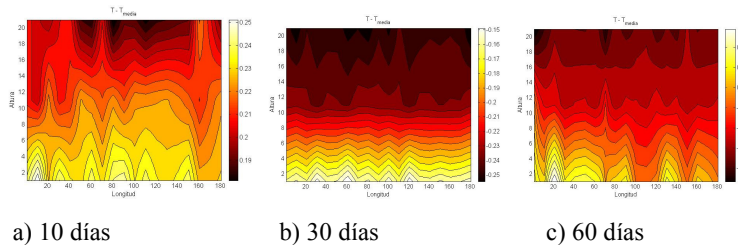


Fig. 7. Termografía NIR para silo A05

En la **Fig.7(a)** la dispersión toma valores en el rango (0.19 , 0.25) mientras que en **Fig.7(b)** toma valores en el rango (-0.15, -0.25) la comparación con **Fig.6** es similar a las anteriores. Vemos en **Fig.6** que la temperatura superior aumenta, de manera sostenida siendo este un comportamiento que no vimos antes en **Fig.2** ni tampoco en **Fig.4**. La **Fig.7(c)** presenta un incremento en la dispersión que se ubica en el rango

(0.20, -0.40) este aumento de la dispersión se debe a la diferencia que presenta el estrato inferior (23.5°C) con el estrato superior (26.5°C) del silo bolsa. En este caso también fué registrado por los termómetros en la muestra del día 14/06 (60 días de ensilado) de **Fig.6**.

La secuencia **Fig.7(a)(b)(c)** se asocia con el comportamiento de un silo bolsa que desarrolló su proceso de estabilización y demoró el inicio del proceso en la capa media del mismo. Puede verse en **Fig.7(a)** que la capa inferior presentó temperatura más altas al principio del proceso cuando se la compara con **Fig.3(a)** y **Fig.5(a)**. Este comportamiento podría explicarse considerando la competencia por O₂ dentro del silo y la lenta migración de aire a través del espacio inter-granario.

A continuación las **Fig. 8 a Fig. 11** muestran la evolución de temperatura observada mediante termografía infrarroja (NIR) para los silos A01, A06, A07 y A08. Al igual que en las figuras anteriores las vistas de izquierda a derecha, corresponden a las fechas 26/04, 22/05 y 14/06 respectivamente.

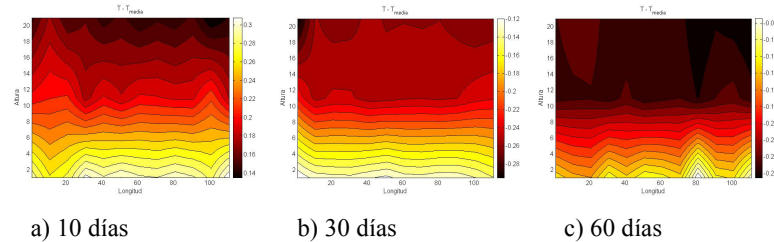


Fig. 8. Termografía NIR para silo A01.

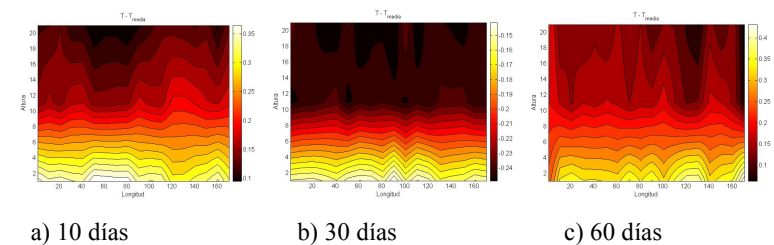


Fig. 9. Termografía NIR para silo A06.

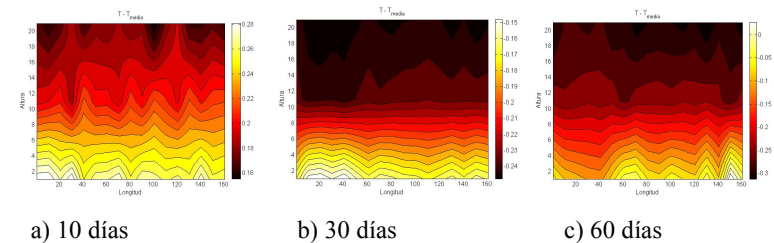


Fig. 10. Termografía NIR para silo A07.

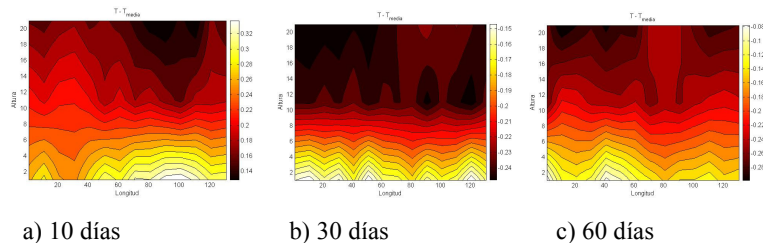


Fig. 11. Termografía NIR para silo A08.

4 Conclusiones

Al iniciar nuestro ensayo enunciamos una hipótesis. En ella decíamos que los valores de temperatura superficial del silo bolsa se producen como resultado de la temperatura exterior y del calor aportado por el material ensilado. Entonces, eliminado adecuadamente la influencia de la temperatura exterior, es posible usar esa información para detectar variaciones de temperatura en el interior del silo.

Para demostrar nuestra hipótesis desarrollamos el sistema computacional SiloWEB, los sensores y estaciones de telemetría con los cuales obtuvimos un numeroso conjunto de datos mediante trabajo de campo en diversas condiciones ambientales. Utilizando un termómetro de radiación IR aplicamos un método para medir la temperatura exterior en un lote de tamaño significativo de silos bolsa. Además construimos un modelo descriptivo (i.e. muestra el estado del silo para el momento que se realizó el muestreo) y validamos su capacidad para describir la evolución de la temperatura interna del silo bolsa. Evaluamos su capacidad para describir estados del material ensilado. Entonces pudimos asociar las imágenes computacionales de nuestro modelo con estados del silo bolsa que analizamos. Así pudimos describir un silo que realizó su proceso de estacionamiento y llegó a valores estables mostrando la estratificación de temperatura que describe la bibliografía referente de este tema. Analizamos otro silo bolsa que comenzó su proceso de estacionamiento mostrando más actividad en el estrato inferior que en el medio. Finalmente describimos, usando las imágenes computacionales, el comportamiento de un silo que terminó su proceso de estacionamiento y comenzó a mostrar un aumento de temperatura en el extremo abierto de la bolsa. También relacionamos comparativamente las mediciones de radiación IR en la superficie del silo con lecturas de termómetros ubicados en el interior de los tres silos bolsas analizados con más detalle.

Consideramos que los resultados obtenidos presentan una herramienta innovadora para analizar la evolución de temperatura en silos bolsas. En nuestra opinión, teniendo en cuenta el bajo impacto que tiene este método de medición sobre la bolsa plástica ya que no requiere calar deberíamos extender el estudio en trabajos futuros comprendiendo mayor cantidad de silos bolsas, períodos de almacenamiento más prolongados y

pruebas de laboratorio que permitan asociar cambios de temperatura indeseados con degradación del material ensilado.

Referencias

1. Cardoso, M.; Bartosik, R.E. y Rodríguez, J.C. 2007-a. Estudio de la evolución de la humedad de los granos individuales en silo-bolsas de maíz y soja. Proceedings del IX Congreso Argentino de Ingeniería Rural y I del MERCOSUR. 19-22 septiembre de 2007, Córdoba, Argentina.
2. Casini C., J.C.Rodríguez 2004, Almacenamiento de Granos. EEA Balcarce y EEA Manfredi. Informe de INTA.
3. Cardoso, M., Bartosik, R.E, y Rodríguez J.C. 2007-b, Portal Agrolluvia.com Monitoreo de la Calidad de Granos almacenados en SilosBolsa.
4. Bartosik, R.E., Rodríguez, J.C., Malinarich H., Cardozo, L (2009). Almacenamiento de Granos en Bolsas Plásticas ISSN 1667-9199 Capitulo.1 Trabajo 1, Pg. 7.
5. INTA- PRECOP II (2009). Almacenamiento de Granos en Bolsas Plásticas ISSN 1667-9199. Conclusiones Generales.
6. Pons J., Marinissen J., Pons C., Oriente S., Agosto 2009. Características higroscópicas de forrajes almacenados en Silos Bolsa”, Argentinean Symposium on Software Engineering. JAIIO/ASSE 2009. Mar del Plata. Argentina. ISSN 1666 1141.
7. Pons J., Pons C., Vaquero M. Noviembre 2010. Low cost wireless computer system for quality evaluation of grains stored in silobags. Congreso Mundial de Ingeniería 2010. Ciudad de Buenos Aires. Argentina.
8. Microsoft Research 2009. Proyecto LACCIR “Low cost computer based system for quality evaluation and preservation of grain stored in polymer bags”.