

ESTIMACION DEL CONSUMO ENERGETICO Y EMISION DE CO₂ EN EL SECADO DE SOJA EN LA PAMPA HUMEDA

R. Abalone^{1,2}, A. Gastón^{1,3}, R. Piacentini^{1,2}

¹Fac. de Cs. Exs., Ing. y Agrimensura. U. N. Rosario

²Instituto de Física Rosario (UNR - CONICET)

³Carrera de Investigador Científico. Universidad Nacional de Rosario

Tel: 0341-4495467 int. 33, e-mail: rabalone@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN: Se empleó un modelo de transferencia de calor y masa para estimar el consumo energético y la emisión de CO₂ en el secado de la producción de soja correspondiente a la zona núcleo de la Pampa Húmeda. Se consideró el secado convencional empleando gas natural, GLP, gasoil. Para el secado convencional de soja para preservación (desde 16 a 13.5 % bh) se obtuvo un consumo específico *C_{ee}* de 5.9 MJ/kg H₂O y un consumo eléctrico de 0.061 MJ/kg H₂O. Para el secado industrial (desde 13.5 to 11% bh) se obtuvieron 7.6 MJ/kg H₂O y 0.079 MJ/kg H₂O, respectivamente. La emisión total de CO₂ estimada para el secado convencional de 5.05 Mton para preservación y 40.95 Mton para procesamiento industrial resultó de 423.3 Mkg CO₂ en la campaña 2009/2010. La utilización del proceso de seca-aireación como alternativa para el secado para preservación permitiría reducir las emisiones de 49.8 Mkg CO₂ a 39.5 Mkg CO₂ con una eficiencia en la reducción global de aproximadamente 20.8%.

Palabras clave: secado, seca-aireación, consumo energético, emisión de CO₂.

INTRODUCCION

El secado de productos biológicos es un proceso industrial que requiere un alto consumo de energía. Por este motivo, la optimización de este proceso en cuanto a ahorro de energía, calidad final del producto y costos de secado ha sido un campo de intensa investigación (Raghavan et al., 2005). En este sentido, algunos desarrollos en el secado de granos son la seca-aireación, el secado a baja temperatura, el reemplazo de combustibles fósiles por energía solar o biomasa, la recirculación del aire servido de las secadoras, etc. (de Dios, 2000; Gunasekaran, 1986). Ligado al consumo energético intensivo, otro aspecto cada vez más relevante a nivel mundial es el impacto ambiental asociado con la emisión de los gases de efecto invernadero de estos procesos industriales.

En Argentina, son escasos los trabajos relacionados con el consumo energético en proceso de secado de granos (de la Torre y Bartosik, 2008; Donato, 2007). De la Torre (2009) realizó un estudio de la demanda energética para el secado de maíz con aire natural/baja temperatura en diez localidades agrícolas de Argentina. Gely y Giner (2002, 2001) realizaron un estudio comparativo de consumo energético y costos de secado de soja en el caso de secado convencional y seca aireación. Estos estudios no abordaron el análisis de impacto ambiental debido a la emisión de CO₂ involucrado en el secado de granos.

Existen diversos sistemas de secado de granos que, básicamente, consisten en forzar aire, con capacidad de extraer agua, a través de la masa de granos. En base a la temperatura de secado, se definen dos grupos principales: secado continuo a alta temperatura (AT) y secado estático con aire natural o baja temperatura (AN/BT). Debido a su alta capacidad de secado el primer tipo generalmente se instala en acopios, puertos o en la agroindustria mientras que el segundo, con baja capacidad de secado, generalmente se lo encuentra instalado a campo, integrado al sistema productivo del establecimiento agrícola. Ambos sistemas de secado consumen energía eléctrica para forzar el aire, y combustible para calentar el aire. En ambos casos la eficiencia energética depende del diseño de la secadora o silo secador, del tipo de grano, los puntos de humedad a remover y las condiciones climáticas.

En Argentina, la producción de soja tiene un alto valor económico. En la campaña 2009/2010 se cosecharon 54.6 Mton y la zona núcleo de la Pampa Húmeda contribuyó con 20.2 Mton, es decir con el 37.7% de la producción total (Gea, 2010). Del total de la producción nacional, aproximadamente el 25% se cosecha húmedo y luego se seca desde un contenido de humedad de 16% bh hasta 13.5% bh para su preservación y almacenamiento mientras que el 75% restante se seca desde 13.5% bh a 11% bh para su industrialización (de la Torre y Bartosik, 2008).

En este trabajo, por medio de la simulación computacional, se realizó una estimación del consumo energético y de la emisión de CO₂ debido al secado de soja en la zona núcleo de la Pampa húmeda, similar al presentado por Bern (1998) y Piacentini y Mujumdar (2009). Se consideró el secado convencional a alta temperatura y el proceso de seca-aireación así como el uso de combustibles fósiles y biodiesel.

MODELO MATEMATICO

Modelo matemático para una secadora de flujo cruzado

En el secado continuo a alta temperatura, el grano se fluye a través una columna por la que circula aire forzado. En las secadoras convencionales de flujo cruzado, el aire fluye en dirección perpendicular al grano. Generalmente 2/3 de la sección transversal se destinan a la zona de secado y el tercio restante se destina a la zona de enfriamiento. Finalizado el secado, el grano es transportado a los silos de almacenamiento. La Figura 1 muestra un esquema del proceso de secado en una secadora de flujo cruzado.

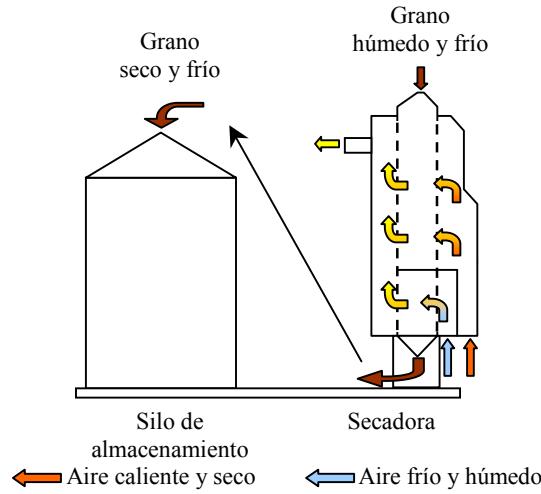


Figura 1: Secado convencional en una secadora de flujo cruzado.

En este trabajo se implementó el modelo presentado por Giner et al. (1996) para el balance de energía y masa entre el grano y el aire de secado. La solución de este sistema de ecuaciones permite determinar cómo varían la temperatura y contenido de humedad de los mismos a lo largo de la columna y el tiempo de residencia t_R de los granos en la secadora. A partir de estos resultados se calculan los parámetros de comportamiento de la secadora tales como el rendimiento y el consumo específico.

El caudal de materia seca \dot{m}_d , kg [materia seca]/s, y de grano húmedo \dot{m}_w , kg [grano húmedo]/s, se calculan mediante:

$$\dot{m}_d = \frac{\rho_{s0} (1 - \varepsilon_0) S Z}{t_R} \quad (1)$$

$$\dot{m}_w = (1 + M_0) \dot{m}_d \quad (2)$$

El consumo específico de energía C_{ee} , J/kg H₂O [agua evaporada], se define como el cociente entre la energía por unidad de tiempo recibida por el aire de secado y la velocidad de evaporación de agua en la secadora:

$$C_{ee} = \frac{G_{as} S_s (c_{pa} + c_{pv} \omega_a) (T_{as} - T_{amb})}{\dot{m}_d (M_0 - M_e)} \quad (3)$$

Despreciando las pérdidas al medio ambiente, el consumo de combustible \dot{q}_{fuel} , m³/s o lt/s, se calcula como la razón entre el calor recibido y el poder calorífico inferior del combustible PCI:

$$\dot{q}_{fuel} = \frac{G_{as} S_s (c_{pa} + c_{pv} \omega_a) (T_a - T_{amb})}{PCI} \quad (4)$$

y por kg de grano húmedo que circula por la secadora mediante:

$$q_{fuel} = \frac{\dot{q}_{fuel}}{\dot{m}_w} \quad (5)$$

La potencia eléctrica P_{elec} , W, para el funcionamiento de los ventiladores se evalúa mediante (Gely y Giner, 2002)

$$P_E = 3 \Delta p Z V S = 3 Z V S \frac{a V^2}{\ln(1 + b V)} \quad (6)$$

y por kg de grano húmedo que circula por la secadora mediante:

$$q_E = \frac{P_E}{\dot{m}_w} \quad (7)$$

Modelo matemático para seca-airación

La seca-airación es un proceso de secado alternativo, mediante el cual puede alcanzarse un ahorro energético entre el 20 y 40% e incrementos del 75% en el rendimiento de la secadora (Cloud y Morey, 1997). En este proceso, la sección completa de la secadora se emplea para el secado. El grano sale del equipo a una temperatura del orden de 50C y con un contenido de humedad alrededor de uno a dos puntos por encima del valor deseado (humedad de almacenamiento seguro) y se lo transfiere a un silo de enfriamiento. Allí, se deja reposar el grano aislado (tempering) para homogeneizar los gradientes internos, redistribuyéndose la humedad desde el interior hacia la superficie. Posteriormente comienza la etapa de aireación con aire ambiente impulsado a baja velocidad. El calor sensible acumulado durante el secado permite remover los puntos restantes de humedad completando el secado mientras el grano se enfría (enfriamiento evaporativo). Finalmente el grano se transfiere a un silo de almacenamiento. La Figura 2 ilustra el proceso de seca-airación.

Las ecuaciones de balance para una secadora convencional de flujo cruzado se aplicaron para el secado “todo calor” y se calculan los consumos de energía en este proceso. Para la etapa de aireación, las ecuaciones de balance se adaptaron para modelar el secado en un lecho fijo. Como resultado de la simulación se obtienen los perfiles de temperatura y humedad a través del lecho y el tiempo de aireación necesario hasta alcanzar la humedad de seguridad. Los cálculos de la energía eléctrica consumida se obtienen con una expresión similar a la Ec. (6).

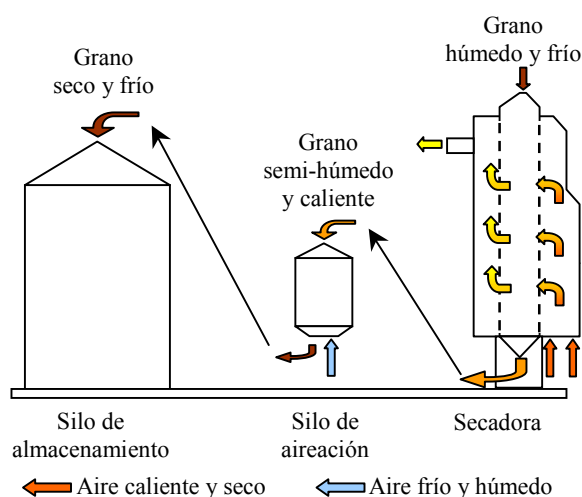


Figura 2: Seca-airación

Calculo de CO₂ emitido y eficiencia en la reducción de los procesos de secado

La emisión de CO₂ asociada a cualquier proceso es la suma de emisión directa debido a la energía usada en el proceso específico y la emisión indirecta debido a la energía empleada en la producción de electricidad, de combustible y de equipos relacionados con el proceso. En el presente trabajo se considera la emisión directa asociada al uso de combustible empleado para calentar el aire de la secadora y al consumo de energía eléctrica para el funcionamiento de los ventilares en el proceso de secado y seca-airación y de las norias para movilizar el grano:

$$m_{CO_2} = q_{fuel} \epsilon_f + q_E \epsilon_E \quad (1)$$

donde ϵ_f y ϵ_E son los coeficientes de conversión de masa de CO₂ por unidad de combustible fósil y de kWh consumidos, respectivamente. Los consumos específicos de combustible q_{fuel} y de electricidad q_E son provistos por los modelos de simulación mencionados previamente.

Si en un proceso industrial compuesto por una única etapa se introduce alguna modificación para reducir el consumo de energía, la emisión de CO₂ se reducirá en una cantidad:

$$\Delta m_{CO_2} = m_{CO_2} - m_{CO_2}^* \quad (2)$$

siendo m_{CO_2} y $m_{CO_2}^*$ las masas de CO₂ emitidas antes y después de la mejora, respectivamente. La eficiencia relativa η de esta reducción será:

$$\eta = \frac{m_{CO_2} - m_{CO_2}^*}{m_{CO_2}} \quad (3)$$

Cuando el proceso industrial se compone de varias etapas que contribuyen a la emisión de CO₂, la eficiencia global puede expresarse como la suma de las eficiencias de las etapas individuales η_i , pesadas por las fracciones de masa individuales β_i emitidas:

$$\eta_{global} = \frac{\sum m_{CO_2}^i - \sum m_{CO_2}^{*i}}{\sum m_{CO_2}^i} = \frac{\sum \eta_i m_{CO_2}^i}{\sum m_{CO_2}^i} = \sum \eta_i \left(\frac{m_{CO_2}^i}{m_{CO_2}^{total}} \right) = \sum \eta_i \beta_i \quad (4)$$

Esta expresión muestra claramente que se necesita un gran esfuerzo para cambiar cada η_i con el objetivo de aumentar la eficiencia global de la reducción del CO₂ del proceso. Si una de las etapas posee una eficiencia unitaria (máximo valor posible) pero su fracción de masa β_i es pequeña, esta mejoría en la reducción global tendrá escaso impacto global.

RESULTADOS OBTENIDOS

Se analizó el secado de soja húmeda desde 16% bh hasta 13.5% bh para su conservación en acopios y el secado de soja de 13.5% bh hasta 11% bh para su procesamiento industrial. Para caracterizar las condiciones climáticas de la región de la Pampa Húmeda durante la temporada de cosecha de soja, se promediaron los datos climáticos de temperatura y humedad relativa ambiente correspondientes a 10 años. Se supuso que el aire entra a la secadora a 18C y 80% y luego se calienta hasta una temperatura de secado de 60C, reduciendo su humedad relativa hasta aproximadamente 8%.

Se consideró una secadora genérica de flujo cruzado, donde 2/3 del total de la sección transversal corresponde a la sección de secado y 1/3 a la sección de enfriamiento. La sección transversal total se estableció igual a 30 m², la profundidad de lecho 0.30 m y el caudal específico de aire, 70 m³/min ton (Gely y Giner, 2002).

Para el proceso de seca-aireación se consideró un silo de base plana de 7 m de diámetro y 8 m de altura. El flujo de aire en la etapa de aireación fue de 0.5 m³/min ton. En esta etapa el grano se seca de 14.5% bh a 13.5% bh.

Consumo específico de energía y potencia eléctrica para el secado convencional

Para el secado convencional de soja desde 16 a 13.5 % bh se obtuvo un consumo específico *Cee* de 5.9 MJ/kg H₂O. A medida que el grano se seca se requiere más energía para evaporar el agua más fuertemente ligada, por lo cual para el secado industrial de soja desde 13.5 to 11% bh, *Cee* aumentó a 7.6 MJ/kg H₂O, lo que representa un incremento del 29%.

El consumo eléctrico total para el funcionamiento de los ventiladores en las etapas de secado y enfriamiento fue de 0.061 MJ/kg H₂O para el secado de soja para almacenamiento y de 0.079 MJ/kg H₂O para el procesamiento industrial.

Para movilizar el grano se consideró dos pasadas por una noria de 12.5HP de potencia y una capacidad de 50 ton/h, resultando un consumo de 0.373 kWh/ton.

Consumo de combustible y emisión de CO₂ en el secado convencional

Se determinó el consumo de gas natural, GLP, gasoil y biodiesel y las correspondientes emisiones de CO₂. La Tabla 1 resume el poder calorífico de cada combustible así como los factores de conversión de unidades de energía a kilogramos emitidos de CO₂ (UK National Energy Foundation, 2007). Estos factores de conversión no tienen en cuenta la energía necesaria para producir dicho combustible. En el caso de biodiesel, se asumió que no contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero ya que al ser quemado, la cantidad de CO₂ emitida es igual a la capturada inicialmente. De acuerdo a la Agencia Internacional de Energía (IEA), el factor de conversión para la energía eléctrica en Argentina es 0.352 kg CO₂/kWh (Sun Earth Tools, 2009).

Fuel	Poder calorífico PCI	Factor de Conversión
Gas Natural	34694 kJ/m ³	5.421 kgCO ₂ /therm
GLP	24578 kJ/lt	1.5 kgCO ₂ /lt
Gasoil	36383 kJ/lt	2.32 kgCO ₂ /lt
Biodiesel	37566 kJ/lt	0.0 kgCO ₂ /lt

Tabla 1: Poder calorífico y factores de conversión de combustibles

La Figura 3 muestra la cantidad total de CO₂ emitido debido al consumo de combustible y energía eléctrica total (ventiladores y 2 norias) para el secado de soja húmeda para conservación y para procesamiento industrial. El valor asignado al biodiesel muestra que la emisión relacionada con el consumo de energía eléctrica, única contribución para este combustible, resulta un orden de magnitud menor que la de los combustibles fósiles. La cantidad de CO₂ emitido fue de 9.1 kg CO₂/ton para gas natural, 10.7 kg CO₂ /ton para GLP, 11.2 kg CO₂ /ton para gasoil y 0.3 kg CO₂/ton para biodiesel. Las emisiones de GLP y gasoil resultaron un 18% y un 22% mayor que para gas natural. En el caso industrial, se obtuvo 11.4 kg CO₂ /ton para gas natural, 13.4 kg CO₂ /ton para LPG, 14.0 kg CO₂ /ton para gasoil y 0.35 kg CO₂ /ton para biodiesel, aumentando en un 25% la cantidad emitida respecto al secado para conservación.

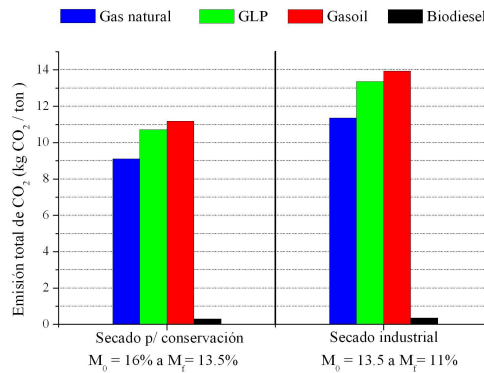


Figura 3: Comparación del CO₂ emitido empleando diferentes combustibles. Secado convencional

Finalmente, con estos valores se estima la cantidad total de CO₂ emitido en una campaña en la zona núcleo de la Pampa Húmeda. De una producción total de 54.6 Mton en la campaña 2009/2010, 20.2 Mton (37%) se producen en esta zona. El 25% del grano producido, 5.05 Mton, se cosecha húmedo a 16% bh y se seca hasta 13.5% bh. En los acopios, el 55% se seca empleando gas natural, el 37% GLP y el 8% gasoil, liberando 25.3, 20.0 y 4.5 Mkg of CO₂, respectivamente. En consecuencia el secado convencional aporta aproximadamente 49.8 Mkg de CO₂, de los cuales el 3% representa el aporte por consumo eléctrico.

El 75% de la producción nacional, 40.95 Mton, se seca desde 13.5 a 11% bh para procesamiento industrial. Se asumió que el total se seca en esta zona, donde se concentran las plantas con mayor capacidad de procesamiento a nivel mundial. En estas plantas, el 80% se seca con gas natural, liberándose 373 Mkg de CO₂. El 20% restante se seca empleando otras fuentes de energía (biomasa) o recuperación de valor y su aporte no será considerado en esta estimación (De la Torre y Bartosik, 2008).

La emisión total debido al secado de 5.05 Mton para conservación y 40.95 Mton para procesamiento industrial resultó 423.3 Mkg CO₂ en la campaña, lo que representa 9.2 Mkg CO₂/ Mton de grano secado. Este valor es comparable con datos sobre emisión de CO₂ debido al secado de maíz en el estado Iowa, USA, presentado por Bern (2002). Para una producción de 38.8 Mton de maíz estimaron una emisión de 915 Mkg de CO₂, es decir 23.6 Mkg CO₂/ Mton de grano secado. Esta diferencia se debe a que en ese trabajo incluyeron fuentes indirectas de energía y una emisión de 0.964 kg CO₂/kWh debido al consumo de electricidad, casi tres veces mayor que la considerada en este trabajo para Argentina.

Consumo de combustible y emisión de CO₂ en seca-aireación

La Figura 4 compara la evolución de la temperatura y contenido de humedad promedio a lo largo de una columna de una secadora de flujo cruzado empleada en modo convencional (secado+enfriamiento) y en modo “todo calor” para el secado de 16 a 13.5% bh (conservación). También se incluyen los resultados para el secado de 13.5 a 11% bh (industrial), modo convencional. Puede observarse que en el modo “todo calor” la temperatura promedio del grano a la salida de la secadora es aproximadamente 50C. La energía acumulada en el grano como calor sensible será utilizada para extraer el punto extra de humedad hasta el valor de almacenamiento seguro a través de un proceso de enfriamiento evaporativo en el silo de aireación.

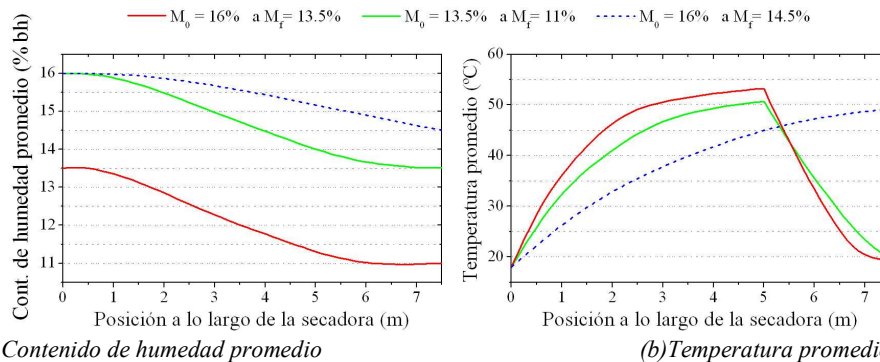


Figura 4: Comparación de la temperatura y humedad promedio a lo largo de la columna de una secadora trabajando en modo convencional y modo “todo calor”

Se calcularon los consumos específicos de combustible y de energía eléctrica para la etapa de secado “todo calor”, de energía eléctrica para la etapa de aireación y el consumo eléctrico de 3 norias, obteniéndose en total una producción de 7.2 kg CO₂/ton para gas natural, 8.5 kg CO₂/ton para GLP, 8.9 kg CO₂/ton para gasoil y 0.32 kg CO₂/ton para biodiesel. En la Figura 5 se comparan las emisiones totales de CO₂ para el secado convencional y seca-aireación para los cuatro combustibles.

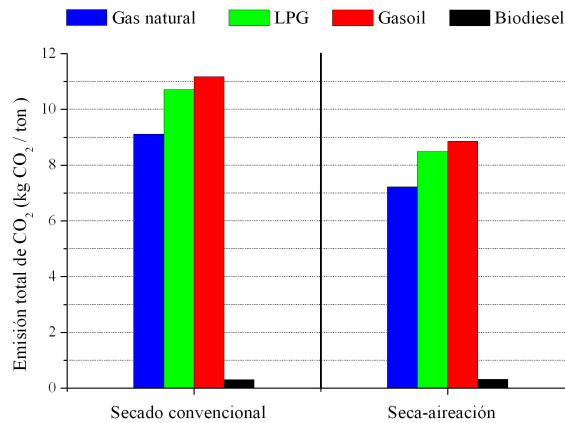


Figura 5: Comparación del CO₂ emitido en Secado convencional y Seca-aireación. Secado para conservación de 16% a 13.5%bh.

Eficiencia de la reducción en la emisión de CO₂

La utilización de biocombustibles y la seca-aireación son posibles estrategias para reducir la emisión de CO₂.

De la Torre (2010) demostró la factibilidad de adaptar a biodiesel las secadores diseñadas para funcionar con gasoil. Si el 8% del grano húmedo secado en los acopios con gasoil es secado con biodiesel, la eficiencia en la reducción de CO₂ en el secado de soja para conservación resulta (Ec. (4)):

$$\eta_{global} = \sum_i \eta_i \left(\frac{m_{CO_2}^i}{m_{CO_2}^{total}} \right) = \eta_{gasoil} \left(\frac{m_{CO_2}^{gasoil}}{m_{CO_2}^{total}} \right) = 0.973 \left(\frac{4.38}{49.8} \right) = 0.085$$

con $i = GN; GLP; Gasoil; E$. Las eficiencias individuales se calcularon con la Ec.(3) resultando η_{GN} , η_{GLP} y η_E nulas ya que no se propuso ninguna modificación.

A pesar de que actualmente el empleo de biocombustibles es un tema muy controvertido, en el más promisorio de los escenarios, si todos los combustibles fósiles fuesen reemplazados por biodiesel, la emisión disminuiría drásticamente de 423.3 a 20.0 Mkg CO₂, representando una reducción del 95.3 % en la emisión de CO₂.

En el proceso de seca-aireación, cuando una secadora se emplea en el modo “todo calor”, el consumo de combustible disminuye obteniéndose una eficiencia de la reducción de la emisión de CO₂ del 21.6%. Por otro lado aumenta el consumo eléctrico de todo el proceso (ventiladores de la secadora y silo de aireación, 3 norias) resultando una eficiencia en la reducción global η_{global} de aproximadamente 20.8%. Esto significa que los 49.8 Mkg de CO₂ emitido en el secado convencional para preservación de soja se reducirían a 39.5 Mkg de CO₂ en una campaña, si se adopta la metodología de seca-aireación.

CONCLUSIONES

Mediante el empleo de un modelo de simulación de secadoras, se estimó el consumo de energía y la cantidad de CO₂ emitido en el proceso de secado de la producción de soja en la zona núcleo de la Pampa Húmeda. Las conclusiones más importantes de este trabajo son:

En la campaña 2009/2010 se cosecharon en esta zona, 20.2 Mton, lo que representa el 37.7% de la producción total. De esta producción, el 25% se cosecha húmedo, en promedio a 16% bh y se seca para su preservación y almacenamiento hasta 13.5% bh. Por otro lado, el 75% de la producción nacional se seca desde 13.5% a 11% bh ya que en esta zona que concentra las plantas con mayor capacidad de procesamiento industrial a nivel mundial. Los volúmenes de granos involucrados muestran el impacto potencial que el secado de granos puede tener en la reducción de la cantidad de CO₂ emitida.

Para el secado convencional de soja para preservación (desde 16 a 13.5 % bh) se obtuvo un consumo específico C_{ee} de 5.9 MJ/kg H₂O y un consumo eléctrico de 0.061 MJ/kg H₂O. Para el secado industrial de soja (desde 13.5 to 11% bh) los consumos específicos resultaron 7.6 MJ/kg H₂O y 0.079 MJ/kg H₂O, respectivamente.

La emisión total de CO₂ estimada para el secado convencional para preservación resultó de 49.8 Mkg CO₂ y para procesamiento industrial de 373.5 Mkg CO₂, con un total de 423.3 Mkg CO₂ en la campaña 2009/2010. La utilización del proceso de seca-aireación para preservación permitiría reducir las emisiones hasta 39.5 Mkg CO₂ con una eficiencia en la reducción global η_{global} de aproximadamente 20.8%.

A pesar de que actualmente el empleo de biocombustibles es un tema muy controvertido, en el más promisorio de los escenarios, si todos los combustibles fósiles fuesen reemplazados por biodiesel, la emisión disminuiría drásticamente de 423.3 a 20.0 Mkg CO₂, representando una reducción del 95.3 % en la emisión de CO₂.

Las emisiones producidas por los combustibles fósiles muestran que el gas natural es el menos contaminante y debido a los fuertes subsidios gubernamentales también resulta el más conveniente desde el punto de vista económico. Sin embargo, si en un futuro próximo estas subvenciones se reducen o eliminan, el precio del gas natural podría ser comparable al de los otros combustibles fósiles. En consecuencia, "el combustible más conveniente para el secado" ya no sería "el que tiene menos impacto ambiental". Estos dos aspectos antagónicos deben ser cuidadosamente analizados a fin de llegar a una solución de compromiso.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica por el apoyo financiero otorgado (ANPCyT, PICT 2008-0460).

NOMENCLATURA

a, b	parámetros de la ecuación de caída de presión por unidad de longitud, $\text{Pa s}^2/\text{m}^3$, $(\text{m/s})^{-1}$	S	[grano húmedo] área total de la secadora, m^2
c_p	calor específico (J/kg K)	S_S	área de secado, m^2
C_{ee}	consumo específico de la secadora J/kg H ₂ O [agua evaporada]	T_{amb}	temperatura ambiente (C)
G_{as}	flujo de aire de secado, kg/m ² s	T_{as}	temperatura del aire de secado (C)
\dot{m}_d	caudal de grano seco, kg [grano seco]/s	V	velocidad del aires de secado, m/s
\dot{m}_w	caudal de grano húmedo, kg [grano húmedo]/s	Z	altura de lecho, m
m_{CO_2}	masa de CO ₂ emitida, kg CO ₂	Letras Griegas	
M_0	contenido de humedad inicial del grano (bh, kg H ₂ O / kg grano húmedo)	β	fracción de masa
M_e	contenido de humedad de equilibrio del grano (bh, kg H ₂ O / kg grano húmedo)	ΔP	caída de presión por unidad de longitud, Pa/m
P_{elec}	potencia eléctrica, W	ϵ_0	porosidad del lecho
PCI	poder calorífico interior, J/m ³ o J/lit	ϵ	coeficiente de conversión, kg CO ₂ /lit, kg CO ₂ /kWh
\dot{q}_{elec}	consumo de energía eléctrica, W	ρ_{so}	densidad de lecho seco, kg [grano seco]/m ³ [lecho]
q_{elec}	consumo específico de energía eléctrica, J/kg [grano húmedo]	η	eficiencia
\dot{q}_{fuel}	consumo de combustible en m ³ /s o lit/s	ω_a	humedad absoluta del aire de secado
q_{fuel}	consumo específico de combustible, m ³ o lit /kg	Subíndices	
		a	aire
		v	vapor
		E	eléctrico

REFERENCIAS

- Bern C. J. (1998). Preserving the Iowa Corn Crop: Energy Use and CO₂ Release. Applied Engineering in Agriculture, 14(3): 293-299.
- Cloud H. A. y Morey R. V. (1997). Dryeration and in-storage Cooling for Cor Drying. <http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/DC7356.html>.
- De la Torre D. A. y Bartosik R. (2008) ¿Cuánto combustible se consume en Argentina para secar granos?. Informe de Ingeniería Rural, E.E.A. Balcarce INTA. <http://www.inta.gov.ar/balcarce/info/indices/tematica/agric/posco/gral.htm>,
- De la Torre D. A. (2009). Estudio de la demanda energética del secado de maíz en Argentina. Tesis de Maestría, Facultad De Ciencias Agrarias, Universidad Nacional De Mar Del Plata.
- De Dios C. A. (2000). Secado de granos y secadoras. Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina.
- Donato L. B. (2007). Estimación del consumo potencial de gasoil para las tareas agrícolas, transporte y secado de granos en el sector agropecuario. Proc. Congreso Argentino de Ingeniería Rural, 1-10.
- GEA. Guía Estratégica para el Agro. (2010). Informes Especiales N° ESP015. <http://www.bcr.com.ar/Pages/Granos/GEA/>
- Gely M. C. y Giner S. A..(2002). Comparison of cost for soybean conventional drying and dryeration A computer simulation analysis. ASAE Meeting Presentation, paper No 026080 St Joseph, Mich: ASAE.
- Gely M. C. y Giner S. A. (2001). Effect of the air mass flow rate in soybean conventional drying and dryeration on the specific heat energy consumption. ENPROMER 2001, Vol III: 1615-1620.
- Giner S. A., Mascheroni R. H. y Nellist M. E. (1996). Cross-Flow Drying of Wheat. A Simulation program with a diffusion-based model and a kinetic equation for viability loss estimations. Drying Technology. 14 (7 y 8):1625-1671.
- Gunasekaran S. (1986). Optimal energy management in grain drying. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 25(1):1-48.
- IPCC/WGI (Intergovernmental Panel on Climate Change/Working Group I): The physical science basis. Cambridge University Press (2007) (also available at: www.ipcc.ch)
- IPCC/WGII (Intergovernmental Panel on Climate Change/Working Group II). Impacts, Adaptations and Vulnerability. Cambridge University Press (2007) (also available at: www.ipcc.ch)
- Piacentini R. D. y Mujumdar A. (2009). Climate change and its impact in industrial processes. Proc. Asian Drying Conference, Bangkok, Thailand, 1-3.
- Raghavan G. S. V., Rennie T. J., Sunjka P. S., Orsat V., Phaphuangwittayakul W.y Terdtoon P. (2005). Overview of new techniques for drying biological materials with emphasis on energy aspects. Brazilian Journal of Chemical Eng., 22(2):195-201.
- UK National Energy Foundation. Available at: <http://www.nef.org.uk/greencompany/co2calculator.htm> (Last access: 7 April

2009).

Sun Earth Tools. Herramientas para los consumidores y los diseñadores de la energía solar, www.sunearthtools.com/dp/tools

ABSTRACT. A heat and mass transfer model was used to estimate the energy consumption and the CO₂ emitted in the drying of soybean produced in the Humid Pampa region of Argentina. Conventional drying was simulated using natural gas, GLP and gas oil. For drying of wet soybean from 16 a 13.5 % bh for preservation and long term storage, calculated specific heat energy consumption was 5.9 MJ/kg H₂O and specific electric energy consumption was 0.061 MJ/kg H₂O. Drying from 13.5 to 11% bh for plant manufacturing involved 7.6 MJ/kg H₂O and 0.079 MJ/kg H₂O, respectively. Estimated total emission of CO₂ for drying 5.05 Mton for preservation and 40.95 Mton for plant manufacturing was Mkg CO₂ for the 2009/2010 campaign. If dryeration is used instead of conventional drying for drying from 16 a 13.5 % bh, emitted CO₂ reduced from 49.8 Mkg CO₂ to 39.5 Mkg CO₂, which represents a global efficiency of 20.8%.

Keywords: grain drying, fuel consumption, CO₂ emission