

Modelación de la mezcla grano- cáscara en una máquina limpiadora de higuera (*Ricinus communis* L.)

Pedro Cruz Meza¹
Gilberto de Jesús López Canteñas^{1§}
Samuel García Silva¹
Conrado Márquez Rosano¹
Eugenio Romanchik Kriuchkova¹
Omar Reséndiz Cantera¹

¹Universidad Autónoma Chapingo- Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5. Chapingo, Estado de México. CP 56230, México.

[§]Autor para correspondencia: alelopez10@hotmail.com.

Resumen

En la actualidad la limpieza de los granos por medio del vacío se está difundiendo, en el desarrollo de equipos agrícolas, debido a la ausencia de polvo en el área de trabajo. Un problema habitual es la acumulación del material en sectores conflictivos del sistema de limpieza, como en lugares de cambios bruscos de dirección o de sección en los tubos. En particular, resulta de especial interés, el componente que distribuye el flujo, dado que un correcto diseño debe asegurar una distribución homogénea del caudal del aire y el material, sin atascamientos (acumulaciones). El presente trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento de los granos y cáscaras de la higuera (*Ricinus communis* L.) en el sistema de limpieza mediante la técnica de la dinámica de fluidos computacional (CFD) y la trayectoria de la partícula en la salida del ventilador, para determinar la velocidad mínima adecuada. En la simulación se utilizaron los modelos k- ϵ y DPM (modelo de fase discreta) de ANSYS FLUENT. Un banco de prueba y una estructura metálica se construyó e instrumentó para comparar los resultados experimentales y los computacionales. La comparación de los resultados mostró una buena concordancia cualitativa y cuantitativa ($R^2= 82\%$) en el perfil de la velocidad. El promedio de la velocidad fue de 5.98 y 5.09 ms^{-1} para la estimada y experimental respectivamente. La desviación estándar fue de 1.85 y 1.63 ms^{-1} para la velocidad estimada y experimental respectivamente. Finalmente, el modelo de la trayectoria de la partícula predice adecuadamente la distribución del material en la salida del ventilador.

Palabras clave: CFD, limpieza de granos, trayectoria.

Recibido: enero de 2018

Aceptado: marzo de 2018

Introducción

En el estado de Oaxaca, México, el descascarado de las cápsulas de la higuierilla (*Ricinus communis* L.), se realiza de manera manual. Una etapa complementaria al descascarado, es la limpieza de los granos, realizada generalmente en el campo, mediante el venteado del aire. La limpieza efectuada manualmente ha mostrado ser un trabajo arduo y penoso, ya que requiere resistencia física y habilidad para su ejecución, además de perjudicar la salud, al contaminar el aire producto de este proceso (Ponpesh y Giles, 2009; Ponpesh *et al.*, 2010). En la actualidad la limpieza de los granos por medio del vacío se está difundiendo, en el desarrollo de equipos agrícolas, debido a la ausencia de polvo en el área de trabajo. Un problema habitual es la acumulación del material en sectores conflictivos del sistema de limpieza, como en lugares de cambios bruscos de dirección o de sección en los tubos.

En particular, resulta de especial interés, el componente que distribuye el flujo, dado que un correcto diseño debe asegurar una distribución homogénea del caudal del aire y el material, sin atascamientos (acumulaciones). Las máquinas utilizadas en el procesamiento de productos agrícolas en México, son en su mayoría diseñadas a partir de informaciones de productos importados, con características diferentes a las necesidades del agricultor. La construcción de las máquinas de limpieza de productos agrícolas, se desarrolla en su mayoría por métodos empíricos. En ese contexto, las técnicas de modelación y simulación han demostrado ser una herramienta de gran utilidad en el diseño, análisis, optimización y perfeccionamiento de máquinas agrícolas (Alves *et al.*, 2005).

El modelado en la dinámica de fluidos computacional (CFD) permite desarrollar y probar los prototipos de las máquinas cosechadoras, y obtener los parámetros esenciales de diseño en ingeniería sin la necesidad de construir el modelo físico, ya que se requiere más tiempo y es relativamente caro (Ponpesh y Giles, 2008). Por consiguiente, el modelado en CFD permite optimizar el diseño del sistema de limpieza de las cosechadoras, y del proceso físico de separación de las partículas en la corriente de aire.

El modelado en CFD ha sido aplicado con éxito en numerosos casos. Algunas de las aplicaciones agrícolas son: el modelado del arrastre de la pulverización (Teske *et al.*, 2011), el diseño de pulverizadores aéreos (Herrera *et al.*, 2006; Herrera *et al.*, 2010), el sistema de limpieza de cosechadoras de granos (Gebrehiwot *et al.*, 2010 a; Gebrehiwot *et al.*, 2010 b; Du *et al.*, 2013; Ni *et al.*, 2013), sistema de recogida y limpieza de las cosechadoras de nuez (Ponpesh y Giles, 2008; Ponpesh y Giles, 2009; Ponpesh *et al.*, 2011 a; Ponpesh *et al.*, 2011 b), el sistema de recogida y limpieza de las cosechadoras de café (Alves *et al.*, 2005; Magalhães *et al.*, 2006 a; Magalhães *et al.*, 2006 b), en ciclones (Corrêa *et al.*, 2004; Cernecky y Plandorova, 2013), el diseño de sistemas de ventilación de construcciones agropecuarias (Sun *et al.*, 2004), entre otras. Sin embargo, no se ha reportado el uso en el diseño de máquinas descascaradoras de higuierilla.

El flujo turbulento puede ser modelado por medio del uso de diferentes modelos, que buscan encontrar los mejores resultados y que han sido usados en varios trabajos conducidos en el desarrollo de equipos agrícolas. Entre los modelos disponibles, Reynolds averaged Navier-Stokes equation (RANS) y large-eddy simulation (LES) son los más comunes. A pesar de la

confiabilidad, los modelos LES exigen mucho tiempo para resolución; por lo tanto, ellos son raramente usados, a no ser que se requiera de una grande precisión. Por otro lado, los modelos RANS requieren menos tiempo de computación, pero algunas situaciones presentan problemas de falta de precisión. Así, los modelos RANS tales como el standard k- , two equation k- , realizable k- , renormalization group (RNG) k- y Reynolds stress model (RMS) son los más utilizados para simulación de procesos de flujo turbulento.

El presente estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento de los granos y cáscaras de la higuera (*Ricinus communis* L.) en el sistema de limpieza mediante la técnica de CFD y la trayectoria de la partícula (cáscara) en la salida del ventilador, para determinar la velocidad mínima adecuada de la máquina descascaradora.

Materiales y métodos

En el Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA) de la Universidad Autónoma Chapingo, se diseñó y construyó un prototipo de máquina descascaradora de higuera en éste se realizaron los muestreos en el sistema de limpieza a la entrada y salida del centro del ducto y además a la salida del ventilador del caudal y la velocidad del aire, utilizando un anemómetro de hilo caliente marca Lutron modelo YK-2005 AH.

Metodología de la dinámica de fluidos computacional

Objeto de estudio. La simulación computacional se realizó con base en la información obtenida del sistema de limpieza de un prototipo de máquina descascaradora de higuera desarrollada en el posgrado de IAUIA. En la Figura 1 se muestra el ducto del sistema de limpieza de la máquina descascaradora (M D). Las dimensiones del ducto con respecto al ventilador son 0.152 y 0.1 m de diámetro mayor y menor respectivamente y longitud total de 1.94 m (tramo 1 horizontal 0.2 m, tramo 2 horizontal 0.26 m, tramo 3 vertical 0.58 m, tramo 4 horizontal 0.46 m y tramo 5 vertical 0.44 m). La caja del vacío tiene una anchura de 0.51 m y longitud de 0.515 m. La altura de la caja en la parte frontal y posterior tiene 0.375 y 0.17 m respectivamente.

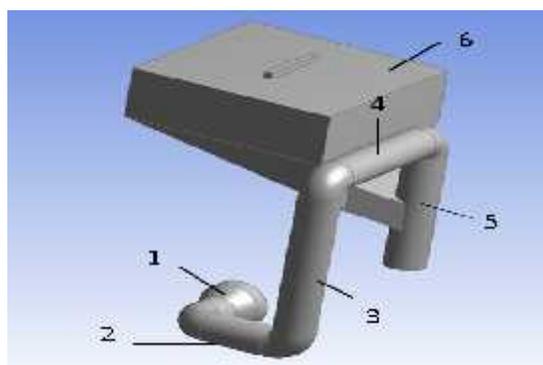


Figura 1. Sistema de limpieza de la máquina descascaradora de higuera. Los componentes son: 1- tramo horizontal 1, 2- tramo horizontal 2, 3- tramo vertical 3, 4- tramo horizontal 4, 5- tramo vertical 5, 6- caja de vacío.

Mientras que el colector de cáscara tiene en la sección trapezoidal transversal una altura de 0.52 m, en la base menor y mayor 0.5 y 1.1 m respectivamente. El colector tiene una longitud total de 4 m; las dimensiones de la salida del ventilador son de 0.16 x 0.16 m x 0.305 m de longitud. La altura en el centro de la salida del aire y la cáscara se ubica a 0.335 m con respecto a la base menor del trapecio del colector.

Geometría y mallado

Los dibujos 3D se realizaron en el Design Modeler de Ansys Fluent 14. Para ello con la finalidad de optimizar el uso de recursos informáticos y debido a la simetría se construye y modela la mitad del sistema de limpieza de la M D (Figura 1) y otro de la salida del material en el ventilador, para el análisis de la trayectoria de la cáscara. El mallado del ducto de limpieza y del colector de las cáscaras se realizó, con un tamaño del centro de relevancia fino, utilizando la función de tamaño avanzado en las curvaturas y un suavizado alto, así como el uso automático de la inflación por el programa controlado.

En cuanto a la discretización del dominio se utilizó una malla no estructurada de 434 215 elementos tetraédricos y 87 318 nodos. Para el sistema de limpieza se establecieron dos entradas, una para el fluido (aire) y otra para el material (cáscaras y granos), así como la salida y las paredes del modelo. Mientras que para el modelo de la trayectoria de la cáscara se definió una sola entrada para el aire y el material, la salida, las paredes y la simetría.

Modelos matemáticos

Modelo del flujo del gas. Para la simulación primeramente se seleccionaron los modelos de la ecuación de la energía y el viscoso $k - \epsilon$ realizables con un tratamiento mejorado de la pared.

Modelo del flujo de las partículas. El modelo de fase discreta (DPM) de sus siglas en inglés se seleccionó, para el análisis de la trayectoria de los granos y cáscaras, el cual utiliza el enfoque de Lagrange. La mezcla aire-grano-cáscara se analizó como un flujo en la fase diluida, menor de 10% de sólidos en el volumen del material. El tipo de partícula seleccionada en el modelo DPM fue la inerte y se inyectó en la superficie, de la entrada superior de la caja de vacío. El modo de paso aleatorio discreto se seleccionó para la trayectoria estocástica de la distribución de los diámetros del material. El modelado de los materiales granulares y en polvo se realizó a través de la distribución del tamaño de las partículas. En este caso se seleccionó la función de Rosin-Rammler para la simulación computacional.

Condiciones de contorno. Todas las condiciones de contorno impuestas se basaron en mediciones realizadas directamente sobre el objeto de estudio. Las propiedades principales del aire utilizadas en la simulación se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Propiedades principales del aire para la simulación computacional.

Propiedades	Valor
Densidad, kgm^{-3}	1.225
Calor específico, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1006.43
Conductividad térmica, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.0242
Viscosidad dinámica, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$	1.7894×10^{-5}

En los Cuadros 2 y 3, se muestran las condiciones iniciales y de frontera utilizadas en la simulación para el modelo viscoso k- .

Cuadro 2. Condiciones de frontera para el modelo k- del sistema de limpieza de la descascaradora de higuera.

Parámetro	Entrada 1	Entrada 2	Salida
Velocidad, ms^{-1}	6	1	
Presión, Pa	0	0	0
Intensidad del flujo o reflujo turbulento, %	10	10	10
Diámetro hidráulico, m	0.1	0.036	0.152

Cuadro 3. Condiciones de frontera del modelo k- para la trayectoria de la cáscara de higuera.

Parámetro	Entrada	Salida
Velocidad, ms^{-1}	6	
Presión, Pa	0	0
Intensidad del flujo o reflujo turbulento, (%)	10	10
Diámetro hidráulico, m	0.16	0.59

En los Cuadros 4 y 5 se muestran las principales propiedades del material a limpiar en la simulación del modelo DPM. Las condiciones de contorno o de frontera de la fase discreta se aplican a los límites físicos con el fin de determinar el destino de las trayectorias de las partículas en el ducto y en el colector de la cáscara de la higuera. Para la entrada y la salida se seleccionó la opción escape, mientras que para todas las paredes y la colectora reflejar y atrapar respectivamente.

Cuadro 4. Propiedades para el grano y la cáscara de la higuera para el modelo DPM del sistema de limpieza.

Parámetro	Grano	Cáscara
Velocidad, ms^{-1}	1	1
Flujo másico, kgs^{-1}	0.00825	0.00675
Densidad, kgm^{-3}	556	125
Calor específico (C_p), kJ/kg K	3.32	3.32
Dimensión mínima (D_{gmin}), mm	5	4.5
Dimensión máxima (D_{gmax}), mm	20	25
Dimensión promedio (D_{gprom}), mm	14	18
Número de diámetros	30	30

Cuadro 5. Propiedades para la cáscara de la higuera para el modelo DPM de la trayectoria de la partícula.

Parámetro	Cáscara
Velocidad, ms^{-1}	6
Flujo másico, kgs^{-1}	0.00675
Densidad, kgm^{-3}	125
Calor específico (C_p), kJ/kg K	3.32
Dimensión mínima (D_{gmin}), mm	2.25
Dimensión máxima (D_{gmax}), mm	12.5
Dimensión promedio (D_{gprom}), mm	9
Número de diámetros	30

Solución numérica

La solución numérica se realizó utilizando un solucionador separado y se linealiza mediante el esquema implícito. Además, debido a que en el sistema a analizar no existen estructuras móviles o mallas deslizantes se utilizó la formulación de la velocidad absoluta.

Con la finalidad de reducir el tiempo de convergencia de la simulación transitoria. La simulación en CFD se inició bajo condiciones estacionarias para simplificar y ahorrar recursos computacionales. Para derivar las variables del centroide de las caras de las celdas vecinas se utilizó el promedio en la celda de Green-Gauss. El método de acoplamiento de la presión-velocidad se usó para calcular la presión a partir de las ecuaciones del momento y la ecuación de continuidad; a través, de un método semi-implícito del algoritmo de las ecuaciones relacionadas con la presión (SIMPLE). Además, de la discretización de la presión mediante el algoritmo estándar (es decir, la interpolación de la presión para los valores de la cara); de otras variables dependientes (por ejemplo, momento, energía cinética de turbulencia, la tasa de disipación turbulenta y el esfuerzo de Reynolds) se calcularon usando el esquema de segundo orden upwind.

Análisis experimental del modelo

Para comparar los resultados estimados por el modelo de CFD, contra las mediciones experimentales, se construyó un banco de prueba para el sistema de limpieza y una estructura de sección trapezoidal invertida (Figura 2) para colectar la cáscara a la salida del ventilador. En la parte inferior se colocaron 16 bolsas de polietileno para colectar la cáscara y los granos.



Figura 2. Banco de prueba del sistema de limpieza y estructura para la colecta de la cáscara.
Validación de la velocidad del aire.

La velocidad se midió en diferentes localizaciones del ducto, la cámara de separación y la caja de vacío (Figura 3). Para ello se utilizaron tubos de Pitot de 5 mm de diámetro de cobre conectado a un manómetro “U” diferencial que utiliza alcohol como líquido manométrico, obteniéndose la presión dinámica para cada punto. Además, se utilizó un anemómetro de hilo caliente marca Lutron modelo YK-2005 AH para verificar la velocidad del aire en el ducto. El ventilador del banco de prueba y los rodillos del alimentador se calibraron a 1 500 y 86 rpm respectivamente, mediante un tacómetro marca Lutron modelo DT 2230. El ventilador se accionó a través de un motor trifásico de 3 hp marca ABB y la velocidad se ajustó mediante el variador de frecuencia marca Danfoss modelo VLT.

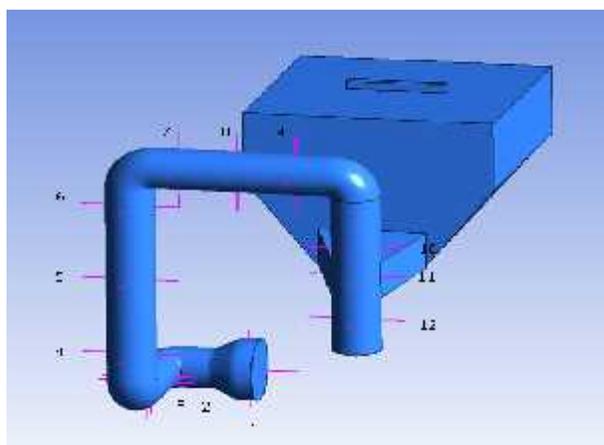


Figura 3. Puntos de lectura de la presión dinámica.

Las impurezas de las cápsulas de higuera fueron separadas manualmente y descascaradas en un prototipo descascarador diseñado y construido en el Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. El ensayo consistió de una muestra de 3 kg de granos y cáscaras de higuera con tres repeticiones.

La velocidad del aire de las diferentes localizaciones del ducto (Figura 3) se calculó mediante la siguiente expresión.

$$v = \left(\frac{\rho_m}{\rho_a} 2gh \right)^{1/2} \quad (1)$$

Donde: v - velocidad del aire, ms^{-1} ; ρ_m - densidad del líquido manométrico, kgm^{-3} ; ρ_a - densidad del aire, kgm^{-3} ; g - aceleración de la gravedad, ms^{-2} ; y h - altura manométrica o presión, Pa.

Validación del flujo de partículas

La estructura para la colección de la cáscara de higuera se colocó a la salida del ventilador. La muestra de las cáscaras colectadas en cada bolsa se separó mediante un juego de tamices de 12.7, 11.11, 9.53, 7.94 y 6.35 mm, con la finalidad de clasificar y cuantificar las partículas del volumen analizado, en fracciones separadas, acorde a sus dimensiones. El volumen total y las fracciones de partículas retenidas en cada tamiz se pesaron y cuantificaron el porcentaje en peso del material objeto de estudio. Los datos experimentales obtenidos fueron procesados estadísticamente en el paquete profesional de Microsoft Excel 2010 realizando el análisis descriptivo de la muestra, el análisis de varianza simple mediante una prueba t de Student para muestras apareadas.

Resultados y discusión

Campo de flujo del aire

El campo de velocidades del aire, se obtuvo con los modelos numéricos antes descriptos considerando el grano y la cáscara de la higuera (Figura 4).

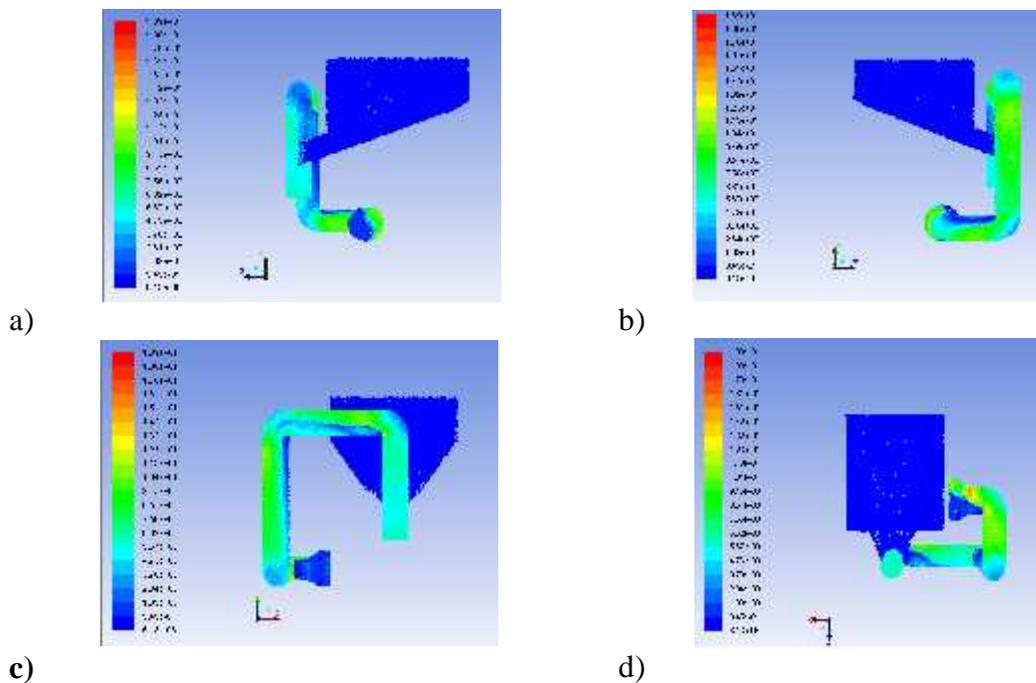


Figura 4. Vector de la velocidad. a) V. derecha; b) V. izquierda; c) V. frontal; y d) V. inferior. La Figura 4 muestra las diferentes vistas del diagrama vectorial de la velocidad del flujo de aire en el sistema de limpieza, que está coloreado por la magnitud de ésta. La velocidad

alcanzó un máximo de 18.9 ms^{-1} del flujo de aire en el reductor y el codo del tramo 1 y un mínimo de $6.13 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ en la caja de vacío.

La magnitud de las velocidades obtenidas, presentan una considerable congruencia con los reportados previamente por Alves *et al.* (2005); Magalhães *et al.* (2006 a); Ponpesh *et al.* (2011a) para una máquina recogedora de café y cosechadora de nueces respectivamente.

En la Figura 5 se muestra la comparación de la velocidad estimada por el modelo y el experimental, en los diferentes puntos del ducto de limpieza de la máquina descascaradora de higuera. Mientras que en la Figura 6, se muestra una buena correlación ($R^2 = 82\%$) entre los datos estimados de la velocidad y los experimentales. El error estándar es de 0.8176. La media fue de 5.98 y 5.09 ms^{-1} para la velocidad estimada y experimental respectivamente. La desviación estándar fue de 1.85 y 1.63 ms^{-1} para la velocidad estimada y experimental respectivamente.

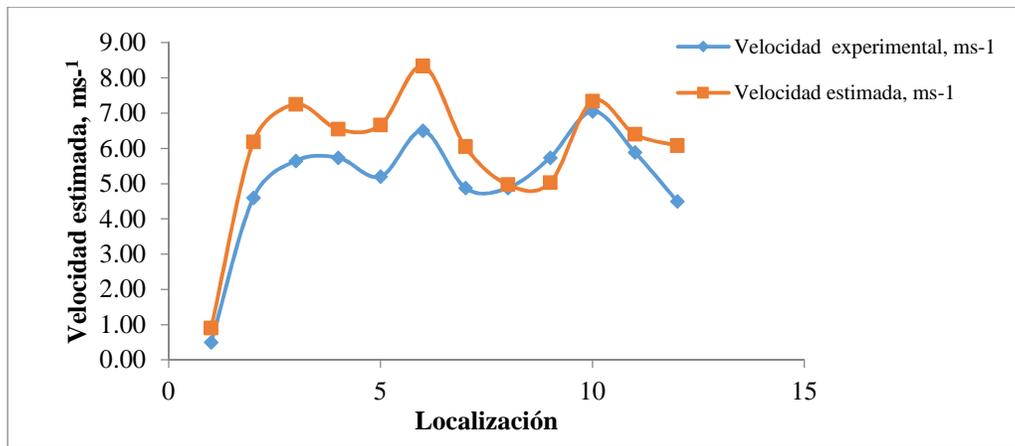


Figura 5. Comparación de la velocidad estimada por el modelo k-épsilon realizable y datos experimentales.

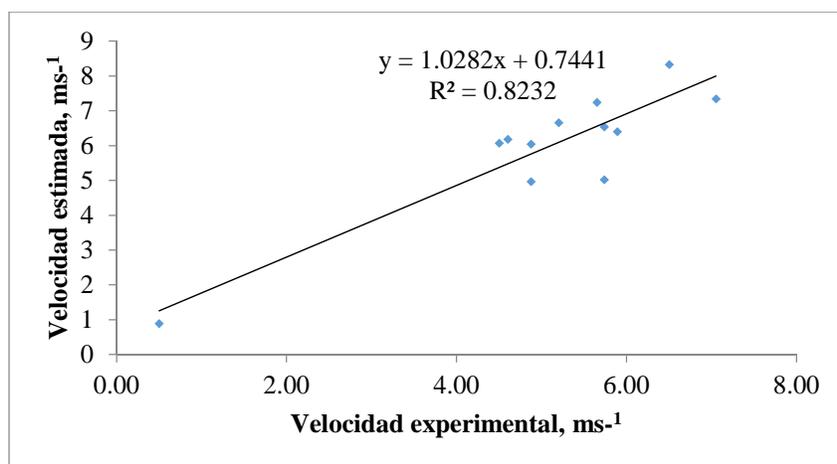


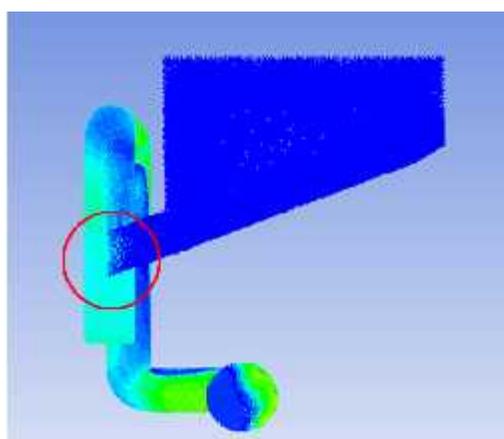
Figura 6. Velocidad estimada vs experimental para la limpiadora de granos de higuera.

Cuando las medias de la velocidad estimada y medida se compararon estadísticamente, con una prueba “t” reveló que no hubo diferencia significativa entre estas al nivel de significancia de 5% (Cuadro 6).

Cuadro 6. Parámetros de validación del modelo de CFD con los datos experimentales de la limpiadora de higuera en el nivel de significación p 0.05.

Modelo	Parámetros de validación			Significancia
	Valor de R^2	Valor calculado “ t_0 ”	Valor “t” de tablas	
Velocidad	0.82	1.245	2.074	No significativa

En el experimento y en la simulación se observó que existe acumulación del material a limpiar en la entrada de la cámara de separación (Figura 7) por lo cual es necesario aumentar el ángulo de talud de la caja de vacío o tolva de la cámara de descascarado, para la construcción del nuevo prototipo.



a)



b)

Figura 7. Detalle de la acumulación del material en la entrada al ducto de limpieza principal. a) modelo CFD; y b) experimento.

En la práctica se comprobó que el problema es crítico si el equipo es accionado por un motor eléctrico, en el caso de uno de combustión interna no lo es, debido a la vibración que produce éste.

Según Olaoye (2000) y Cruz *et al.* (2012) para superficies metálicas el ángulo de reposo de la cámara de separación deberá estar comprendido entre 22 y 25°, para evitar que se obstruya el flujo de la mezcla grano-cáscara.

Trayectoria de la partícula de la cáscara

La Figura 8 muestra el diagrama del contorno de la velocidad del flujo de aire y la cáscara a la salida del sistema de limpieza, que está coloreado por la magnitud de ésta. La velocidad del flujo de aire alcanzó un máximo de 6.34 ms^{-1} en la salida del ventilador, y un mínimo de 0 ms^{-1} al final y en las paredes del colector de cáscaras. En la modelación se establecieron las siguientes suposiciones: 1) todas las partículas fueron modeladas como esferas equivalentes;

2) no existe interacción entre partículas; 3) no existe transferencia de calor ni de masa entre las partículas y el aire.

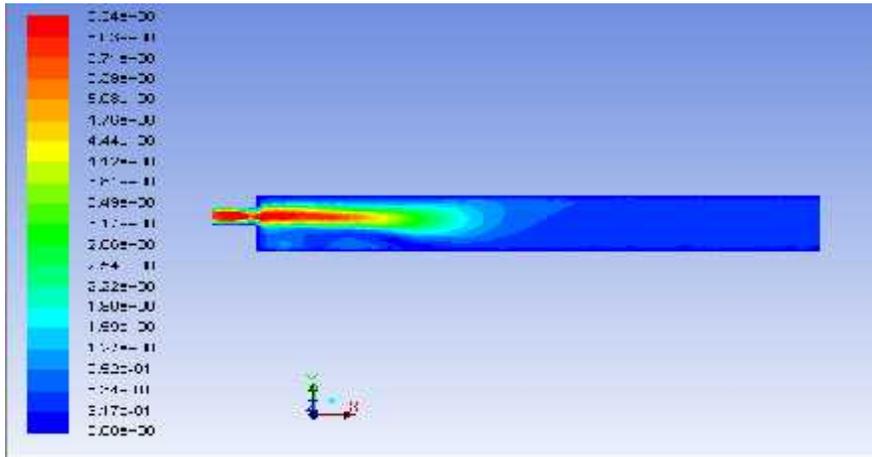


Figura 8. Contorno de la velocidad de la partícula (cáscara).

Las dimensiones de la cáscara de la simulación del flujo de la velocidad son la mitad de la trayectoria de la partícula, ya que se asume que éstas se trituran al pasar a través de los álabes del ventilador. La Figura 9 muestra la distribución del perfil de la velocidad del aire y las cáscaras a una altura $Y = 0.335$ m, a lo largo de la longitud del colector. La velocidad alcanzó un máximo de 6 ms^{-1} y un mínimo de 0.8 ms^{-1} . Las partículas se depositan a una distancia máxima de 1.5 m con respecto a la salida del ventilador. La longitud a la cual se lanzan las cáscaras es adecuada, puesto que a determinado intervalo de tiempo la máquina se tiene que mover a una nueva estación para descascarar las cápsulas de higuera o bien para limpiar el área de trabajo.

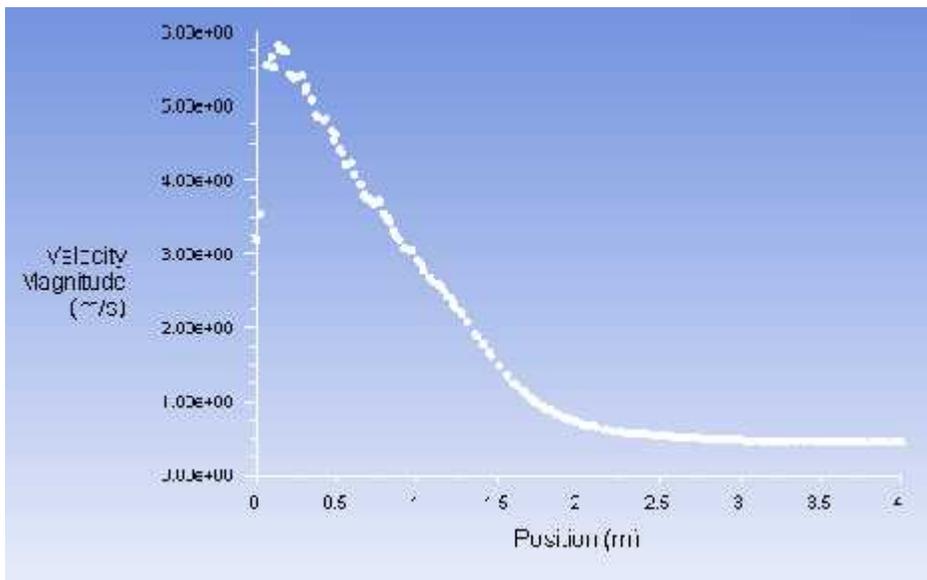


Figura 9. Distribución de la velocidad del aire y las cáscaras a lo largo de la longitud del colector.

En la Figura 10, se muestra la trayectoria de las partículas a la salida del ventilador en función del diámetro, la mayoría de éstas de diferentes tamaños caen a una distancia comprendida entre 0.75 - 1.5 m.

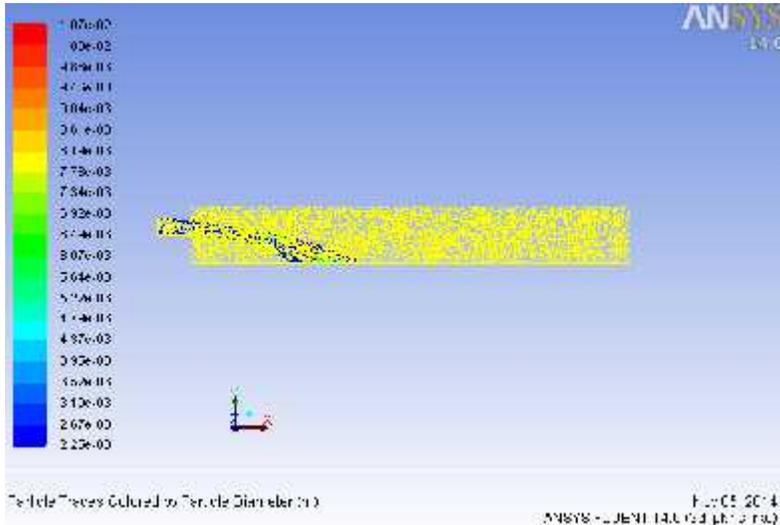


Figura 10. Trayectoria simulada de la cáscara a la salida del sistema de limpieza.

Otras partículas se mantienen en suspensión en la atmosfera. El equipo se debe orientar en sentido contrario a la dirección en que sopla el aire para lograr mayor calidad en la limpieza del grano y área de trabajo limpia.

La Figura 11 muestra el porcentaje en peso de las partículas colectadas experimentalmente en función del diámetro de éstas. En las longitudes de 0.5, 0.75, 1, 1.25 y 1.5 m se distribuye 9.92, 33.21, 22.98, 15.14 y 7.17% del porcentaje en peso de las partículas. En la dimensión de 0.75 m se encuentran distribuidas los tamaños de 12.7, 11.11, 9.53 y 7.94 mm de las cáscaras en los porcentajes en peso de 45.78, 29.35, 40.70 y 33.82% respectivamente. Mientras que en la longitud de 1 m se encuentran distribuidas las dimensiones de 6.35 y menor a 6.35 mm de las partículas en los porcentajes en peso de 30.93 y 29.12%.

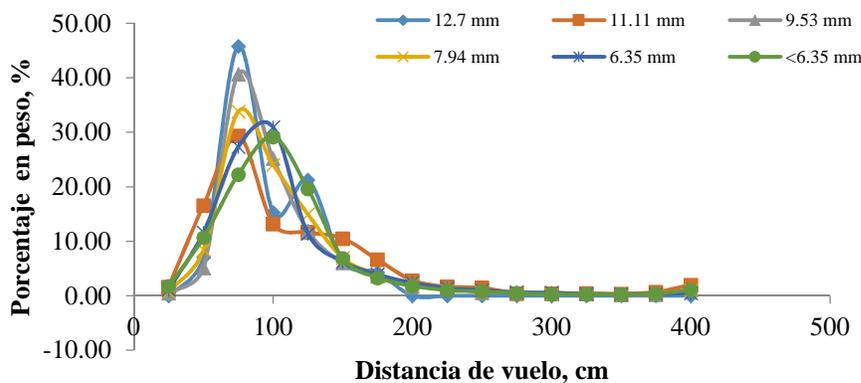


Figura 11. Eficiencia de colección y distancia de vuelo de la cáscara lanzada por el ventilador.

Los resultados obtenidos de la simulación computacional y experimental del modelo de transporte de partículas no concuerdan con los reportados por Bourges *et al.* (2014) para el cabezal de una máquina sembradora de semillas de soya debido a que el material está confinado en una cámara.

Conclusiones

La comparación de los resultados experimentales y computacionales mostró una buena concordancia cualitativa y cuantitativa en el perfil de la velocidad. El modelo de la trayectoria de la partícula predice adecuadamente la distribución del material a lo largo del colector de las cáscaras de higuierilla. Se puede concluir que la simulación numérica en CFD utilizando ANSYS FLUENT, puede predecir correctamente el patrón del flujo cuantitativo y es un método alternativo para el estudio de la separación y limpieza de los materiales biológicos para la mejora de los parámetros de operación y de diseño de los equipos agrícolas.

Literatura citada

- Alves, C. M.; Marcal, Q. D.; Roberto, C. P. y Leyva, R. L. Z. 2005. Desarrollo y modelación de una máquina de pre-limpieza de café en el cultivo de montaña. *Rev. Cienc. Téc. Agropec.* 14(2):1-13.
- Bourges, G.; Eliach, J. y Medina, M. 2014. Comparación entre resultados experimentales y numéricos en un cabezal distribuidor de sembradora “air drill”. *Mecánica Computacional.* 33:2555-2563.
- Cernecky, J. and Plandorova, K. 2013. The effect of the introduction of an exit tube on the separation efficiency in a cyclone. *Braz. J. Chem. Eng.* 30(3):627-641.
- Corrêa, J. L. G; Graminho, D. R.; Silva, M. A. and Nebra, S. A. 2004. The cyclonic dryer - a numerical and experimental analysis of the influence of geometry on average particle residence time. *Braz. J. Chem. Eng.* 21(1):103 - 112.
- Cruz, Meza. P.; García, S. S.; Márquez, Rosano. C. y López, C. G. 2012. Determinación de las propiedades físico-mecánicas para el descascarado de las cápsulas de la higuierilla (*Ricinus communis* L.). *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* (4):644-649.
- Wu, C. and Zhao, Y. 2013. Numerical simulation and experiment of gas-solid two-phase flow in a cross-flow grain cleaning device. ASAE Paper No 131586235, at the 2013 ASABE Annual International Meeting. Kansas City, Missouri.
- Gebrehiwot, M. G.; De Baerdemaeker, J. and Baelmans, M. 2010 a. Effect of a cross-flow opening on the performance of a centrifugal fan in a combine harvester: computational and experimental study. *Biosys. Eng.* 105(2):247-256.
- Gebrehiwot, M. G.; De Baerdemaeker, J. and Baelmans, M. 2010 b. Numerical and experimental study of a cross-flow fan for combine cleaning shoes. *Biosys. Eng.* 106(4):448-457.
- Herrera, P. M. I.; García de la Figal, C. A. E; De las Cuevas, M. H y Martins, T. M. 2010. Modelación mediante la dinámica de los fluidos por computadora (CFD) de la corriente de aire de un pulverizador agrícola con ventilador centrífugo. *Rev. Cienc. Téc. Agrop.* 19(3):62-68.

- Herrera, P. M. I.; Martins, T. M.; Rodríguez, G. J. y De las Cuevas, M. H. 2006. Modelación mediante la dinámica de flujo computacional de la corriente de aire de un pulverizador. *Rev. Cienc. Téc. Agrop.* 15(1):12-18.
- Magalhães, C. A.; Martins, T. M. e Herrera, M. P. M. 2006. Construção e avaliação de uma máquina recolhadora de café emterreiro. *Rev. Cienc. Téc. Agrop.* 15(2):13-20.
- Magalhães, C. A.; Teixeira, M. M.; Couto, M. S. e De Resende, C., R. 2006. Modelagem de máquina pneumática recolhadora de frutos de café em terreiro usando análise por elementos finitos. *Engenharia Agrícola.* 26(2):483-492.
- Ni, K.; Du, X.; Chen, S.; Chen, J. and Zhao, Y. 2013. Study on grain distribution in a cross-flow grain separation chamber based on the discrete element method. ASAE Paper No 131586216, at the 2013 ASABE Annual International Meeting. Kansas City, Missouri.
- Olaoye, J. O. 2000. Some physical properties of castor nut relevant to the design of processing equipment. *J. Agric. Eng. Res.* 77(1):113-118.
- Ponpesh, P. and Giles, D. K. 2008. Modeling turbulent flow for design of almond harvesters with low power demand and reduced emission of particulate material. *Ann. Inter. Meeting.* Providence, Rhode Island. 29 June - 2 July.
- Ponpesh, P. and Giles, D. K. 2009. Turbulent gas-particle flow modeling for the mitigation of dust emission from nut harvesters. *Ann. Inter. Meeting 2009.ASABE.* Reno, Nevada. 21 June - 24 June.
- Ponpesh, P.; Giles, D. K. and Downey, D. 2010. Mitigation of in-orchard dust through modified harvester operation. *Transactions of the ASABE.* 53(4):1037-1044.
- Ponpesh, P.; Giles, D. K. and Downey, D. 2011b. Modeling turbulent multiphase flow in design of nut harvesters with reduced dust emission and low power demand. *Transactions of the ASABE* 54(4):1199-1211.
- Ponpesh, P.; Giles, D. K. and Downey, D. 2011a. Modeling turbulent multiphase flow for design of nut harvesters with reduced dust emission and low power demand: swirl-tube design. *Transactions of the ASABE.* 54(3):777-788.
- Sun, H.; Keener, H. M.; Deng, W. and Michel, F. C. 2004. Development and validation of 3-D CFD models to simulate airflow and ammonia distribution in a High-Rise™ hog building during summer and winter conditions. *Agricultural engineering international: the CIGR. J. Sci. Res. Develop.* 6:1-24.
- Teske, M. E.; Thistle, H. W.; Schou, W. C.; Miller, P. C. H.; Strager, J. M.; Richardson, B.; Butler, E. M. C.; Barry, J. W.; Twardus, D. B. and Thompson, D. G. 2011. A review of computer models for pesticide deposition prediction. *Transactions of the ASABE.* 54(3):789-801.