RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O
Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 01/10/2026 | aceito: 08/10/2026 | publicação: 13/10/2026

Caracterización de las propiedades físicas y de los riesgos asociados al polvo de soja y harina de soja

Caracterização das propriedades físicas e dos riscos associados às poeiras de soja e farelo de soja

Characterization of the physical properties and risks associated with soybean and soybean meal dusts

João Vítor Morais Resende – Universidade Federal de Lavras
Gabriel Alves Souza – Universidade Federal de Lavras
Ednilton Tavares de Andrade – Universidade Federal de Lavras
Filipe Da Silva De Oliveira – Universidade Federal de Lavras
Bárbara Lemes Outeiro Araújo – Universidade Federal de Lavras

Resumen: La generación de polvo durante el almacenamiento de productos agrícolas puede representar riesgos para la salud de los trabajadores y la seguridad de las instalaciones de almacenamiento. Este estudio tuvo como objetivo caracterizar físicamente el polvo de soja y de harina de soja para identificar posibles riesgos ocupacionales y de explosión asociados a sus características. Se analizaron muestras de polvo de soja, recogidas en Ijaci–MG, y de harina de soja, recogidas en Paranaguá–PR, en cuanto al contenido de humedad, la granulometría y el poder calorífico superior (PCS). Los resultados mostraron que el polvo de harina de soja presentó mayor PCS (19,48 MJ kg^{-1}) y mayor contenido de humedad (12,91% b.h.) que el polvo de soja (16,98 MJ kg^{-1} y 10,98% b.h., respectivamente), además de una distribución granulométrica más fina (D50 de 171,38 µm frente a 518,22 µm). La fracción inferior a 100 µm representó aproximadamente el 1% de la masa de ambos tipos de polvo y merece atención en relación con la exposición ocupacional, debido al menor tamaño de las partículas y la posibilidad de penetración en el tracto respiratorio. Las características granulométricas y el PCS observados indican posibles riesgos asociados a la exposición ocupacional y la combustibilidad de estos tipos de polvo.

Palabras clave: Granulometría. Poder calorífico. Contenido de humedad. Combustibilidad. Exposición ocupacional.

Resumo: A geração de poeiras durante o armazenamento de produtos agrícolas pode representar riscos à saúde dos trabalhadores e à segurança das unidades armazenadoras. Assim, este estudo teve como objetivo caracterizar fisicamente as poeiras de soja e farelo de soja, visando identificar possíveis riscos ocupacionais e de explosão associados às suas características. Foram analisadas amostras de poeira de soja, coletadas em Ijaci–MG, e de farelo de soja, coletadas em Paranaguá–PR, quanto ao teor de água, à granulometria e ao Poder Calorífico Superior (PCS). Os resultados mostraram que a poeira de farelo de soja apresentou maior PCS (19,48 MJ kg^{-1}) e maior teor de água (12,91% b.u.) em comparação à poeira de soja (16,98 MJ kg^{-1} e 10,98% b.u., respectivamente), além de distribuição granulométrica mais fina (D50 de 171,38 µm contra 518,22 µm). A fração inferior a 100 µm representou aproximadamente 1% da massa de ambas as poeiras e merece atenção quanto à exposição ocupacional, devido ao menor tamanho das partículas e à possibilidade de penetração no trato respiratório. As características granulométricas e o PCS observados indicam possíveis riscos associados à exposição ocupacional e à combustibilidade dessas poeiras.

Palavras-chave: Granulometria. Poder calorífico. Teor de água. Combustibilidade. Exposição ocupacional.

RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O
Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 01/10/2026 | aceito: 08/10/2026 | publicação: 13/10/2026

Abstract: Dust generation during the storage of agricultural products can pose risks to worker health and the safety of storage facilities. Thus, this study aimed to physically characterize soybean dust and soybean meal dust to identify potential occupational and explosion risks associated with their properties. Samples of soybean dust (collected in Ijaci, MG) and soybean meal dust (collected in Paranaguá, PR) were analyzed for moisture content, particle size distribution, and Gross Calorific Value (GCV). The results showed that soybean meal dust exhibited a higher GCV (19.48 MJ kg^{-1}) and higher moisture content (12.91% w.b.) compared to soybean dust (16.98 MJ kg^{-1} and 10.98% w.b., respectively), as well as a finer particle size distribution (D50 of 171.38 µm versus 518.22 µm). The fraction smaller than 100 µm accounted for approximately 1% of the mass of both dust types and warrants attention regarding occupational exposure due to the smaller particle size and the potential for penetration into the respiratory tract. The observed particle size characteristics and GCV indicate potential risks associated with occupational exposure and the combustibility of these dusts.

Keywords: Particle size distribution. Calorific value. Moisture content. Combustibility. Occupational exposure.

1. Introducción

Brasil ocupa un lugar destacado en la producción y exportación de soja en todo el mundo, desempeñando un papel importante en el agronegocio. En la cosecha 2025/26, la producción nacional alcanzó el récord de 180,4 millones de toneladas, el mayor volumen registrado en la serie histórica de la Compañía Nacional de Abastecimiento. Para el mismo período, las exportaciones de semillas oleaginosas se estimaron en 116,1 millones de toneladas (CONAB, 2026).

Este crecimiento de la producción nacional aumenta la demanda de infraestructura para el almacenamiento y procesamiento de granos y sus subproductos, entre los que destaca la harina de soja, ampliamente utilizada como fuente proteica en la alimentación animal (THIAGO; SILVA, 2003).

La fase poscosecha de la soja comprende operaciones esenciales, como secado, procesamiento, transporte y almacenamiento, destinadas a preservar la calidad de los granos hasta su comercialización o transformación (SOUZA et al., 2023). Durante estas operaciones, especialmente en los pasos de movimiento y almacenamiento, la generación de partículas se produce debido a la fricción entre los granos y el desprendimiento de partículas durante la manipulación (ANDRADE; BORÉM, 2004).

El polvo generado durante el procesamiento y movimiento de granos y sus subproductos puede representar riesgos para la salud de los trabajadores y la seguridad de las instalaciones (PEIXOTO; FERREIRA, 2012). Desde el punto de vista ocupacional, la exposición a estas

partículas puede estar asociada con efectos adversos sobre el sistema respiratorio, incluyendo enfermedades respiratorias y reacciones alérgicas. Para evaluar la exposición ocupacional, las partículas se clasifican en fracciones inhalables, torácicas y respirables, de acuerdo con convenciones específicas relacionadas con su comportamiento en el tracto respiratorio (FUNDACENTRO, 2009).

Hansen et al. (2023), Eriksen et al. (2023) y Madsen et al. (2024) demostraron que, en entornos de manejo de desechos orgánicos, la fracción inhalable de partículas puede transportar bacterias y hongos, favoreciendo su deposición en diferentes regiones del tracto respiratorio. También se documentó la presencia de endotoxinas en polvo inhalable, con concentraciones que pueden superar los límites ocupacionales sugeridos (Hansen et al., 2023).

Las partículas de diámetro inferior a 100 µm pueden permanecer suspendidas en el aire durante períodos prolongados, aumentando el tiempo de exposición de los trabajadores (ANDRADE; BORÉM, 2004). Además de los efectos sobre la salud, la presencia de polvo en suspensión puede representar un riesgo de incendio y explosión. Según la OSHA (1997), el polvo es una de las principales causas de las explosiones industriales, especialmente el polvo de grano en este contexto.

Cuando los aerodispersoides permanecen suspendidos en el aire a concentraciones adecuadas y entran en contacto con una fuente de ignición, puede producirse la formación de una atmósfera explosiva capaz de desencadenar incendios y explosiones (SA, 2007). Santamaria-Herrera et al. (2023) demostraron que las partículas de menor tamaño, debido a su mayor relación entre superficie y masa, pueden favorecer la ignición y la propagación de llamas. Los autores observaron un comportamiento explosivo en el contenido de humedad de aproximadamente el 30% para partículas menores de 125 µm, mientras que para partículas entre 125 y 250 µm, este comportamiento se observó hasta aproximadamente el 14% del contenido de humedad. Por lo tanto, las partículas más pequeñas pueden presentar una mayor susceptibilidad a la propagación de la ignición y la combustión bajo ciertas condiciones.

En las unidades de almacenamiento, la generación y acumulación de polvo durante las operaciones de manipulación y procesamiento, asociadas con la presencia de posibles fuentes de ignición, como instalaciones eléctricas, superficies metálicas y rodamientos sometidos a fricción excesiva, pueden favorecer la ocurrencia de incendios y explosiones. Durante estas operaciones, se estima que entre el 0,1% y el 1% del volumen de granos procesados se convertirán en partículas (ANDRADE; BORÉM, 2004).

A pesar de la información disponible sobre los riesgos asociados con el polvo de productos agrícolas en unidades de almacenamiento (SÁ, 2007; PEIXOTO; FERREIRA, 2012;

SALIBA, 2016), todavía se necesitan investigaciones sobre las características del polvo de soja y las harinas de soja generadas en condiciones reales de almacenamiento en Brasil, especialmente en relación con las propiedades relacionadas con la exposición ocupacional y la combustibilidad de estos materiales.

El objetivo de este estudio fue caracterizar físicamente el polvo de soja y sémola de soja generado en unidades de almacenamiento, así como evaluar los posibles riesgos ocupacionales y de explosión asociados con estos materiales en el lugar de trabajo.

2 Marco teórico

2.1. Procesamiento agroindustrial y generación de partículas

Durante el movimiento y procesamiento de productos agrícolas, la fricción y los impactos mecánicos pueden promover la fragmentación de granos y el desprendimiento de partículas, contribuyendo a la generación de polvo (KHAN et al., 2022). El contenido de humedad del producto también influye en este proceso, ya que la reducción de la humedad puede aumentar la fragilidad de los granos y favorecer la formación de partículas durante la manipulación (SALETNIK et al., 2021). La generación de partículas durante estas operaciones puede dar lugar a altas concentraciones de polvo en las proximidades de equipos como molinillas y secadoras, lo que hace necesario controlar la calidad del aire para reducir la exposición ocupacional y minimizar los riesgos para las instalaciones (HALSTENSEN et al., 2007).

Las partículas generadas pueden permanecer dispersas en el aire, caracterizadas como aerodispersoides, cuyo comportamiento está influenciado por factores tales como tamaño, densidad, forma de partículas y condiciones de ventilación del ambiente (HUESCAR MEDINA et al., 2015). Las partículas más pequeñas tienen mayor capacidad para permanecer suspendidas y pueden ser transportadas por corrientes de aire durante períodos prolongados (FUMAGALLI et al., 2016). Con la reducción de la velocidad del aire, parte de este material puede depositarse en máquinas, estructuras y plataformas, formando capas de polvo combustible (BU et al., 2019). La resuspensión de este material depositado, causada por vibraciones u otras perturbaciones, puede contribuir a la formación de atmósferas con suficiente concentración de polvo para favorecer la ocurrencia de explosiones secundarias (JOSEPH, 2007).

La caracterización de partículas es importante para la comprensión de su dinámica en el lugar de trabajo y para el establecimiento de medidas de control. Se pueden utilizar métodos de muestreo activo para determinar la concentración de partículas suspendidas, utilizando sistemas

de aspiración asociados con filtros apropiados (DOUWES et al., 2003). La determinación gravimétrica permite cuantificar la masa de partículas recogidas, mientras que técnicas como la Microscopía de Electrones de Exploración (SEM) pueden proporcionar información sobre la morfología y el tamaño de las partículas (BOATMAN et al., 1988). Esta información puede apoyar la selección y el dimensionamiento de medidas de control, como los sistemas locales de ventilación de escape y los filtros de mango, contribuyendo a la reducción de la exposición ocupacional y la acumulación de polvo en las instalaciones (KHAN et al., 2022).

2.2. Propiedades físicas: Distribución granulométrica, humedad y comportamiento del polvo

La distribución del tamaño de las partículas es una característica importante del polvo generado durante las operaciones agroindustriales, ya que el tamaño de las partículas influye en su comportamiento en el medio ambiente y en su interacción con los procesos de combustión. La reducción del tamaño de las partículas aumenta la relación entre superficie y masa, favoreciendo el contacto con el oxígeno y puede facilitar la transferencia de calor y la liberación de componentes volátiles durante la combustión (HUESCAR MEDINA et al., 2015; FUMAGALLI et al., 2016). Así, las partículas más pequeñas pueden presentar una mayor sensibilidad a la propagación de la ignición y combustión, aunque el comportamiento del polvo en situaciones de incendio o explosión también depende de factores como la composición, concentración de partículas en el aire, contenido de humedad y presencia de fuente de ignición (REDING; SHIFLETT, 2018; KHAN et al., 2022).

Además de influir en el comportamiento durante la combustión, el tamaño de las partículas interfiere con la permanencia de partículas suspendidas en el medio ambiente. Las partículas más pequeñas tienen mayor capacidad para permanecer dispersas y ser transportadas por las corrientes de aire, mientras que las partículas más grandes tienden a sedimentarse más rápidamente (HALSTENSEN et al., 2007). Por lo tanto, parte de la materia particulada puede depositarse en máquinas, plataformas, vigas y otras superficies de instalaciones agroindustriales, formando capas de polvo combustible (BU y otros, 2019). La resuspensión de este material depositado, causada por vibraciones, movimiento de equipos u otras perturbaciones, puede aumentar la concentración de polvo en el aire y contribuir a la ocurrencia de explosiones secundarias cuando se presentan condiciones favorables de ignición (JOSEPH, 2007).

La granulometría también tiene importancia para la evaluación de la exposición ocupacional. El comportamiento de las partículas en el sistema respiratorio está relacionado con sus características aerodinámicas, siendo utilizadas, con fines de higiene ocupacional, las convenciones de fracciones inhalables, torácicas y respirables. Las partículas pertenecientes a fracciones más pequeñas pueden llegar a regiones más profundas del tracto respiratorio, aumentando la posibilidad de deposición pulmonar y efectos adversos para la salud, dependiendo de la composición y concentración del material inhalado (DOUWES et al., 2000; DUOWES et al., 2003; HALSTENSEN et al., 2007). Así, la caracterización granulométrica del polvo constituye una información relevante tanto para comprender su comportamiento en el ambiente como para evaluar la exposición de los trabajadores.

El contenido de humedad también influye en el comportamiento del polvo durante la combustión. La presencia de agua puede absorber parte de la energía térmica suministrada al sistema durante el encendido, ya que la evaporación del agua requiere energía, contribuyendo a la reducción de la temperatura disponible para la combustión (KUAI et al., 2011; MITTAL, 2013). En consecuencia, el aumento del contenido de humedad puede reducir la facilidad de ignición y modificar la intensidad de combustión, aunque este efecto depende de las características del material y de las condiciones en que se produce la ignición (SALETNIK et al., 2021).

Así, tanto la distribución del tamaño de las partículas como el contenido de humedad son propiedades relevantes para la caracterización del polvo agrícola. Las partículas más pequeñas tienden a tener mayor superficie relativa y mayor capacidad de permanecer en suspensión, mientras que el aumento del contenido de humedad puede reducir su susceptibilidad al encendido. La evaluación conjunta de estas propiedades permite una mejor comprensión del comportamiento del polvo y la harina de soja y sus posibles implicaciones para la exposición ocupacional y la seguridad de las unidades de almacenamiento.

2.3. Caracterización energética y comportamiento del combustible del polvo

El potencial energético del polvo orgánico puede caracterizarse por el Valor Calórico Bruto (PCS), parámetro que representa la cantidad de energía liberada durante la combustión completa del material, considerando también la energía asociada a la condensación del vapor de agua formado durante el proceso (SALETNIK et al., 2021). Cuando los residuos de grano son sometidos a intensos procesos de secado o tratamientos térmicos, pueden producirse cambios en su composición y estructura, con una reducción del contenido de humedad y de

ciertos compuestos volátiles y el consiguiente aumento relativo de la fracción fija de carbono (HUESCAR MEDINA et al., 2015).

Según Saletnik et al. (2021), los tratamientos térmicos aplicados a la biomasa pueden aumentar su energía disponible hasta un 62%, modificando su comportamiento durante la combustión. En ambientes confinados, estos cambios pueden contribuir a condiciones más favorables para la propagación de la combustión de polvo dispersa en el aire. Incluso en su estado no tratado, el polvo agrícola tiene contenido energético relevante, especialmente cuando está sujeto a condiciones que favorecen la ignición y la combustión (REIS et al., 2012).

El contenido de humedad es otro factor importante en el comportamiento del polvo durante la combustión. El agua presente en las partículas absorbe parte de la energía térmica suministrada al sistema para promover su evaporación, reduciendo la energía disponible inicialmente para calefacción e ignición del material combustible (MITTAL, 2013). Así, el aumento del contenido de humedad puede dificultar la ignición y reducir la intensidad de combustión, aunque este efecto depende de las características del polvo y de las condiciones de dispersión e ignición. Así, la humedad actúa como un factor capaz de modificar el comportamiento del polvo durante los procesos de combustión, sin eliminar necesariamente el riesgo asociado a la presencia de partículas de combustible.

En las unidades agroindustriales, la acumulación continua de polvo en máquinas, vigas, plataformas y otras superficies puede aumentar la disponibilidad de combustible en el medio ambiente y contribuir a la aparición y propagación de incendios y explosiones (JOSEPH, 2007). Durante una explosión, la alta concentración de partículas suspendidas puede cambiar las condiciones de combustión y favorecer la formación de productos parcialmente quemados, algunos de los cuales pueden depositarse en las superficies de las instalaciones (BU et al., 2019). Estos materiales calentados o incandescentes pueden actuar como fuentes secundarias de ignición y contribuir a la aparición de incendios en capas de polvo depositadas, conocidas como fuego de capa.

Las superficies de equipos que alcanzan altas temperaturas, resultantes de fricción, sobrecalentamiento u otras condiciones de funcionamiento, también pueden constituir puntos calientes capaces de iniciar la combustión de polvo depositado (BU et al., 2019). Una vez iniciada la combustión de una capa de polvo, el calor liberado puede favorecer la ignición de los materiales combustibles cercanos y, si el polvo depositado se dispersa de nuevo en el medio ambiente, contribuir a la formación de una nueva nube de polvo combustible. Este proceso puede favorecer la ocurrencia de explosiones secundarias, cuya intensidad puede ser

influenciada por la cantidad de polvo disponible, las condiciones de dispersión, el confinamiento y la presencia de fuentes de ignición (JOSEPH, 2007; BU et al., 2019).

La posibilidad de propagación de la combustión en capas de polvo también está relacionada con el espesor y las características del depósito. Capas más finas tienen mayor facilidad de disipación de calor para superficies adyacentes, mientras que depósitos más gruesos pueden favorecer la retención de calor y la continuidad del proceso de combustión (BU et al., 2019). Así pues, la acumulación de polvo combustible debe considerarse un factor importante de seguridad en las instalaciones de almacenamiento y transformación de productos agrícolas, especialmente cuando está asociada con posibles fuentes de ignición y la posibilidad de resuspensión de partículas.

2.material y método

El presente trabajo fue desarrollado en el Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Federal de Lavras (UFLA), en Lavras, Minas Gerais. El material analizado consistió en polvo de soja y harina de soja, recolectadas en unidades de almacenamiento ubicadas en Ijaci-MG y Paranaguá-PR, respectivamente.

Posteriormente se realizó la recogida de muestras para identificar los puntos de deposición de partículas suspendidas en el medio ambiente. El muestreo se llevó a cabo en puntos ubicados más de 1,5 m de altura en relación con el suelo, buscando obtener material depositado en regiones correspondientes a la altura de exposición de los trabajadores (FUNDACENTRO, 2009).

El contenido de humedad del polvo fue determinado por el método de invernadero, adaptado a partir de las Normas para el Análisis de Semillas, a una temperatura de 105 ± 3 °C, durante 24 h (BRASIL, 2009). Para cada determinación se utilizaron aproximadamente 25 g de muestra, con tres repeticiones.

La distribución del tamaño de las partículas del polvo se determinó mediante un vibrador de tamiz Lucadema, separando las partículas según el tamaño de las aberturas de los tamices. La prueba se realizó en dos réplicas, utilizando aproximadamente 200 g de muestra en cada repetición, depositadas en el tamiz con mayor apertura. El conjunto de tamices fue sometido a vibración a una intensidad máxima (nivel 10), durante 15 minutos.

El set de tamizado consistió en ocho tamices, con aberturas de 2.000, 1.400, 850, 180, 150, 106, 90 y 75 µm. Bajo el último tamiz se colocó un recipiente colector, llamado "abajo" para la retención de partículas con un tamaño inferior a 75 µm. Después del tamizado, se

pesaron cada tamiz y el recipiente colector, lo que permitió determinar la masa de material retenido en cada clase de tamaño de partícula y su proporción respectiva en relación con la masa total de la muestra.

El valor calorífico bruto (PCS) se determinó utilizando una bomba calorimétrica IKA, modelo C200. Inicialmente, las muestras fueron sometidas al secado del horno a 105 ± 3 °C durante 24 horas. Después del secado, se pesaron aproximadamente 0,25 g de cada muestra y se envasaron en el crisol de la bomba calorimétrica. Luego, el contenedor fue presurizado con oxígeno y sometido a combustión, determinando la energía liberada durante la quema de la muestra.

3. Resultados y debate

Los valores caloríficos brutos (PCS) diferían significativamente entre los materiales evaluados. El polvo de la harina de soja presentó PCS de 19,48 MJ kg−1, superior al observado para el polvo de soja (16,98 MJ kg−1), lo que indica un mayor contenido energético por unidad de masa para el polvo de la harina de soja en las condiciones en que se evaluaron las muestras. Los resultados del análisis PCS, fracción de tamaño de partícula inferior a 100 µm, diámetro medio D50 y contenido de humedad se presentan en la Tabla 1.

Cuadro 1 Valor calorífico más alto (PCS), fracción de tamaño de partícula inferior a 100 µm, diámetro medio D50 y contenido de humedad del polvo de soja y harina de soja.

Análisis	Polvo	
	Harina de soja	Soja
PCS (MJ.kg^{-1})	19.48 a	16.98 b
Granulometría (< 100 µm)	1.1 a)	1.0 a
Contenido de humedad (% b.h.)	12.91 a	10.98 b
Diámetro medio D50 (µm)	171,38	518,22

Las letras iguales en la misma línea indican que no hay diferencia estadísticamente significativa por la prueba de Tukey al 5%.

La diferencia observada en el PCS puede estar relacionada con la composición química de los materiales. La harina de soja está constituida por una fracción orgánica del procesamiento de granos, y puede presentar diferentes proporciones de proteínas, lípidos, carbohidratos y otros compuestos en relación con el polvo originado directamente a partir de granos de soja. Xu, Xu y Liu (2024) destacan la contribución de los constituyentes orgánicos del salvado a sus características energéticas. Así, las diferencias en la composición de la materia orgánica pueden contribuir al aumento del PCS observado en el polvo de harina de soja.

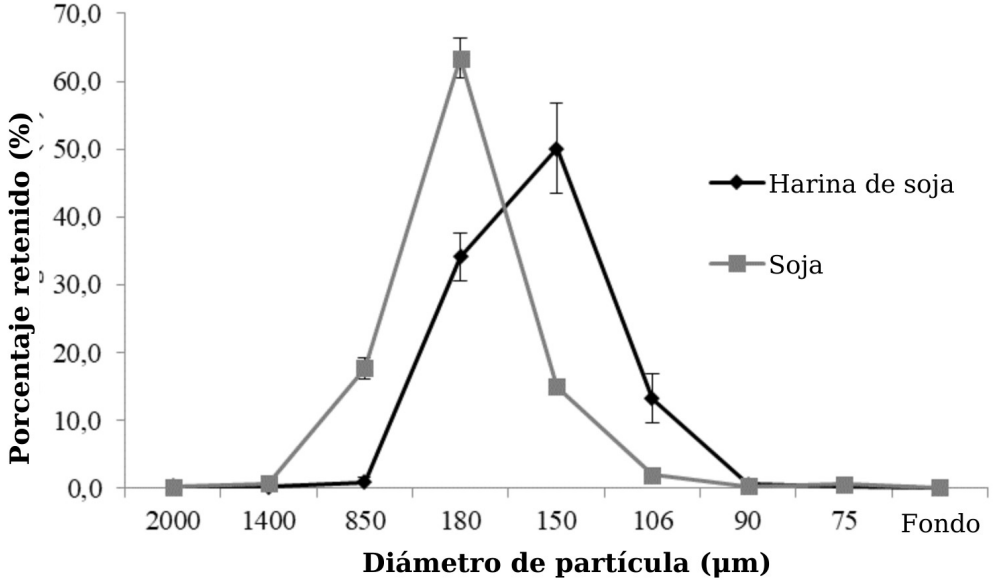
RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O
Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo - SP.
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 01/10/2026 | aceito: 08/10/2026 | publicação: 13/10/2026

El contenido de humedad también difería significativamente entre los materiales, siendo 12,91% para polvo de harina de soja y 10,98% para polvo de soja. Como el agua no contribuye a la liberación de energía durante la combustión y todavía absorbe energía en forma de calor sensible y latente, niveles más altos de agua tienden a reducir el valor calorífico cuando se expresa sobre una base húmeda. Por lo tanto, la PCS más alta observada para polvo de harina de soja, incluso con mayor contenido de humedad, refuerza la posibilidad de diferencias en la composición de la fracción de combustible entre los materiales.

Los valores obtenidos se encuentran en el rango observado para otras biomasas. Huéscar Medina et al. (2015) reportaron PCS de 21,2 MJ kg−1 para abeto noruego y 20,8 MJ kg−1 para pino del sur, valores cercanos, aunque superiores, a los obtenidos para polvo de harina de soja. Saletnik et al. (2021), a su vez, observaron PCS de aproximadamente 17,34 MJ kg−1 para biomasa no procesada de manzana, un valor cercano al observado para polvo de soja. Estas diferencias destacan la influencia de la composición y las características de la materia prima en el contenido energético de las biomasas.

La distribución granulométrica de las muestras mostró diferencias entre los materiales (Figura 1). El polvo de soja concentró aproximadamente el 64% de su masa en la fracción de 180 µm, mientras que el polvo de harina de soja mostró una mayor retención en la fracción de 150 µm, correspondiendo aproximadamente al 50% de la masa. Se observó, por lo tanto, una distribución dislocada a diámetros más pequeños en polvo de harina de soja, lo que indica una mayor participación relativa de partículas más pequeñas en este material.

Gráfico 1 Distribución granulométrica de harina de soja y polvo de soja.



Esta diferencia también se evidencia por el diámetro medio correspondiente al 50% de la distribución (D50). El polvo de harina de soja presentó D50 de 171,38 µm, mientras que el

polvo de soja presentó 518,22 µm. Por lo tanto, la mitad de la distribución del tamaño de las partículas del polvo de harina de soja es menor que aproximadamente 171 µm, mientras que para el polvo de soja, este valor fue de aproximadamente 518 µm.

El valor obtenido para el polvo de harina de soja fue superior al reportado por Xu, Xu y Liu (2024), que encontraron D50 de 23.197 µm. Esta diferencia puede estar relacionada con la forma de obtener las muestras. En el presente estudio, el polvo se recogió directamente del entorno de procesamiento, mientras que Xu, Xu y Liu (2024) utilizaron harina de soja sometida a molienda. El proceso de rectificado tiende a producir partículas más pequeñas, lo que puede explicar parte de la diferencia observada entre los estudios. En el caso de las biomasas leñosas, Huéscar Medina y otros (2015) comunicaron D50 de 712 y 722 µm para el picea de Noruega y el pino del sur, respectivamente, mientras que Saletnik y otros (2021) encontraron D50 entre 73,5 y 86,365 µm para los biochares de ramas de árboles frutales. Estas comparaciones demuestran que la distribución granulométrica está influenciada por el origen de la materia prima y, principalmente, por las operaciones de procesamiento, generación, recolección y preparación de muestras.

La fracción de partículas con diámetro inferior a 100 µm representó el 1,1% de la masa de polvo de la harina de soja y el 1,0% del polvo de soja, y no se observó diferencia estadística entre los materiales. A pesar de la pequeña proporción de masa, esta fracción es relevante desde la perspectiva de la salud ocupacional, ya que las partículas más pequeñas tienen mayor potencial para permanecer suspendidas en el aire y alcanzar regiones más profundas del tracto respiratorio, dependiendo de sus características aerodinámicas y condiciones de exposición.

En el contexto del polvo orgánico, la fracción fina puede actuar como vehículo para microorganismos y componentes biológicamente activos, tales como endotoxinas y β-glucanos. Douwes y otros (2003) y Halstensen y otros (2007) asociaron la exposición ocupacional al polvo orgánico con respuestas inflamatorias y cambios respiratorios. Douwes et al. (2000), a su vez, observaron cambios en los marcadores inflamatorios en trabajadores expuestos a bioaerosoles, evidenciando que fracciones relativamente pequeñas en masa pueden presentar relevancia biológica. Así, aunque la fracción inferior a 100 µm representa aproximadamente el 1% de la masa total de polvo evaluada, su presencia debe considerarse en las estrategias de control de la exposición ocupacional en entornos de procesamiento.

Las características granulométricas, el PCS y el contenido de humedad también son relevantes para la evaluación del comportamiento del polvo combustible. La PCS más alta observada para polvo de harina de soja indica un mayor contenido energético por unidad de masa, mientras que la D50 más baja muestra una mayor participación relativa de partículas más

pequeñas. Las partículas más pequeñas tienen una superficie específica más alta y pueden favorecer la transferencia de calor, el calentamiento y los procesos de combustión cuando se dispersan en el aire. Huéscar Medina et al. (2015) demostraron que la reducción del tamaño de las partículas puede favorecer la reactividad del polvo combustible debido a cambios en los mecanismos de transferencia de calor y masa y una mayor disponibilidad de componentes de combustible.

Fumagalli et al. (2016) también discutieron la influencia del tamaño de las partículas en la explosividad, destacando que, para partículas suficientemente pequeñas, la influencia de la reducción de tamaño adicional puede volverse menos pronunciada. Así, aunque la fracción de menos de 100 µm presenta características que pueden favorecer su participación en procesos de ignición y propagación de llama, su baja participación masiva no permite afirmar, de forma aislada, que es responsable de la ocurrencia o severidad de una eventual explosión. El comportamiento de la nube de polvo también depende de la concentración de partículas en el aire, energía de ignición, disponibilidad de oxígeno, contenido de humedad y otras propiedades del material.

El contenido de humedad también puede modificar el comportamiento de una nube de polvo. El polvo de harina de soja presentó un contenido de humedad significativamente mayor (12,91%) que el polvo de soja (10,98%). El aumento de la humedad puede influir en la dispersión y aglomeración de partículas, además de interferir con los procesos de combustión. Mittal (2013), al evaluar el polvo de carbón, observó influencia del contenido de humedad en la Concentración Límite de Oxígeno (LOC), mientras que Addai et al. (2016) discutieron la influencia de la humedad en los mecanismos relacionados con la dispersión y comportamiento del polvo combustible. Aunque estos estudios se han realizado con otros materiales, muestran que la humedad debe ser considerada en la interpretación del comportamiento del polvo.

Juntos, el polvo de harina de soja mostró mayor PCS (19,48 MJ kg−1), menor D50 (171,38 µm) y mayor contenido de humedad (12,91%), comparado con el polvo de soja, que presentó 16,98 MJ kg−1, 518,22 µm y 10,98%, respectivamente. Estos resultados muestran diferencias relevantes entre los materiales con respecto a su energía, tamaño de partícula y características de humedad. Sin embargo, la determinación de la explosividad requiere ensayos específicos, como la presión máxima de explosión (Pmax), la velocidad máxima de aumento de la presión (Kst), la concentración mínima de explosivos (MEC), la energía mínima de ignición (MIE) y la concentración límite de oxígeno (LOC).

Así, los resultados obtenidos constituyen una caracterización preliminar de las propiedades que pueden influir en el comportamiento del polvo y proporcionar subsidios para

la evaluación de los riesgos asociados con el almacenamiento, transporte y procesamiento de estos materiales, pero no permiten, por sí solos, cuantificar o clasificar la gravedad de una eventual explosión.

Consideraciones finales

El polvo de soja y sémola de soja mostró diferencias en el valor calorífico, el contenido de humedad y la distribución granulométrica. El polvo de harina de soja presentó mayor PCS (19,48 MJ kg−1), mayor contenido de humedad (12,91% p.b.) y menor D50 (171,38 μm) en comparación con el polvo de soja (16,98 MJ kg−1; 10,98% p.b.; 518,22 μm). La fracción de menos de 100 μm correspondió aproximadamente al 1% de la masa de ambos polvos, mostrando relevancia para la exposición ocupacional y el comportamiento del polvo combustible. Estos resultados refuerzan la necesidad de medidas de control durante el manejo y procesamiento de estos materiales, aunque la caracterización de la explosividad requiere ensayos específicos.

Bibliografía

ADDAI, E. K.; GABEL, D.; KRAUSE, U. Experimental investigations of the minimum ignition energy and the minimum ignition temperature of inert and combustible dust cloud mixtures. Journal of Hazardous Materials, v. 307, p. 302–311, 2016.

ADEBIYI, A. A.; KOK, J. F. Climate models miss most of the coarse dust in the atmosphere. Science Advances, v. 6, n. 15, eaaz9507, 2020.

ADEBIYI, A. A.; KOK, J. F.; MURRAY, B. J.; RYDER, C. L.; STUUT, J.-B. W.; KAHN, R. A.; KNIPPERTZ, P.; FORMENTI, P.; MAHOWALD, N. M.; PEREZ GARCIA-PANDO, C.; KLOSE, M.; ANSMANN, A.; SAMSET, B. H.; ITO, A.; BALKANSKI, Y.; DI BIAGIO, C.; ROMANIAS, M. N.; HUANG, Y.; MENG, J. A review of coarse mineral dust in the Earth system. Aeolian Research, v. 60, 100849, 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E711-87: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. Philadelphia: ASTM International, 2004. 8 p.

AMYOTTE, P. R.; MINTZ, K. J.; PEGG, M. J.; SUN, Y.-H.; WILKIE, K. I. Laboratory investigation of the dust explosibility characteristics of three Nova Scotia coals. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 4, n. 2, p. 102–109, 1991.

ANDRADE, E. T.; BORÉM, F. M. A safra pelos ares. Revista Cultivar Máquinas, ed. 28, 2004. Disponible en: http://www.grupocultivar.com.br/arquivos/m28_acidentes.pdf. Consultado el: 20 set. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13 p.

ASTM. D5865-03: Standard test method for gross calorific value of coal and coke. In: Annual book of ASTM standards. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2003.

BOATMAN, E. S.; COVERT, D.; KALMAN, D.; LUCHTEL, D.; OMENN, G. S. Physical, morphological, and chemical studies of dusts derived from the machining of composite-epoxy materials. Environmental Research, v. 45, n. 2, p. 242–255, 1988.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Brasília: Mapa/ACS, 2009.

BU, Y.; YUAN, C.; AMYOTTE, P.; LI, C.; CAI, J.; LI, G. Ignition hazard of non-metallic dust clouds exposed to hotspots versus electrical sparks. Journal of Hazardous Materials, v. 365, p. 895–904, 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Conab estima produção de 361,7 milhões de toneladas de grãos na safra 2025/26. Brasília: Conab, 2026. Disponible en: https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/conab-estima-producao-de-361-7-milhoes-de-toneladas-de-graos-na-safra-2025-26. Consultado el: 20 set. 2026.

DOUWES, J.; THORNE, P.; PEARCE, N.; HEEDERIK, D. Bioaerosol health effects and exposure assessment: progress and prospects. Annals of Occupational Hygiene, v. 47, n. 3, p. 187–200, 2003.

DOUWES, J.; WOUTERS, I.; DUBBELD, H.; VAN ZWIETEN, L.; STEERENBERG, P.; DOEKES, G.; HEEDERIK, D. Upper airway inflammation assessed by nasal lavage in compost workers: A relation with bio-aerosol exposure. American Journal of Industrial Medicine, v. 37, n. 5, p. 459–468, 2000.

ERIKSEN, E.; MADSEN, A. M.; AFANOU, A. K.; STRAUMFORS, A.; EILER, A.; GRAFF, P. Occupational exposure to inhalable pathogenic microorganisms in waste sorting. International Journal of Hygiene and Environmental Health, v. 253, p. 114240, 2023.

FUMAGALLI, A.; DERUDI, M.; ROTA, R.; COPELLI, S. Estimation of the deflagration index KSt for dust explosions: A review. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 44, p. 271–282, 2016.

FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO. Norma de higiene ocupacional: procedimento técnico: coleta de material particulado sólido suspenso no ar de ambientes de trabalho. São Paulo: Fundacentro, 2007. 24 p. (Normas de higiene ocupacional - NHO; 08). ISBN 978-85-98117-39-3.

HALSTENSEN, A. S.; NORDY, K. C.; EDUARD, W.; et al. Determinants of microbial exposure in grain farming. Annals of Occupational Hygiene, v. 51, n. 7, p. 581–592, 2007.

HANSEN, K. K.; SCHLÜSSNER, V.; BROBERG, K.; ØSTERGAARD, K.; FREDERIKSEN, M. W.; MADSEN, A. M.; KOLSTAD, H. A. Exposure levels of dust,

endotoxin, and microorganisms in the Danish recycling industry. Annals of Work Exposures and Health, v. 67, n. 7, p. 816–830, 2023.

HUÉSCAR MEDINA, C.; MACCOITIR, B.; SATTAR, H.; SLATTER, D. J. F.; PHYLAKTOU, H. N.; ANDREWS, G. E.; GIBBS, B. M. Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverised coals and biomass in the ISO standard 1 m³ dust explosion equipment. Fuel, v. 151, p. 91–101, 2015.

JOSEPH, P. Domino effect in dust explosions. Journal of Hazardous Materials, v. 143, n. 1-2, p. 10–18, 2007.

KHAN, A. M.; RAY, S. K.; MOHALIK, N. K.; MISHRA, D.; MANDAL, S.; PANDEY, J. K. Experimental and CFD simulation techniques for coal dust explosibility: A review. Mining, Metallurgy & Exploration, v. 39, p. 1445–1463, 2022.

KUAI, N.; HUANG, W.; YUAN, J.; DU, B.; LI, Z.; WU, Y. Experimental investigations of coal dust-inertant mixture explosion behaviors. Procedia Engineering, v. 26, p. 1337–1345, 2011.

LIN, X.; YUAN, Z.; AMYOTTE, P. Suppression of dust explosions using solid powders: Mechanism and application. Powder Technology, v. 366, p. 402–411, 2020.

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. F. F.; TRUGILHO, P. F. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de Corymbia spp para uso industrial. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 214–232, 2021.

MADSEN, A. M.; RASMUSSEN, P. U.; FREDERIKSEN, M. W. Fungal and bacterial species on biowaste workers' hands and inhalation zone, and potential airway deposition. Waste Management, v. 183, p. 290–301, 2024.

MITTAL, M. Limiting oxygen concentration for coal dusts for explosion hazard analysis and safety. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 26, n. 6, p. 1106–1112, 2013.

OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION (OSHA). Combustible Dust: Safety and Injury Prevention. Instruction Manual, 1997.

PEIXOTO, N. H.; FERREIRA, L. S. Higiene Ocupacional I. Santa Maria: UFSM, CTISM, 2012.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F.; GODINHO, T. P. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp. aos 42 meses de idade. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 33, n. 74, p. 137–149, 2013.

READING, N. S.; SHIFLETT, M. B. Metal dust explosion hazards: A technical review. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 61, n. 36, p. 13242–13256, 2022.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Composição da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus urophylla em diferentes locais de plantio. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277–290, 2012.

SÁ, A. Efeito devastador. Revista Proteção, ed. 181, 2007. Disponible en: http://www.ufrrj.br/institutos/it/de/acidentes/silo.htm. Consultado el: 20 set. 2026.

SÁ, A. Risco de explosão. Revista Proteção, v. 61, 1997.

SALETNIK, B.; BAJCAR, M.; SALETNIK, A.; ZAGULA, G.; PUCHALSKI, C. Effect of the pyrolysis process applied to waste branches biomass from fruit trees on the calorific value of the biochar and dust explosivity. Energies, v. 14, n. 16, 4898, 2021.

SALIBA, T. M. Manual prático de avaliação e controle de poeira e outros particulados: PPRA. 8. ed. São Paulo: LTr, 2016.

SANTAMARÍA-HERRERA, A.; HOYUELOS, F. J.; CASADO-MARCOS, C. Characterization of the explosiveness of wood dust. Process Safety and Environmental Protection, v. 169, p. 252–259, 2023.

SANTOS, A. M. O tamanho das partículas de poeira suspensas no ar dos ambientes de trabalho. São Paulo: Fundacentro, 2001.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PIMENTA, A. S.; CASTRO, R. V. O.; MARINHO, I. V.; TRUGILHO, P. F.; ALVES, I. C. N.; CASTRO, A. F. N. M. Potencial energético da madeira de espécies oriundas de plano de manejo florestal no Estado do Rio Grande do Norte. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 491–502, 2013.

SOUZA, Diene Gonçalves et al. CO_2 monitoring associated with the quality of soybean grains stored in different moisture contents. Food Science and Technology, Campinas, v. 43, e29023, 2023.

THIAGO, L. R. L. de S.; SILVA, J. M. da. Soja na alimentação de bovinos. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2003. 6 p. (Embrapa Gado de Corte. Circular técnica, 31).

VINCENT, J. H.; MARK, D.; MILLER, B. G.; ARMBRUSTER, L.; OGDEN, T. L. Aerosol inhalability at higher windspeeds. Journal of Aerosol Science, v. 21, n. 4, p. 577–586, 1990.

XU, J.; XU, K.; LIU, B. Experimental Study on the Characteristics of Bicarbonate Inhibiting Soybean Meal Dust Explosion. Journal of Northeastern University (Natural Science), v. 45, n. 12, p. 1798–1804, 2024.

Agradecimientos

El presente trabajo se realizó con el apoyo de la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiación 001.