Influencia de la humedad relativa en la tasa de secado del arroz paddy, con enfoque en la productividad agroindustrial

AUTOR: DIEGO FABIAN ALARCON SALGADO

DIRECTOR: ING. JAIME TRUJILLO MANRIQUE

Artículo de investigación, relacionado para acceder al título de Especialista en Gerencia de la Cadena de Valor y Productividad

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS – SEDE TUNJA

DIVISIÓN DE ARQUITECTURA E INGENIERIA

ESPECIALIZACION EN GERENCIA DE LA CADENA DE VALOR Y PRODUCTIVIDAD

IBAGUE – TOLIMA

2026

Palabras clave:

Arroz paddy, Humedad relativa, Tasa de secado, Productividad agroindustrial, Transferencia de masa.

Keywords:

Paddy rice; Relative humidity; Drying rate; Agro-industrial productivity; Mass transfer.

RESUMEN

El secado del arroz paddy constituye una etapa crítica dentro de la cadena de valor agroindustrial, debido a su influencia directa en la calidad del grano, la eficiencia energética y la productividad del proceso. Entre los aspectos ambientales que afectan el proceso de secado, el contenido de humedad del aire juega un papel determinante al modificar la presión parcial de vapor, la humedad de equilibrio y la velocidad de migración de masa entre el grano y el ambiente. La finalidad de este artículo es analizar el impacto de la humedad relativa en la tasa de secado del arroz paddy y sus implicaciones en la eficiencia operativa de los sistemas de secado utilizados en la agroindustria arrocera.

Dicho artículo investigativo se elaboró mediante una metodología de enfoque mixto. En primer lugar, se efectuó una revisión sistematizada de producción científica en plataformas de datos indexadas como Scopus, ScienceDirect, Springer, Wiley, Scielo, Google Scholar y Redalyc, aplicando ecuaciones de búsqueda con operadores booleanos y criterios de inclusión previamente definidos, de un total inicial de 220 documentos se seleccionaron 40 estudios relevantes relacionados con la cinética de secado del arroz paddy y la influencia de variables ambientales. En segundo lugar, se analizaron datos operativos del sistema de secado de la empresa Federal S.A.S., ubicada en el departamento del Tolima (Colombia), considerando variables como humedad relativa ambiental, humedad inicial y final del grano, tiempo de secado y tasa de remoción de humedad.

Los resultados evidencian que incrementos en la humedad relativa reducen significativamente la constante de secado en modelos como Newton, Page y Henderson–Pabis, prolongando los tiempos de proceso y disminuyendo la eficiencia del sistema. De manera consistente, los datos operativos analizados muestran que, bajo condiciones de humedad relativa elevada (≥85 %), la tasa de secado puede disminuir hasta 0,40 %/h, confirmando la influencia crítica de esta variable en el desempeño del proceso.

ABSTRACT

Paddy rice drying represents a critical stage within the agro - industrial value chain due to its direct influence on grain quality, energy efficiency, and overall process productivity. Among the environmental factors affecting the drying process, air moisture content plays a key role by modifying the partial vapor pressure, equilibrium moisture content, and the rate of mass transfer between the grain and the surrounding environment. The purpose of this study is to analyze the influence of relative humidity on the drying rate of paddy rice and its implications for the operational efficiency of drying systems used in the rice agro-industry.

This research article was developed using a mixed methodological approach. First, a systematic review of scientific literature was conducted using indexed databases such as Scopus, ScienceDirect, Springer, Wiley, SciELO, Google Scholar, and Redalyc. Search equations based on Boolean operators and predefined inclusion criteria were applied. From an initial pool of 220 documents, 40 relevant studies related to paddy rice drying kinetics and the influence of environmental variables were selected. Second, operational data from the drying system of Federal S.A.S., a rice milling company located in the Tolima department (Colombia), were analyzed. The evaluated variables included ambient relative humidity, initial and final grain moisture content, drying time, and moisture removal rate.

The results indicate that increases in relative humidity significantly reduce the drying constant in commonly used models such as Newton, Page, and Henderson–Pabis, leading to longer drying times and reduced system efficiency. Consistently, the operational data analyzed show that under high relative humidity conditions (≥85%), the drying rate can decrease to approximately 0.40%/h, confirming the critical influence of this variable on the performance of the drying process.

INTRODUCCIÓN

El arroz ocupa un lugar relevante entre los cereales producidos y consumidos a nivel mundial y constituye un componente fundamental de la seguridad alimentaria en numerosos países, especialmente en regiones tropicales y subtropicales, dicha información suministrada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), este cereal representa una de las principales fuentes de energía alimentaria para más del 50% de la población mundial actual (2026) y desempeña un papel estratégico dentro de los sistemas agroalimentarios globales. En Colombia, el arroz representa un cultivo de gran relevancia económica y social dentro del sector agrícola, contribuyendo significativamente a la producción nacional de alimentos y al empleo rural (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021). Con respecto a esta realidad, el departamento del Tolima se destaca como uno de los principales productores de arroz paddy verde de del país, concentrando una proporción significativa del área sembrada y de la producción nacional de dicho cereal (Fedearroz, 2022; DANE, 2023). Con respecto a la cadena de valor agroindustrial del arroz, las operaciones posteriores a la cosecha cumplen un papel relevante en la preservación de la calidad del grano, la minimización de pérdidas y el fortalecimiento en la competitividad de la industria molinera moderna (Brooker et al., 1992; Bala, 2016).

Entre las etapas de postcosecha, el secado del arroz paddy se considera como uno de los procesos de mayor impacto técnico y económico, debido a su influencia directa sobre la productividad del sistema, la optimización energética, la calidad final del producto y el costo operativo asociado. Un proceso de secado eficiente permite reducir los tiempos de operación, minimizar el consumo energético por tonelada procesada o secada y preservar la integridad física del grano, mientras que un secado inadecuado puede generar fisuras, aumento del porcentaje de grano partido, reprocesos generando costos de la NO calidad y pérdidas en el rendimiento industrial, afectando negativamente la rentabilidad del proceso (Bala, 2016; Mujumdar, 2014).

Desde una perspectiva organizacional, el secado del arroz paddy constituye un punto crítico de control dentro del sistema productivo, ya que condiciona el desempeño y rendimiento de las etapas siguientes al almacenamiento, como lo son el descascarado, la trilla, la clasificación mecánica y electrónica y la comercialización, en este sentido, la optimización de la etapa de secado no solo incide sobre la calidad del producto final, sino que se traduce en mejoras en la eficiencia global del proceso, la estabilidad operacional y el tiempo de reacción de la empresa frente a un entorno competitivo cada vez más exigente (Brooker et al., 1992).

A pesar de la amplia utilización del secado artificial convectivo en la industria arrocera, este proceso continúa representando un desafío operativo significativo, particularmente en regiones caracterizadas por una alta variabilidad climática. En

contextos industriales reales, el control inadecuado de las variables que gobiernan el secado del arroz paddy puede generar ineficiencias operativas, prolongación innecesaria de los tiempos de proceso, incremento del consumo energético y afectaciones en la calidad del grano, con impactos directos sobre la eficiencia productiva y los costos operativos del molino. Diversos estudios han señalado que variaciones no controladas en variables operativas como la temperatura ambiental, el caudal de aire y la humedad relativa, pueden alterar la tasa o grado de secado, incrementando el consumo de energía eléctrica del proceso y favoreciendo la aparición de defectos en el grano, como fisuras internas y aumento del porcentaje de grano quebrado durante la molienda (Brooker et al., 1992; Mujumdar, 2014; Bala, 2016). Si bien estas problemáticas son de carácter general en la industria arrocera, su magnitud y manifestación dependen de las condiciones específicas de cada planta, del entorno climático y del nivel de control aplicado sobre el proceso. En particular, en regiones como el departamento del Tolima, donde la humedad relativa ambiental presenta valores elevados durante buena parte del año, el proceso de secado del arroz paddy se ve condicionado de manera significativa por factores externos que, en muchos casos, no son gestionados de forma sistemática dentro de la operación industrial.

En términos operativos, el proceso de secado del arroz paddy en la industria molinera inicia una vez el grano es recibido posterior a la cosecha, presentando contenidos de humedad superiores a los niveles seguros para almacenamiento y procesamiento. El arroz paddy húmedo es dispuesto en sistemas de secado donde se somete a la circulación de aire caliente forzado, permitiendo el intercambio o transferencia simultánea de calor o energía desde el ambiente hacia todas las capas del grano y posterior intercambio de masa desde la parte interna del grano, hasta el ambiente.

Durante el secado convectivo, el aire caliente entra en contacto físico con la superficie del grano, provocando la eliminación de la humedad de la capa externa del grano de paddy, y generando un gradiente de humedad entre la parte interna y externa del mismo grano de paddy. Este gradiente constituye la fuerza impulsora que gobierna la migración interna de la humedad, proceso que ocurre de manera progresiva y depende tanto de las características del grano como las del aire de secado. En la práctica industrial, este fenómeno se desarrolla bajo condiciones no estacionarias, debido a la variabilidad de las condiciones ambientales y operativas.

En sistemas y procesos productivos industriales como los empleados en la empresa Federal S.A.S., el aire de secado es generado mediante un sistema térmico o generación de calor, en este caso producido por un horno ciclónico, que produce aire caliente de baja humedad, dicho aire se mezcla posteriormente con aire ambiente antes de ingresar a las zonas de secado, conformando un flujo de aire cuya temperatura, caudal y humedad relativa determinan el comportamiento real del sistema u operación, a diferencia de los sistemas idealizados de laboratorio, esta mezcla introduce una variabilidad significativa en las condiciones del sistema de

secado, lo que exige un control operativo continuo para garantizar la estabilidad del proceso.

El objetivo relevante o principal del secado industrial del arroz paddy verde es reducir su contenido de humedad (grano) hasta valores cercanos al 13%, considerados adecuados para las etapas posteriores de almacenamiento y molienda, no obstante, este objetivo debe alcanzarse mediante una reducción gradual y controlada de la humedad, evitando gradientes o diferencias excesivas que puedan inducir tensiones internas en el grano, por esta razón, en la práctica industrial se busca establecer curvas de secado seguras que equilibren el desempeño del proceso con la preservación de los parámetros y/o estándares de calidad del producto final, en este caso paddy seco.

La eficiencia de este secado artificial convectivo no depende exclusivamente de la temperatura del aire, sino también de variables operativas y ambientales como el caudal de aire, el tiempo de exposición y, de manera particularmente relevante, la condición higrométrica del aire, esta variable condiciona la presión de vapor de agua, la humedad de equilibrio del grano que está en proceso de secado y la fuerza impulsora del flujo de masa, influyendo directamente sobre la dinámica de secado (Mujumdar, 2014; Erbay & Icier, 2010).

Diferentes estudios han demostrado que con respecto a incrementos en la humedad relativa, en este caso del área periférica al área de secado, se reduce el ritmo o tiempo de secado y la constante de secado estimada mediante modelos cinéticos ampliamente utilizados, como los modelos de Newton, Henderson, entre otros, toman certeza, en estos modelos, una mayor humedad relativa del aire disminuye el gradiente de potencial necesario para el desplazamiento de masa desde la parte interna o central del grano hacia el ambiente, prolongando los tiempos de secado y afectando la eficiencia del proceso (Page, 1949; Henderson & Pabis, 1961; Iguaz et al., 2003).

Estudios recientes confirman que, a pesar de los avances tecnológicos en sistemas de secado industrial, la gestión de variables ambientales como la humedad relativa del aire continúa siendo un desafío crítico para la industria de granos. Investigaciones actuales destacan que la variabilidad climática, el desempeño energético y la preservación del estándar de calidad del producto siguen siendo factores determinantes en el desempeño del secado convectivo, especialmente en contextos industriales reales donde el control de las condiciones de operación es limitado o no se encuentra sistematizado (Zare & Chen, 2022; Zhang et al., 2023). Asimismo, se ha evidenciado que estrategias de monitoreo de la humedad del aire y enfoques de secado por etapas o intermitente pueden contribuir significativamente a mejorar la productividad y la calidad, sin incrementar de manera desproporcionada o significativa el consumo energético (Kumar et al., 2022; Liu et al., 2024; Singh & Pandey, 2025).

Sin embargo, una proporción significativa de los estudios disponibles en la literatura ha sido desarrollada bajo condiciones controladas de laboratorio o a escala piloto, lo que limita su extrapolación directa a contextos industriales reales, caracterizados por alta variabilidad ambiental y restricciones operativas. En particular, existe una limitada integración entre los modelos teóricos de secado y datos operativos obtenidos en plantas industriales en funcionamiento, especialmente en regiones con condiciones climáticas altamente variables.

En este contexto, el presente estudio no aborda el secado del arroz paddy como una debilidad aislada del proceso productivo, sino como una oportunidad de mejora continua dentro de la cadena de valor agroindustrial. A partir del análisis de la incidencia de la humedad relativa sobre el ritmo de secado y su contraste con información operativa real del proceso de secado en la empresa molinera Federal S.A.S., ubicada en el departamento del Tolima, Colombia, se busca generar conocimiento aplicado que permita fortalecer la toma de decisiones operativas, mejorar la eficiencia del proceso y contribuir a la eficiencia de la operación, la calidad y la competitividad en el sector molinero en condiciones industriales de operación.

La base de data completa y los registros operativos del proceso de secado analizados en este artículo se presenta en el **Anexo A**.

METODOLOGÍA

1. METODOLOGIA DE REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

La revisión documental se desarrolló bajo un enfoque sistemático y aplicado, enfatizado a analizar el impacto de la humedad relativa, sobre la velocidad de secado del arroz paddy verde y sus implicaciones operativas e industriales. El objetivo de esta revisión fue identificar, analizar y sintetizar estudios científicos relevantes sobre el tema a profundizar que permitieran establecer una base teórica sólida y concreta para el contraste con datos reales del sistema de secado en la empresa Federal SAS.

El análisis bibliográfico se realizó en bases de datos científicas de amplio reconocimiento, entre las cuales se incluyen Scopus, ScienceDirect, Springer, Wiley, SciELO, Redalyc y Google Scholar, para la identificación de los documentos se emplearon patrones de búsqueda construidas mediante operadores booleanos, combinando términos claves relacionados con el proceso de secado (arroz paddy) y las variables de interés, tales como paddy rice drying, relative humidity, drying kinetics, drying rate, convective drying.

Se establecieron criterios o pautas de inclusión o selección, considerando artículos científicos, revisiones y documentos técnicos publicados en revistas que abordaran el secado del arroz paddy verde o granos similares bajo condiciones de secado convectivo (Utilizado en Federal SAS), y que analizaran explícitamente el impacto de la humedad ambiental sobre la tasa o velocidad de secado. Asimismo, se priorizaron estudios con enfoque experimental, modelación matemática o aplicación industrial, se excluyeron documentos duplicados, estudios no relacionados directamente con el objeto de análisis, publicaciones sin acceso a texto completo y trabajos que no presentaran información cuantitativa relevante o concreta.

El proceso de selección se desarrolló en varias etapas. Inicialmente, se identificaron aproximadamente 220 documentos por medio de la revisión en bases de datos, posteriormente, mediante la revisión de títulos, resúmenes y palabras clave, se realizó una primera depuración. Finalmente, tras la lectura detallada de los textos completos y la aplicación de las pautas de inclusión y exclusión, se seleccionaron 40 investigaciones y estudios considerados relevantes para el análisis en profundidad.

Los documentos seleccionados fueron analizados de manera comparativa, prestando especial atención a los modelos cinéticos empleados, las condiciones operativas de secado, los rangos de humedad relativa del aire evaluados y los efectos reportados sobre la tasa de secado. Esta información sirvió como base para

el contraste posterior con los datos operativos reales del proceso de secado en la empresa Federal S.A.S.

2. CARACTERIZACION DEL PROCESO DE SECADO EN FEDERAL S.A.S

El sistema de secado de arroz paddy analizado en el presente estudio se desarrolla en la empresa molinera Federal S.A.S., ubicada en el departamento del Tolima, Colombia, región caracterizada por una alta producción arrocera y condiciones climáticas de elevada variabilidad, particularmente en términos de humedad relativa ambiental. La empresa emplea un sistema de secado artificial convectivo, ampliamente utilizado en la industria arrocera, cuyo objetivo es garantizar la reducción controlada de la concentración de humedad del grano posterior a la cosecha.

El sistema de secado se efectúa bajo la circulación de aire caliente forzado a través de masas de arroz paddy dispuestas en albercas y/o patios inclinados, permitiendo el contacto directo entre el aire de secado y el grano. La energía térmica requerida para el proceso es generada mediante un horno ciclónico, el cual produce aire caliente de baja humedad que posteriormente se mezcla con aire ambiente antes de ingresar a la zona de secado. Esta mezcla de aire constituye la condición real de operación que gobierna la transferencia de energía y masa en el proceso de secamiento (Brooker et al., 1992).

Con respecto a un punto de vista operativo, el tratamiento de secado se desarrolla o es llevado con condiciones variables de temperatura, caudal o flujo de aire y humedad relativa, dependiendo tanto de las condiciones ambientales externas como de los ajustes realizados en el sistema de generación y conducción del aire. En particular, la humedad relativa ambiental de secado resulta de la interacción entre el aire seco proveniente del horno ciclónico y el aire ambiente, lo que introduce una variabilidad significativa en la fuerza impulsora del proceso de secado o secamiento.

La finalidad operativa del sistema es reducir el contenido de humedad del arroz paddy verde desde valores iniciales típicos posteriores a la cosecha hasta un valor final cercano al 13%, considerado adecuado para las etapas posteriores de almacenamiento y molienda. Durante este proceso, se busca mantener una curva de secado segura que permita preservar la integridad física del grano, evitando defectos como fisuración, incremento del porcentaje de grano quebrado y pérdidas en el rendimiento industrial (Bala, 2016).

Dentro del alcance de este estudio, se identificaron como variables críticas del proceso la humedad relativa (aire ambiente), la temperatura de la misma, el tiempo de secado y la tasa de eliminación de humedad del grano. Estas variables fueron

monitoreadas y registradas durante la operación normal del sistema, constituyendo el conjunto de datos empleado en el análisis y su posterior contraste con los modelos teóricos y la literatura científica revisada.

3. ANALISIS DE DATOS OPERATIVOS DEL PROCESO DE SECADO (FEDERAL SAS)

La recolección de los datos operativos se realizó a partir del monitoreo del sistema de secado de arroz paddy en condiciones reales de operación en la empresa Federal S.A.S., durante su funcionamiento normal. La información fue consolidada a partir de registros internos del área de secamiento correspondientes a diferentes jornadas de operación en condiciones variables de humedad relativa (área perimetral) y parámetros de proceso.

El conjunto de datos recopilado incluye, para cada muestra analizada, el contenido de humedad inicial (ingreso del cultivo) y final del grano (Almacenamiento seguro), los puntos de humedad retirados, el tiempo total de secado, la humedad relativa del aire de secado y la tasa de secado expresada como porcentaje de humedad removida por unidad de tiempo (%/h). El contenido final de humedad del grano se conservó sin cambios, cercano al 13% con el fin de garantizar la comparabilidad entre los diferentes ensayos y aislar la incidencia de la humedad relativa sobre el sistema del proceso.

Previo al análisis, los datos fueron sometidos a un proceso de depuración y verificación orientado a asegurar su coherencia y consistencia. Este proceso incluyó la revisión de valores atípicos, la validación de rangos operativos y la verificación de la correspondencia entre los tiempos de secado y los puntos de humedad retirados. Una vez validados, los datos fueron organizados en una base estructurada para su análisis cuantitativo.

El análisis de los datos se consolido conforme a técnicas de estadística descriptiva y análisis comparativo, con el objetivo de identificar tendencias y relaciones entre la humedad relativa y la tasa de secado del arroz paddy. Los resultados alcanzados fueron contrastados con los modelos cinéticos de secado reportados en la literatura, tales como los modelos de Newton, Page y Henderson–Pabis, con el fin de evaluar la coherencia entre el comportamiento observado en condiciones industriales reales y las tendencias teóricas descritas en estudios previos (Page, 1949; Iguaz et al., 2003; Henderson & Pabis, 1961).

El enfoque adoptado permitió integrar los resultados de la revisión bibliográfica con la evidencia empírica obtenida en el contexto industrial de Federal S.A.S., facilitando la identificación de implicaciones operativas relevantes y estableciendo un soporte estable para la formulación de medidas de mejora orientadas a la optimización del

proceso de secado desde una perspectiva de productividad, eficiencia energética y calidad del grano.

El respectivo tamaño de la muestra considerado en este estudio, correspondiente a 20 registros operativos del proceso de secado (secamiento) de arroz paddy en Federal S.A.S., se definió en función del carácter aplicado e industrial de la investigación, dado que el objetivo o finalidad del estudio no es realizar inferencias estadísticas poblacionales, sino analizar el comportamiento operativo del proceso bajo condiciones reales de funcionamiento, el número de registros seleccionados resulta adecuado para identificar tendencias consistentes y evaluar la incidencia de la humedad relativa sobre la tasa de secado, adicionalmente, las muestras analizadas corresponden a condiciones operativas comparables, con un contenido de humedad final constante, lo que permite separar el efecto de la variable de interés y garantizar la coherencia del análisis. Este enfoque es consistente con estudios de secado industrial de granos reportados en la literatura, donde conjuntos de datos de tamaño similar han sido empleados para el análisis cinético y selección de alternativas operativas en contextos reales de producción.

RESULTADOS

1. Síntesis general del comportamiento del sistema de secado

La revisión global de los registros operativos del sistema de secado de arroz paddy en Federal S.A.S. evidencia una relación inversa clara entre la humedad relativa y la tasa de secado del grano bajo condiciones reales de operación industrial. El conjunto de datos analizado, correspondiente a 20 registros operativos, muestra que incrementos en el grado de humedad del aire se asocian sistemáticamente con una disminución en la rapidez de eliminación de humedad y con un aumento del tiempo total requerido para alcanzar el porcentaje de humedad final del grano.

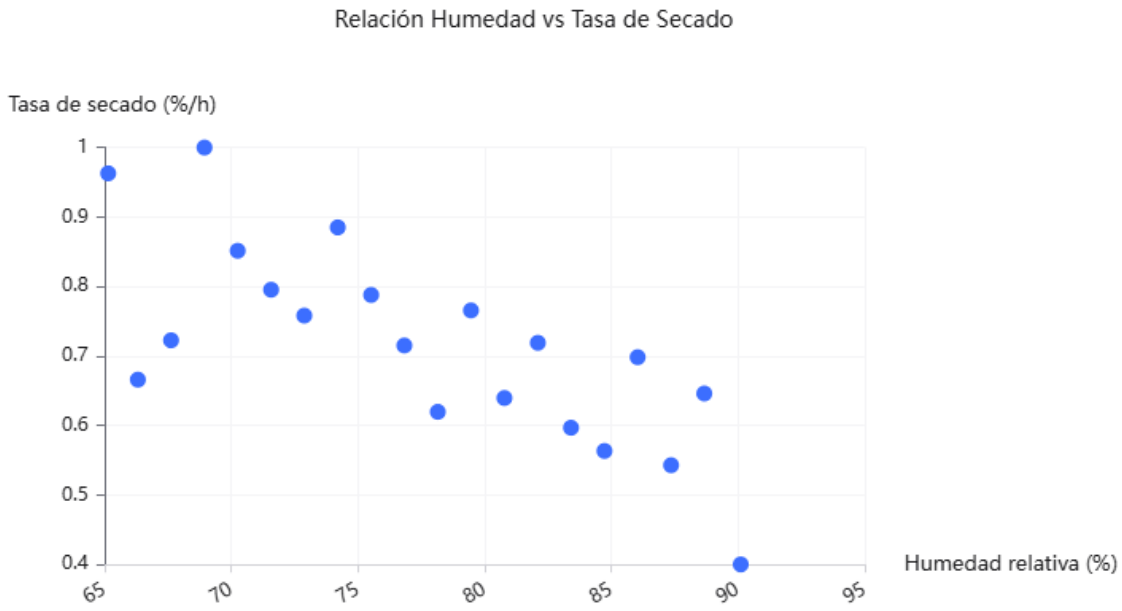
En particular, para valores de humedad relativa superiores al 85%, la tasa de secado promedio se sitúa por debajo de 0,50 %/h, alcanzando valores mínimos cercanos a 0,40 %/h. En contraste, cuando la humedad del aire se encuentra por debajo del 70%, la tasa de secado promedio supera el 0,80 %/h, con valores máximos cercanos a 1,00 %/h. Esta diferencia representa una variación superior al 100% en la velocidad o tiempo de secado, lo que pone de manifiesto el impacto significativo de la humedad relativa sobre el desempeño del proceso.

De manera consistente, el tiempo total de secado presenta un comportamiento inverso a la tasa de secado. Bajo condiciones de elevada humedad relativa, el tiempo necesario para alcanzar el % de humedad final del grano – humedad de almacenamiento seguro (≈13%) supera las 15 h en promedio, mientras que bajo condiciones de menor humedad relativa el tiempo de secado se reduce a valores inferiores a 10 h. Estos resultados confirman que la humedad relativa del aire constituye una variable crítica que condiciona la productividad del proceso de secado en la operación industrial.

2. Comportamiento de la tasa de secado bajo condiciones reales de operación

Con el fin de evaluar la incidencia de la humedad relativa sobre el desempeño del proceso, se analizó la relación entre la humedad relativa y la tasa de secado observada en cada registro operativo. La **Grafica 1** muestra la dispersión entre ambas variables.

Grafica 1. Relación humedad relativa vs Tasa de secado



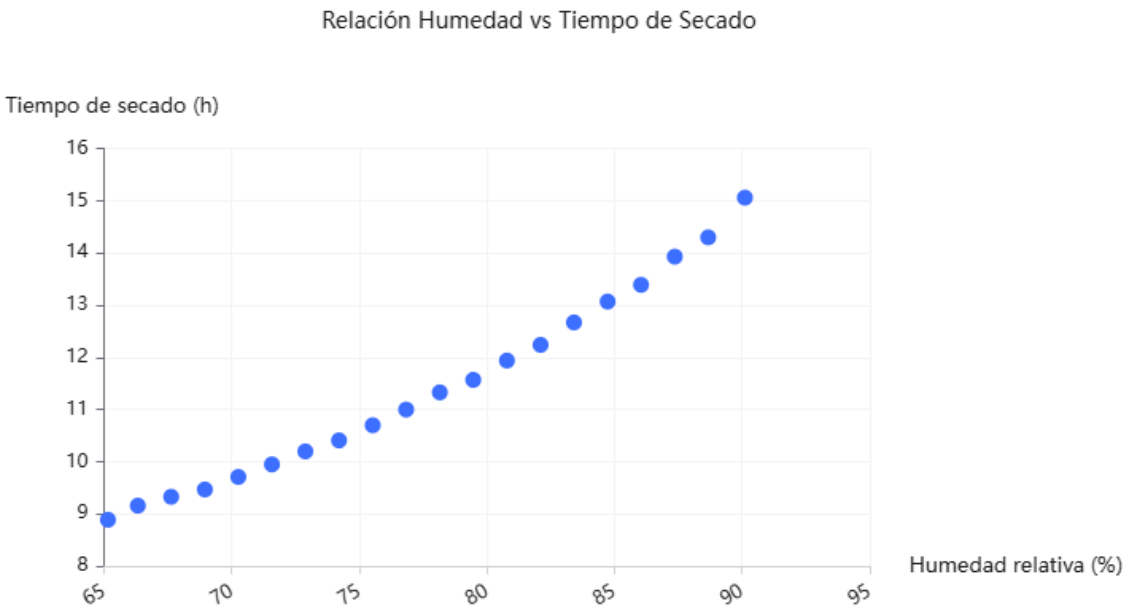
El análisis visual de la dispersión evidencia una **tendencia inversa clara** entre la humedad relativa y la tasa de secado del arroz paddy. A medida que dicha humedad aumenta, la tasa de remoción de humedad del grano se tiende a reducir, lo que confirma el efecto limitante que ejerce esta variable sobre la transición de masa durante el secado convectivo.

En condiciones de humedad relativa elevadas, cercanas o superiores al 85 %, se observaron tasas de secado cercanas a **0,40 %/h**, mientras que en condiciones de humedad relativa inferiores a 70 % las tasas de secado alcanzaron valores cercanos a **1,00 %/h**. Estos resultados evidencian que la humedad relativa ambiental puede modificar significativamente la velocidad del proceso de secado en condiciones industriales reales.

3. **Relación entre humedad relativa, tiempo de secado y puntos de humedad removidos**

El análisis de los registros operativos también permitió identificar una relación directamente proporcional entre la humedad relativa, tanto del área como de la mezcla y el tiempo total requerido para alcanzar el contenido de humedad final del grano (humedad de almacenamiento seguro). La **Grafica 2** presenta la relación entre ambas variables.

Grafica 2. Relación Humedad relativa vs Tiempo de secado



Los resultados indican que en condiciones de humedad relativa elevada el tiempo requerido para finalizar el respectivo secado tiende a incrementarse de manera significativa, en los registros analizados, los tiempos de secado oscilaron aproximadamente entre **8,9 y 15 horas**, observándose los valores más altos en condiciones de mayor humedad relativa ambiental.

Este comportamiento confirma que la humedad relativa constituye una variable crítica dentro del control operativo del proceso de secado industrial, ya que afecta simultáneamente el índice de secado, la duración del proceso y la eficiencia energética del sistema.

4. Comparación del comportamiento observado con modelos cinéticos de secado

El comportamiento observado en los datos operativos de Federal S.A.S. es coherente con las tendencias descritas por los modelos cinéticos de secado ampliamente reportados en la literatura, tales como los modelos de Newton, Henderson, entre otros, en los que la constante de secado disminuye a medida que se aumenta la humedad relativa, como resultado de la reducción del gradiente de potencial necesario para la migración de masa desde la parte central del grano (paddy verde) hacia el ambiente o periferia del área.

Si bien los modelos mencionados han sido desarrollados principalmente bajo condiciones controladas de laboratorio, los resultados evidenciados en este estudio corroboran que las tendencias teóricas se mantienen en contextos industriales reales, aunque moduladas por la variabilidad ambiental y las restricciones propias del sistema productivo.

5. Implicaciones operativas observadas en el proceso de secado

Desde una panorámica operativa, los resultados ponen en evidencia que la variabilidad de la humedad relativa tiene un impacto directo en el desempeño del proceso de secado. Bajo escenarios de alta humedad relativa, se observan menores tasas de secado y mayores tiempos de proceso, lo que puede derivar en una disminución de la productividad del sistema y en un incremento del consumo energético específico, al requerirse un mayor consumo de energía térmica para remover la misma cantidad de humedad del grano.

Estos hallazgos priorizan considerar la humedad relativa no únicamente como una condición ambiental externa, sino como un parámetro crítico de control dentro del proceso de secado convectivo. La evidencia obtenida en Federal S.A.S. demuestra que la gestión adecuada de esta variable es fundamental para garantizar la estabilidad operativa del proceso, optimizar los tiempos de secado y afianzar la calidad del producto final (paddy seco almacenado. Los valores detallados de humedad relativa, tiempo de secado y tasa de secado se presentan en el **Anexo A.**

DISCUSIÓN

Los resultados alcanzados a partir del análisis de los datos operativos del sistema productivo de secado de arroz paddy verde en Federal S.A.S. confirman, en condiciones reales de operación industrial, la influencia determinante de la humedad relativa sobre la dinámica y/o velocidad de secado, la disminución de la tasa de secado observada bajo escenarios de elevada humedad relativa concuerda con los principios fundamentales y base asociativa del flujo de masa y energía, según los cuales la reducción de la diferencia de presión de vapor entre el grano y el aire que circula en el sistema, limita la velocidad de eliminación de humedad (Mujumdar, 2014).

La evidencia empírica recopilada en Federal S.A.S. muestra que, bajo condiciones de elevada humedad relativa, la tasa de secado puede descender hasta valores cercanos a 0,40 %/h, lo que implica un incremento significativo en el tiempo total requerido para llegar al contenido de humedad final del grano, este comportamiento es consistente con lo reportado por los modelos cinéticos clásicos de secado, tales como los de Newton, Page y Henderson - Pabis, en los cuales la constante de secado disminuye a medida que se aumenta la humedad relativa (Iguaz et al., 2003). No obstante, a diferencia de los estudios desarrollados bajo condiciones controladas, los resultados de este trabajo reflejan la complejidad adicional asociada a la variabilidad ambiental y a las restricciones operativas propias de un sistema industrial en funcionamiento continuo.

Desde una perspectiva productiva, la prolongación de los tiempos de secado observada bajo escenarios de elevada humedad relativa tiene implicaciones directas sobre la capacidad operativa del molino. Mayores tiempos de ocupación de las albercas y/o patios inclinados reducen el volumen de arroz paddy que puede ser procesado por unidad de tiempo, afectando la programación de las etapas posteriores de almacenamiento y molienda, este efecto coincide con hallazgos recientes que destacan que la variabilidad climática sigue siendo uno de los principales elementos limitantes de la eficiencia en sistemas de secado industrial de granos, especialmente en regiones tropicales y subtropicales (Zare & Chen, 2022).

En términos de eficiencia energética, los resultados dejan observar que la disminución de la tasa de secado bajo condiciones de alta humedad relativa puede conducir a un incremento del consumo energético específico del proceso, al requerirse mayores tiempos de operación para remover una cantidad equivalente de humedad, estudios actuales han identificado que aun con tecnologías modernas de secado, la falta de control de variables ambientales como la humedad relativa del aire continúa generando ineficiencias energéticas significativas en sistemas industriales de secado de granos – en nuestro caso arroz paddy verde (Zhang et al., 2023; Singh & Pandey, 2025).

Desde la perspectiva de la calidad del producto, la necesidad de extender los tiempos de secado o de intensificar las condiciones operativas para compensar una elevada humedad relativa del aire puede aumentar el riesgo de daños físicos en el grano, a literatura clásica ha documentado que estrategias de secado agresivas o no controladas pueden inducir tensiones internas, fisuración y aumento del porcentaje de grano quebrado, afectando el rendimiento industrial y los costos de no calidad (Brooker et al., 1992; Bala, 2016). En este sentido, investigaciones recientes refuerzan la conveniencia de implementar estrategias de secado por etapas o secado intermitente como mecanismos efectivos para equilibrar eficiencia, consumo energético y preservación de la calidad del grano (Kumar et al., 2022; Liu et al., 2024).

La comparación entre los resultados obtenidos en Federal S.A.S. y los estudios recientes permite afirmar que, a pesar de los avances en tecnología de equipos y sistemas de secado, la gestión de la humedad relativa del aire continúa siendo un desafío central para la industria arrocera. Investigaciones actuales enfatizan que la adopción de estrategias de control del aire de secado y el uso de indicadores operativos para la toma de decisiones siguen siendo aspectos críticos para mejorar el desempeño del proceso en condiciones reales de operación (Zare & Chen, 2022; Singh & Pandey, 2025).

En conjunto, la discusión de los resultados evidencia que la humedad relativa, en este caso de la mezcla de humedad que ingresa al proceso, debe ser considerada un parámetro crítico de control dentro del proceso de secado convectivo de arroz paddy. La experiencia de Federal S.A.S. confirma que una gestión más rigurosa de esta variable, integrada al control del caudal y la temperatura del aire que ingresa a las baterías de secado, puede contribuir de manera oportuna a mejorar la eficiencia productiva, energética y la calidad del grano, estos hallazgos refuerzan la necesidad de avanzar hacia esquemas de secado industrial más controlados y adaptativos, especialmente en entornos caracterizados por alta variabilidad climática.

Desde una perspectiva de toma de decisiones operativas, los resultados obtenidos permiten establecer criterios claros para la gestión del proceso de secado en Federal S.A.S. En particular, los rangos identificados de humedad relativa del ambiente y su impacto sobre la tasa de secado proporcionan una base objetiva para definir límites operativos, priorizar ajustes en la mezcla de aire y anticipar escenarios de baja productividad. Este enfoque orientado a datos reales fortalece la capacidad de planificación del proceso y contribuye a una gestión más eficiente y preventiva del secado industrial del arroz paddy.

PROPUESTAS DE MEJORA Y OPTIMIZACION EN EL SISTEMA DE SECADO – SECAMIENTO, DE ARROZ PADDY VERDE

Con base en los hallazgos obtenidos y su análisis a la luz de la literatura científica, se proponen a continuación una serie de acciones orientadas a optimizar el sistema de secado (secamiento) de arroz paddy verde en Federal S.A.S. Estas propuestas no buscan sustituir el método de secado actualmente empleado, sino fortalecer su desempeño mediante un mayor control de las variables críticas, con la finalidad de mejorar la productividad, la eficiencia global de equipos, la calidad del grano y la competitividad del proceso.

1. Fortalecimiento del control de la humedad relativa de ingreso a las baterías de secado

Los resultados del estudio evidencian que la humedad relativa del ambiente constituye una de las variables más influyentes sobre la tasa de secado en condiciones reales de operación. En este sentido, se propone implementar un control sistemático de la humedad relativa (ingreso a las baterías de secado), considerando no únicamente las condiciones ambientales externas, sino la humedad relativa de la mezcla de aire que ingresa efectivamente al proceso.

Para ello, se sugiere:

- Monitorear de manera continua la humedad relativa y la respectiva temperatura del aire y/o ambiente en el punto de ingreso a las albercas y/o patios inclinados.
- Se recomienda establecer rangos operativos de referencia para la humedad relativa (ingreso a albercas de secado), idealmente entre **30 y 40%**, de acuerdo con la literatura y los resultados obtenidos en campo. Asimismo, se sugiere definir límites de control y planes de acción operativa cuando la humedad relativa del aire supere los valores establecidos, con el fin de prevenir reducciones significativas en la tasa de secado y aumentos innecesarios en los tiempos de proceso (Mujumdar, 2014; Bala, 2016).
- Definir límites de control y acciones correctivas cuando la humedad relativa del aire supere los valores establecidos, con el fin de evitar reducciones significativas en la tasa de secado.

2. Optimización de la mezcla de aire y del caudal de secado

Dado que el aire de secado utilizado en **Federal S.A.S.** resulta de la mezcla entre aire seco proveniente del horno ciclónico y aire ambiente, se propone optimizar la relación de mezcla como estrategia para mitigar los efectos negativos de una alta humedad relativa ambiental. Un ajuste adecuado de esta relación permitiría mejorar la capacidad de arrastre de humedad del aire sin necesidad de incrementar de manera significativa la temperatura de secado, reduciendo así el consumo energético específico.

De manera complementaria, el control del caudal de aire se identifica como un factor clave para mejorar el desplazamiento de masa durante el sistema de secado. Un caudal adecuado favorece la renovación del aire en contacto con el paddy verde (grano), manteniendo una diferencia de potencial favorable para la eliminación de humedad. En este contexto, se recomienda evaluar el desempeño del sistema de ventilación y establecer protocolos operativos que ajusten el caudal de aire en función al % de humedad relativa y del % de humedad inicial del grano (Brooker et al., 1992).

3. Implementación de curvas de secado seguras y secado por etapas

Con la finalidad de preservar la integridad física del grano y minimizar defectos asociados al secado (Daño por calor, fisura entre otros), se propone la adopción de curvas de secado seguras, basadas en un enfoque por etapas, este enfoque puede incluir una fase inicial de presecado, seguida de una etapa de secado principal y una etapa final de igualación o reposo (tempering), que permita la redistribución interna de la humedad en el grano.

La implementación de un secado intermitente o por etapas contribuiría a reducir tensiones internas en el grano, disminuir el riesgo de fisuración y mejorar la uniformidad del contenido de humedad final, esta estrategia resulta particularmente relevante bajo condiciones de alta humedad relativa ambiental, donde la tentación de incrementar la severidad del secado puede comprometer la calidad del producto.

4. Integración de indicadores de desempeño del proceso de secado

Para consolidar las mejoras propuestas y facilitar su gestión a nivel organizacional, se sugiere incorporar indicadores clave de desempeño (KPI) asociados al proceso de secado. Entre los indicadores recomendados se incluyen el nivel de tasa o dinamismo de secado (%/h), el tiempo de secado por lote, el consumo energético específico (kWh/ton), el porcentaje de grano quebrado y los costos asociados al reproceso y la no calidad.

El seguimiento sistemático de estos indicadores permitiría estimar el impacto real de las mejoras implementadas, facilitar y priorizar la toma de decisiones y promover una gestión del proceso basada en data consolidada, de esta manera, el secado del arroz paddy dejaría de ser percibido únicamente como una operación técnica, para convertirse en un proceso estratégico en los procesos productivos de la compañía.

5. Consideraciones para la evolución del método de secado

Finalmente, a partir de todo lo observado y analizado en actual artículo, se plantea que la evolución del método de secado en Federal S.A.S. debe orientarse hacia un mayor nivel de control y estandarización del proceso, más que hacia la sustitución inmediata de la tecnología existente. Los resultados obtenidos evidencian que variables ambientales como la humedad relativa influyen de manera significativa en la velocidad y dinamismo de secado y en la eficiencia operativa del sistema, por lo que su gestión sistemática representa una oportunidad importante de mejora dentro del proceso productivo.

Desde este punto de vista, se propone una estrategia de implementación progresiva basada en tres niveles de intervención operativa, en una primera etapa, se recomienda fortalecer el **monitoreo sistemático de las variables críticas del proceso**, incorporando instrumentos de medición que permitan registrar de forma continua la temperatura del aire, el caudal de aire y la humedad relativa de la mezcla de aire que ingresa al sistema de secado (Utilizar termigrometros electrónicos, y estaciones meteorológicas). Esta información permitiría caracterizar con mayor precisión el comportamiento del proceso bajo diferentes condiciones climáticas y operativas.

En una segunda etapa, se estima y sugiere avanzar hacia el **control operativo de las condiciones ideales del aire de secado (ingreso a las baterías de secado)**, estableciendo rangos o límites de control que permitan mantener condiciones más estables durante el proceso, en particular, el control de la mezcla entre el aire caliente proveniente del horno ciclónico y el aire ambiente permitiría reducir la variabilidad de la humedad relativa de secado, favoreciendo una mayor eficiencia en la remoción de humedad en el respectivo grano.

Finalmente, en una tercera etapa, podría evaluarse la **implementación de estrategias de secado por etapas o secado intermitente**, las cuales han demostrado ser eficaces para mejorar la uniformidad del secado, reducir el consumo energético y disminuir el riesgo de fisuración del grano. Este tipo de estrategias permitiría adaptar el proceso de secado a las condiciones climáticas variables del entorno, manteniendo al mismo tiempo la estabilidad operativa del sistema.

De esta manera, la evolución del método de secado no se plantea como un cambio abrupto del sistema tecnológico existente, sino como un proceso gradual de mejora

continua, orientado a fortalecer el control del sistema productivo, optimizar el desempeño operativo y mejorar la productividad del sistema de secado dentro de la cadena de valor agroindustrial.

La implementación de estrategias de secado por etapas o secado intermitente no necesariamente reduce el tiempo total del proceso; sin embargo, puede contribuir a mejorar la uniformidad del secado, reducir las tensiones internas del grano y preservar la calidad molinera, especialmente en contextos industriales caracterizados por alta variabilidad de las condiciones ambientales.

CONCLUSIONES

El análisis integrado de la literatura científica y de los datos operativos reales del sistema de secado (secamiento) de arroz paddy verde en Federal S.A.S. permitió confirmar la incidencia determinante de la humedad relativa sobre la velocidad de secado en condiciones industriales, los resultados evidencian que incrementos en la humedad relativa reducen de manera significativa la tasa de secado, prolongan los tiempos de proceso y afectan el desempeño global del sistema, validando en un contexto real los comportamientos reportados en modelos cinéticos ampliamente utilizados en la literatura.

La evidencia de la operación real obtenida en Federal S.A.S. demuestra que bajo condiciones de elevada humedad relativa, la tasa de secado puede descender hasta valores cercanos a 0,40 %/h, lo que tiene implicaciones directas sobre la productividad del proceso, la eficiencia energética y la programación operativa del molino. Este hallazgo resalta la necesidad de considerar la humedad relativa del aire no únicamente como una variable ambiental externa, sino como un parámetro crítico de control dentro del proceso de secado convectivo.

Desde una perspectiva de calidad, el estudio pone de manifiesto que la gestión inadecuada de las variables del sistema secado, específicamente bajo escenarios de alta humedad relativa, puede aumentar el riesgo de defectos en el grano, tales como fisuración, aumento del porcentaje de grano partido y variabilidad en el contenido de humedad final (genera dispersión de humedad y daño general del grano), en este sentido, la adopción de curvas de secado seguras y estrategias de secado por etapas se presenta como una alternativa técnica efectiva para preservar la integridad del grano y reducir los costos asociados a la no calidad.

El análisis de la data y resultados obtenidos en campo y los modelos teóricos de secado evidencia la importancia de complementar los enfoques de modelación con datos operativos reales, especialmente en contextos industriales caracterizados por alta variabilidad climática y restricciones productivas, la integración de información empírica proveniente de Federal S.A.S. permitió validar y contextualizar los modelos cinéticos, fortaleciendo su aplicabilidad práctica y su utilidad como sistemas de apoyo en el momento de tomar de decisiones.

Finalmente, las propuestas de mejora planteadas en este estudio, orientadas al control de la humedad relativa (Tanto el ambiente, como el que ingresa a las baterías de secado), la optimización de la mezcla de aire, la implementación de secado por etapas y el seguimiento mediante indicadores de desempeño, constituyen lineamientos técnicos viables para la optimización del sistema productivo de secado de arroz paddy en Federal S.A.S. y en plantas con condiciones operativas similares. En conjunto, el estudio aporta evidencia científica aplicada que contribuye a fortalecer la productividad, la eficiencia energética y global de quipos, la calidad del producto y la eficiencia competitiva de la industria arrocera en entornos de operación reales.

REFERENCIAS

- (Bala, 2016) Drying and storage of cereal grains. Wiley Blackwell.
- (Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. 1992). Drying and storage of grains and oilseeds. Van Nostrand Reinhold.
- (Erbay, Z., & Icier, F. 2010). A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. Critical Reviews in Food Science and Nutrition.
- (Henderson, S. M., & Pabis, S. 1961). Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. Journal of Agricultural Engineering Research.
- (Iguaz, A., San Martín, M. B., Mate, J. I., Fernández, T., & Vírseda, P. 2003). Modelling effective moisture diffusivity of rough rice (Oryza sativa L.) during drying. Journal of Food Engineering.
- Mujumdar, A. S. (2014). Handbook of industrial drying (4th ed.). CRC Press.
- (Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. 2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.
- Page, G. E. (1949). Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. Purdue University.
- (Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., & Jirajindalert, A. 1997). Parboiling brown rice using superheated steam fluidization technique. Journal of Food Engineering.
- Zare, D., & Chen, G. (2022). Energy-efficient drying technologies for cereal grains: A review. Journal of Food Engineering.
- (Kumar, C., Karim, M. A., & Joardder, M. U. H. 2022). Intermittent drying of agricultural products: A review of recent advances. Drying Technology.

- (Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A. S., & Wang, S. 2023). Trends in drying of agricultural products: Energy efficiency and quality preservation. Trends in Food Science & Technology.

- (Liu, Y., Li, X., & Chen, Z. 2024). Effects of air humidity control on drying kinetics and quality of cereal grains. Biosystems Engineering.

- (Singh, R., & Pandey, R. 2025). Process control strategies for industrial grain drying under variable climatic conditions. Applied Thermal Engineering.

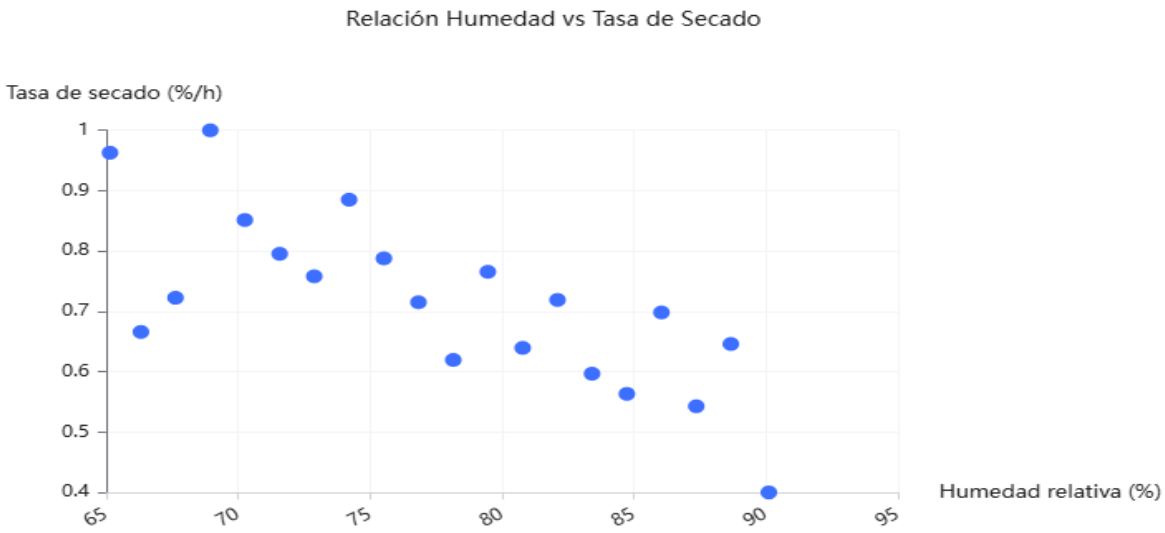
ANEXO A. Registros operativos del sistema de secado de arroz paddy verde en Federal S.A.S.

Descripción:
Este anexo presenta los registros operativos reales del sistema de secado de arroz paddy en Federal S.A.S. consolidados y utilizados para el análisis de la incidencia de la humedad relativa sobre la tasa de secado. Los datos corresponden a condiciones reales de operación industrial, con un contenido o % de humedad final constante del 13%. Las muestras están filtradas de menor a mayor tasa de secado.

Muestra	Humedad relativa del aire (%)	Humedad inicial del grano (%)	Humedad final del grano (%)	Humedad removida (%)	Tiempo de secado (h)	Tasa de secado (%/h)
6	90.12	19.026	13.0	6.026	15.71	0.38
8	88.68	22.238	13.0	9.238	18.34	0.50
2	87.37	20.562	13.0	7.562	16.02	0.47
7	86.05	22.349	13.0	9.349	17.61	0.53
13	84.74	20.363	13.0	7.363	13.07	0.56
16	83.42	20.561	13.0	7.561	12.67	0.60
1	82.11	21.799	13.0	8.799	12.24	0.72
5	80.79	20.636	13.0	7.636	11.94	0.64
19	79.47	21.857	13.0	8.857	11.57	0.77
14	78.16	20.020	13.0	7.020	11.33	0.62
4	76.84	20.866	13.0	7.866	11.00	0.72
15	75.53	21.429	13.0	8.429	10.70	0.79
3	74.21	22.212	13.0	9.212	10.41	0.88
11	72.89	20.732	13.0	7.732	10.20	0.76
12	71.58	20.913	13.0	7.913	9.95	0.80
18	70.26	21.266	13.0	8.266	9.71	0.85

Muestra	Humedad relativa del aire (%)	Humedad inicial del grano (%)	Humedad final del grano (%)	Humedad removida (%)	Tiempo de secado (h)	Tasa de secado (%/h)
10	68.95	22.468	13.0	9.468	9.47	1.00
9	67.63	19.741	13.0	6.741	9.33	0.72
17	66.32	19.100	13.0	6.100	9.16	0.67
20	65.00	21.558	13.0	8.558	8.89	0.96

Grafica 1. Relación humedad relativa vs Tasa de secado



Grafica 2. Relación Humedad relativa vs Tiempo de secado

