

**Dispersión del contenido de humedad del grano de
arroz evaluada con el medidor Kett PQ510 y su
relación con la eficiencia del secado en la
industria arrocera**

Alejandro José Morales Quirós

Práctica dirigida presentada para optar al título profesional de
Ingeniero Agrónomo con el grado académico de
Licenciado en Agronomía

Escuela de Agronomía
Facultad de Ciencias Agroalimentarias
Universidad de Costa Rica

2013

**Dispersión del contenido de humedad del grano de arroz evaluada
con el medidor Kett PQ510 y su relación con la eficiencia del
secado en la industria arrocera**


Alejandro José Morales Quirós

Práctica dirigida presentada para optar al título profesional de Ingeniero
Agrónomo con el grado académico de
Licenciado en Agronomía



Ramiro Alizaga López, M.Sc.

Director de Práctica



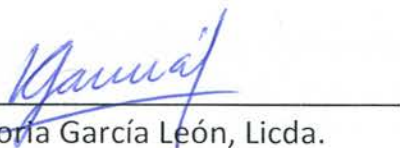
Jorge Herrera Quirós, M.Sc.

Miembro del Tribunal



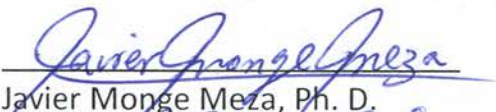
Adriana Murillo Williams, Ph. D.

Miembro del Tribunal



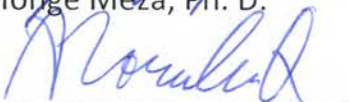
Victoria García León, Licda.

Miembro del Tribunal



Javier Monge Meza, Ph. D.

Director de Escuela



Alejandro José Morales Quirós

Sustentante

San José, 12 de diciembre del 2013

Dedicatoria

A Dios

A la memoria de mis abuelos

A mi madre

Reconocimientos

Mi más sincero agradecimiento al M. Sc. Ramiro Alizaga López, cuya dirección y apoyo fue invaluable para el desarrollo de esta investigación y cuya orientación ayudó a llevar este trabajo a un término satisfactorio.

Al M. Sc. Jorge Herrera Q., cuya guía y sabios consejos fueron sumamente valiosos a lo largo de todo este proceso.

A la Dra. Adriana Murillo W. por su apoyo en todo momento, por su confianza en mí y por sus acertadas intervenciones.

A la Licda. Victoria García L., por su ayuda y valiosas sugerencias que ayudaron a mejorar este trabajo.

A los compañeros del CIGRAS por su valiosa amistad y por la ayuda que me brindaron a lo largo de esta investigación.

A CONARROZ por confiarme la administración y desarrollo de este proyecto y por proporcionarme las herramientas para llevarlo a cabo. Agradecer especialmente al Ing. Roger Umaña Román y los compañeros del laboratorio por sus consejos.

A la industria arrocera Coopeliberia R.L. por permitirme realizar este trabajo en sus instalaciones. Al Ing. Erick Villalobos por su iniciativa, sus acertadas intervenciones y el apoyo a proyectos de investigación como este. A los compañeros del laboratorio y de secado de esta industria por su amistad y su valiosa colaboración sin la cual este trabajo no habría sido posible.

A mi familia y amigos por sus palabras de ánimo y su apoyo incondicional.

A María Fernanda por su ayuda en muchos aspectos de este trabajo, su apoyo aún en los momentos más difíciles y su fe en mí.

Índice general

Reconocimientos	v
Resumen	1
Introducción	2
Revisión de literatura	4
Morfología y desarrollo de la panícula de arroz.....	4
Humedad y dispersión de cosecha	4
Tipos de agua en el grano.....	5
Determinación del contenido de humedad	6
Secado industrial	7
Atemperado.....	8
Metodología	10
Resultados y Discusión	15
Verificación del Kett PQ-510	15
Dispersión de humedad en los granos de arroz a la cosecha y su relación con el rendimiento y calidad final.....	20
Evaluación de la eficiencia de la secadora recíclca con base en los datos del contenido de humedad del grano obtenidos con el determinador de humedad Kett PQ-510	26
Conclusiones.....	33
Anexos	34
Literatura citada	37

Resumen

La presente investigación se realizó en la industria arrocera Coopeliberia R.L., ubicada en la provincia de Guanacaste, en los laboratorios del Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) de la Universidad de Costa Rica (U.C.R) y el Laboratorio de Control de Calidad de la Corporación Arrocera Nacional (CONARROZ).

Los objetivos fueron determinar la aplicabilidad del determinador de humedad de granos individuales Kett PQ-510, para la toma de decisiones con respecto a variables fundamentales como el atemperado durante el proceso de secado de granos de arroz, evaluar las diferencias entre variedades en cuanto a la dispersión de humedad en los granos a la cosecha, así como asociar la dispersión de humedad con los rendimientos de molino y calidad final del arroz. También se realizó la verificación de este equipo relacionando los datos con el método directo de determinación de humedad del horno de convección y con el medidor Dickey John GAC 2100.

De acuerdo con los resultados obtenidos con el método directo de determinación de humedad y con el Dickey John GAC 2100, el medidor Kett PQ510 es muy confiable para la determinación del contenido de humedad de granos de arroz en granza. También se determinó que con humedades de cosecha superiores a 16 %, a menor dispersión de humedad entre los granos, mayor es el rendimiento de grano entero. Además se observó que la dispersión de humedad no está directamente relacionada con el contenido de humedad del grano y que la dispersión ideal al momento de la cosecha es de aproximadamente 1,0 %.

La información obtenida con el medidor de humedad PQ510 muestra que la secadora recíclica o intermitente permite reducir la dispersión de humedad del grano que viene del campo hasta niveles adecuados de dispersión para almacenarlo y conservar la calidad del mismo.

Introducción

El arroz es básico en la dieta de más de la mitad de la población mundial. Más de 3,5 billones de personas dependen del arroz para satisfacer al menos el 20 % de su demanda calórica diaria (IRRI 2013).

En la mayoría de los países en desarrollo, la situación del arroz está estrechamente relacionada con la seguridad y política alimentaria. Sin embargo, se calcula que para el 2015 habrá un déficit de 4 millones de toneladas de arroz en Latinoamérica (IRRI 2013). Costa Rica es uno de los países que presenta esta situación, con el agravante de que en los últimos años se ha experimentado una disminución del área dedicada al cultivo del arroz, principalmente por políticas deficientes en cuanto a la seguridad alimentaria del país (CONARROZ 2012).

En la temporada 2011/2012 se observó una reducción de 9,93 % en la producción de granza seca y limpia, con respecto al periodo anterior, mientras que el consumo aparente de arroz pilado aumentó en 6,65 % con un consumo per cápita de 53,7 kg. La producción total para el periodo 2011/2012 fue de 261 644 toneladas métricas de granza seca y limpia, en el cual 46,92 % de la producción correspondió a la región Chorotega, 21,08 % a la Huetar Norte, 16,70 % a la región Brunca, 12,44 % a la Pacífico Central y 2,86 % a la Huetar Atlántica (CONARROZ 2012).

Las principales variedades sembradas durante el periodo 2011/2012 fueron: Palmar 18 con 35 140 ha, Puita INTA CL con 11 052 ha, CFX 18 con 9 092 ha, CR 5272 con 8 014 ha, Aceituno 25-40 con 4 727 ha, CR 4477 con 3 857 ha, San Juan con 1 014 ha, Curime con 755 ha y Fedearroz 50 con 651 ha (CONARROZ 2012).

Actualmente, hay 15 agroindustrias inscritas ante CONARROZ, la mayoría de las cuales se encuentran en la región Chorotega y Pacífico Central. Uno de los principales problemas que enfrentaron tanto industriales como productores en el año arrocero 2011-2012 fue la insuficiencia en infraestructura y la relativa ineficiencia de los sistemas de secado y almacenamiento, debido a que en el periodo anterior se registraron producciones récord y los inventarios de la mayoría de las industrias se saturaron, por lo que muchos productores tuvieron problemas para colocar su cosecha (CONARROZ 2012). A raíz de esta situación, algunas agroindustrias arroceras realizaron esfuerzos para mejorar y modernizar su capacidad de recibo y secado.

Una mayor eficiencia en el secado se convirtió en prioridad para las industrias. Utilizar metodologías que permitieran mantener la calidad de campo de la granza, haciendo uso de temperaturas adecuadas en combinación con tiempos apropiados por ciclo de secado, cobró importancia para no aumentar el quebrado final del grano, así como para evitar el manchado del arroz a causa de temperaturas extremas. Algunas arroceras también realizaron inversiones importantes para adquirir secadoras que proporcionaran tiempos

de reposo adecuados al grano entre cada ciclo de secado con el objetivo de que la humedad dentro y entre los granos se distribuyera homogéneamente, haciendo más eficiente el secado y evitando el sobrecalentamiento de la granza.

Una de las industrias que realizó esta inversión fue Coopeliberia R.L., la cual adquirió secadoras modernas de tipo recíclico o intermitente. En este tipo de secadoras el grano ingresa por la parte superior, pasa por un periodo corto de secado activo con aire caliente (60 °C - 70 °C) y finalmente se descarga en la parte inferior donde cae al elevador que la lleva de nuevo a la tolva superior. En esta tolva el grano reposa y se homogenizan la temperatura y la humedad, para luego pasar de nuevo por la cámara de secamiento (Agrimaq S.R.L. s.f.).

Un aspecto importante a considerar es el uso de métodos que permitan tener un mejor diagnóstico sobre la condición de campo del grano al llegar a la industria, como es el caso de la dispersión de humedad, que según Bautista *et al.* (2004), Bautista y Siebenmorgen (2008), Siebenmorgen *et al.* (2011, 1998, 1992), tiene un efecto directo en la calidad y el rendimiento industrial del grano. La dispersión o desviación estándar de humedad se refiere a la diferencia de humedad que se da entre los granos individuales ocasionada principalmente por la maduración escalonada de dichos granos (Gaviria y Gaviria 2011). Según Siebenmorgen *et al.* (2011) la dispersión de humedad ayuda a explicar los rendimientos finales de molino, ya que permite determinar en un lote la proporción de granos inmaduros y propensos a quebrarse, así como el porcentaje de granos “secos” con mayor propensión a fisurarse en el campo. Gaviria y Gaviria (2011) también mencionan que la dispersión de humedad tiene efecto sobre la eficiencia de otros procesos como el descascarado, que se facilita cuando la humedad es homogénea en la masa de granos.

El objetivo de este trabajo fue determinar la aplicabilidad del determinador individual de humedad de granos Kett PQ-510, en la toma de decisiones en cuanto a atemperado durante el proceso de secado intermitente de granos de arroz en granza con diferentes grados de dispersión de humedad de campo, así como determinar las diferencias entre variedades en cuanto a la dispersión de humedad a la cosecha y su efecto sobre el rendimiento de molino y la calidad industrial del arroz.

Los objetivos específicos de esta investigación fueron:

- Comparar los valores de contenido de humedad obtenidos entre el Kett PQ-510, el Dickey John GAC 2100 y el método directo del horno de convección.
- Determinar las diferencias entre variedades en cuanto a la dispersión de humedad en los granos a la hora de la cosecha y su relación con los rendimientos y la calidad final del arroz.
- Analizar la eficiencia de la secadora recíclica intermitente con base en los datos de contenido de humedad del grano obtenidos con el Kett PQ-510.

Revisión de literatura

Morfología y desarrollo de la panícula de arroz

El desarrollo de las macollas en una planta de arroz se da de forma escalonada a lo largo de 3 a 6 semanas (Kunze *et al.* 2004), la emergencia, floración y maduración de la panícula también se da de forma gradual (Holloway *et al.* 1995).

La panícula del arroz está compuesta por la base, el eje principal, ramas primarias y secundarias, pedicelos, gluma rudimentaria y espiguillas o inflorescencia. Desde la iniciación de la panícula hasta la emergencia de la misma o “cabecero” transcurren alrededor de 23 a 25 días. Cuando la panícula empieza a emerger fuera de la cuarta hoja u hoja bandera, también da inicio la antesis o floración en las espiguillas de la sección superior y paulatinamente continúa en las secciones inferiores conforme avanza el proceso de emergencia fuera de la hoja bandera. Por esa razón, toma de 7 a 10 días para que todas las espiguillas de una misma panícula completen la antesis y de 15 a 20 días para que se complete en todo un campo (Yoshida 1981).

La manera en que se desarrollan estos procesos de formación influye en la maduración del grano y ocasiona que a la hora de la cosecha existan grandes diferencias de contenido de humedad entre los granos de una misma panícula, planta y plantas de un mismo campo (Holloway *et al.* 1995, Siebenmorgen *et al.* 1992, Bautista *et al.* 2007).

Si a esto se le suma germinación, fertilización y riego dispar, mezcla de variedades, plagas, enfermedades y cualquier otro factor que afecte la maduración del grano, el ámbito de variación del contenido de humedad de los granos de un campo a la hora de la cosecha puede ser muy amplio (Gaviria y Gaviria 2011).

Humedad y dispersión de cosecha

Siebenmorgen *et al.* (1998) realizaron un estudio en cinco variedades de arroz de tipo largo, con el objetivo de determinar la distribución de humedad entre los granos de un mismo lote a la cosecha y comprobaron que las diferencias entre los contenidos de humedad de los granos son amplias y se incrementan conforme aumenta el contenido de humedad promedio. Esto representa un problema tanto para el productor de arroz como para el industrial, ya que dicha heterogeneidad significa que al momento de la cosecha se tendrán granos con alta humedad y granos con baja humedad.

Los granos con alta humedad son más delgados y débiles por lo que tienen mayor propensión a quebrarse durante la molienda (Siebenmorgen *et al.* 2007). Por el contrario, los granos con baja humedad son aquellos que se han dejado mucho tiempo en el campo

y son más propensos a fisurarse por readsorción de humedad en ambientes con alta humedad relativa (HR). Cuando el contenido de humedad se reduce por debajo de la humedad crítica de campo los granos readsorben humedad fácilmente, por lo que al verse expuestos a condiciones de lluvia o simplemente HR superior a 85 % readsorben humedad rápidamente en la superficie y se expanden. Sin embargo, debido a que la humedad requiere más tiempo para migrar hacia el centro del grano, este no se expande tan rápido y como consecuencia se produce tensión mecánica en la parte interior del mismo, que finalmente provoca la formación de fisuras (Siebenmorgen *et al.* 2011). Esta humedad promedio crítica generalmente es cercana a 16 % (Bautista y Siebenmorgen 2008).

La exposición del grano a altas humedades relativas puede presentarse inclusive a la hora de la cosecha o aún en la tolva o en el transporte del grano hasta la industria, al mezclarse granos con alta y baja humedad (Bautista y Siebenmorgen 2008). El reto es detectar el momento idóneo para la cosecha con base en la homogeneidad de la humedad del campo. En la literatura se menciona que existe un ámbito de humedad ideal de cosecha, que varía según la variedad, la zona y el manejo, entre otros, en el cual la desviación estándar o dispersión de humedad se mantiene a un nivel aceptable para que el rendimiento de grano entero no se vea afectado (Bautista y Siebenmorgen 2004, 2005; Siebenmorgen *et al.* 1992). Determinar este ámbito es difícil con los equipos de medición de humedad que se encuentran en la mayoría de las industrias, ya que estos solo determinan la humedad promedio, dato que es incompleto pues no indica si existen granos secos mezclados con granos con alta humedad (Gaviria y Gaviria 2011).

Tipos de agua en el grano

El agua presente en los granos se clasifica como:

- 1) **Agua de constitución:** Se encuentra combinada mediante enlaces químicos con los compuestos que forman la materia seca, en especial proteínas y carbohidratos y solo se puede remover bajo condiciones rigurosas (Brooker *et al.* 1974; Howard y Pixton 1974; Hlinka y Robinson 1954; citados por Alizaga 1981).
- 2) **Agua adherida:** Adherida físicamente al grano y se subdivide en dos tipos.
 - *Agua libre o absorbida:* depositada en la superficie del grano y ocupa los poros y espacios intergranulares en forma líquida o gaseosa. Es retenida débilmente por fuerzas de capilaridad y de tensión superficial. Posee las propiedades normales del agua libre y las moléculas del material absorbente sólo sirven de soporte (Castillo 1978; Haward y Pixton 1974; citados por Alizaga 1981).
 - *Agua adsorbida:* es agua unida más firmemente a la materia seca; las moléculas de agua interactúan con las del material adsorbente y en consecuencia se afectan sus propiedades. Este tipo de agua se mantiene unida por fuerzas físicas del tipo polar y fuerzas de Van der Waals. En este caso el agua está constituida por una capa de pocas moléculas de grosor, donde las

moléculas cercanas a la superficie del material están unidas más fuertemente y las fuerzas de atracción decrecen conforme la distancia desde la superficie aumenta (Mackay 1967; Haward y Pixton 1974; Castillo 1978; citados por Soto 1990).

No hay límites claros entre los diferentes tipos de agua presentes en el grano, de manera que no es posible separarlas categóricamente. El contenido de humedad del grano determinado con los medidores eléctricos de humedad se refiere principalmente al agua adherida (Soto 1990), por lo que no es posible determinar contenidos de humedad muy bajos (menores de 7 %) con los medidores indirectos (Alizaga 1981).

Determinación del contenido de humedad

Existen diversas formas de determinar la humedad de los granos, entre estas se encuentra el método directo de determinación de humedad del horno de convección, en el cual se determina el contenido de humedad de los granos por medio de la medición cuantitativa de la pérdida de agua en forma de vapor al aplicar calor en condiciones controladas (CIGRAS 2011, ISTA 2013). Este método es muy exacto, sin embargo las determinaciones de humedad se prolongan por varias horas y se requiere de equipo costoso (Gaviria y Gaviria 2011).

Comercialmente la humedad de los granos de arroz se determina con métodos indirectos en los que se usan medidores eléctricos que miden la humedad retenida en los granos a través de los cambios de conductividad/resistividad eléctrica o de capacitancia, ante la presencia de humedad (Gaviria y Gaviria 2011). Estos métodos son más prácticos y rápidos que el método directo, sin embargo no son tan exactos, por lo que la calibración de estos equipos siempre debe ser corroborada con el horno de convección (Gaviria y Gaviria 2011). La calibración correcta de estos medidores es de suma importancia en la industria, ya que de acuerdo con el resultado de humedad del grano se calcula el pago al productor y se toman decisiones sobre la estrategia de secado y de aireación en silos (De Dios 1996).

En los últimos años, se han introducido al mercado determinadores de humedad que, además de proporcionar la humedad promedio, también aportan el dato de dispersión de humedad en la masa de granos. Estos son equipos muy avanzados y su uso ha facilitado la investigación en el campo de la tecnología de cosecha y poscosecha de granos (Bautista *et al.* 2004, 2007; Baustista y Siebenmorgen 2000, 2005, 2008; Castillo-Niño 2003; Holloway *et al.* 1995; Kanai *et al.* 2013). El PQ-510 es uno de estos aparatos y es fabricado por la empresa japonesa Kett Electric Laboratory (Ediagro s.f.). La empresa japonesa Shizouka Seiki Co. Ltd. también fabrica determinadores individuales de humedad (CTR-500E, 800A, 800E) que han sido utilizados en muchas investigaciones en los Estados Unidos de América (Shizouka Seiki Co. s.f.).

Los determinadores de humedad como el Kett PQ-510 (Anexo 2), además de proporcionar el dato promedio de humedad de la muestra (resistencia), permite conocer la dispersión de humedad en la masa de granos, ya que determina el contenido de agua de cada grano que pasa por el sistema de rodillos magnetizados (Ediagro s.f.). Este medidor es capaz de proporcionar el dato de humedad desde 10 hasta 1000 granos en una muestra. Además aporta el dato de dispersión o desviación estándar de la humedad y el histograma de humedad de los granos individuales (Gaviria y Gaviria 2011).

El uso de un determinador de humedad como el Kett PQ-510 en la industria arrocera, permitiría conocer el dato de desviación estándar o dispersión de humedad de cosecha antes del ingreso del lote al proceso de secado. También contribuiría con información sobre la distribución de la humedad entre los granos conforme avanza el proceso de extracción de humedad en la secadora para reducir el riesgo de merma en la calidad del grano.

Secado industrial

El secado industrial del arroz se realiza básicamente bajo dos modalidades: 1) efectuando un secado continuo del grano mediante la exposición ininterrumpida de este al aire desecante hasta alcanzar la humedad final deseada, y 2) secado por etapas, donde el proceso se interrumpe cada vez que la humedad del grano se reduce entre dos y cuatro puntos porcentuales (Zeledón y Mata 1992).

Para cada una de estas modalidades existen muchas variantes. Para el secado continuo se utilizan secadoras verticales de caballetes, de columnas, de persianas, de flujo contracorriente, de flujo concurrente, de cascadas, horizontales de flujo cruzado, de flujo mixto así como de lecho plano fijo y fluido. Para el secado por etapas se usan secadoras con recirculación y estáticas (De Dios 1996).

Cada modalidad y tipo de secadora tiene sus ventajas y desventajas. En general, las secadoras que funcionan en forma continua son más eficientes energéticamente, pero no preservan tan bien la calidad del grano como las que realizan el secado por etapas (De Dios 1996). Sin embargo, la eficiencia de cada secadora es relativa ya que depende de varios factores como la humedad inicial del grano, la temperatura y velocidad de secado y el tiempo de permanencia o reposo (De Dios 1996).

La combinación correcta de temperatura y velocidad de secado permite preservar mejor la calidad del grano y aumenta la eficiencia del secado (De Dios 1996). Así, es posible aumentar la temperatura de secado si se reduce el tiempo de permanencia del grano en la cámara de secado y viceversa, sin incurrir en pérdidas por fisurado del grano (De Dios 1996). En relación con este tema, Zeledón y Mora (1987) realizaron un diagnóstico del secado industrial en cinco industrias arroceras de Costa Rica y determinaron una correlación positiva y altamente significativa entre el incremento de grano quebrado y la

temperatura de secado en sistemas de flujo continuo. Asociado a esto, también se encontró una correlación positiva entre la velocidad de secado y el incremento de grano quebrado.

Para la estrategia de secado también se toman en consideración la humedad inicial del grano, ya que influye en la capacidad de secado y calidad final del mismo. De acuerdo con los conceptos de transición vítrea (T_g), los granos con humedad alta (20 % a 24 %) son más blandos y flexibles a temperaturas bajas (23 °C a 35 °C). A medida que el grano pierde humedad es necesario aplicar una mayor temperatura para evitar que el grano pase al estado vítreo y se fisure, debido a la pérdida de elasticidad que lo hace más sensible al estrés mecánico y térmico durante el secado (Kunze *et al.* 2004).

No obstante, granos muy húmedos pueden ser expuestos a altas temperaturas, siempre que el tiempo de exposición sea corto, de esta forma se logra evaporar mayor cantidad de agua por ciclo sin calentar el grano en exceso (De Dios 1996).

El balance entre el tiempo de secado, temperatura y humedad inicial del grano es vital para evitar la creación de gradientes de humedad que provoquen el quebrado del grano al final del secado. Si el arroz se seca rápidamente hasta una humedad segura para almacenamiento y el secado es detenido cuando aún el gradiente de humedad en el grano es alto, es muy probable que el grano se fisure durante el almacenamiento (Kunze y Calderwood 2004). Para evitar la formación de estos gradientes dentro y entre granos es necesario un periodo de reposo para equilibrar las humedades en la masa de granos. Las secadoras por etapas con recirculación tienen la ventaja de que permiten preservar mejor la calidad del grano, gracias a los tiempos de reposo entre cada ciclo de secado (De Dios 1996).

Dispersiones de humedad altas a la salida del proceso de secado pueden dificultar el manejo y la conservación de la calidad del grano durante el almacenamiento. Si dentro de la masa de granos, que supuestamente se almacena a una humedad segura, existen granos con alta humedad, estos producirán humedad y calor, que con el tiempo provocará cambios en su color tornándose ambarinos y que promoverán el deterioro de los granos circundantes, los que a su vez propagarán el deterioro al resto del lote (Gaviria y Gaviria 2011).

Atemperado

El atemperado o reposo reduce el riesgo de que el grano secado con aire caliente hasta la humedad segura de almacenamiento, se fisure al exponerse a ambientes donde pueda reabsorber humedad (Kunze *et al.* 2004). Durante la operación de atemperado el grano no recibe aire caliente, lo que le permite equiparar las diferencias de temperatura entre el grano y el aire ambiente, así como minimizar el efecto de la humedad relativa ambiente, por lo que se evitan tensiones internas en el grano. De esta manera se mejora la

uniformidad de secado y se disminuye el riesgo de fisuras en el grano (De Dios 1996). Al respecto Kunze *et al.* (2004) indican que inmediatamente después del secado, el contenido de humedad en la superficie es menor que en el resto del grano por lo que es muy fácil que adsorba humedad, se expanda y provoque fisuras. Los autores concluyen que el atemperado provee una transición controlada y gradual al ambiente de almacenamiento y evita el quebrado.

Cnossen y Siebenmorgen (2000) mencionan que si el atemperado del grano de arroz se realiza a temperaturas superiores al límite de transición vítrea por un tiempo adecuado, se reducirán los gradientes de humedad del grano antes de que se cruce dicho límite, y de esta forma se evitará el estrés del cambio al estado vítreo que puede fisurar el grano al final del secado. Relacionado con este tema, Cnossen y Siebenmorgen (2000) realizaron un experimento en el que se extrajo 6 % de humedad en un solo pase con aire caliente a 60 °C. Luego de esto se detuvo el secado con aire caliente y se dejó reposar el grano por 160 min sin que se modificara la temperatura del grano. Finalmente los resultados demostraron que no hubo disminución en el rendimiento de grano entero.

Yang *et al.* (2002) comprobaron que al atemperar una variedad de arroz de tipo largo a 60 °C (por encima del límite de transición vítrea) por 60 min luego de un ciclo de secado de 20 min a 60 °C, era posible eliminar el 97% de los gradientes de humedad entre los granos.

Cnossen *et al.* (2003) compararon los tiempos de reposo necesarios para atemperar una variedad de grano largo y una de grano medio luego de un secado rápido. Los resultados demostraron que a la misma temperatura de atemperado (60 °C), la variedad de grano medio requirió 160 min de reposo para alcanzar un balance o gradiente adecuado de humedad, mientras que la variedad de grano largo solo requirió 80 min. En ambos casos, no se afectó el rendimiento de entero.

Metodología

Este trabajo se realizó con arroz recién cosechado durante el periodo arrocero 2012/2013. La evaluación de la dispersión de humedad, del proceso de secado industrial y el efecto de estos factores sobre la calidad industrial se realizó en la industria Coopeliberia R.L. en Liberia, Guanacaste. La verificación de los medidores se realizó en los laboratorios de Control de Calidad de la Corporación Arrocera Nacional (CONARROZ) y del Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS).

Verificación del medidor de humedad Kett PQ-510

En la primera fase se comparó los resultados del contenido de humedad del determinador de humedad de granos individuales Kett PQ-510 (Kett Electric Laboratory, Japón), con los resultados obtenidos con el método directo de determinación de humedad por medio del horno de convección mecánica de aire. De igual forma, se comparó el PQ-510 con el determinador indirecto de humedad Dickey John GAC 2100 (Dickey John Co., EE. UU.), ya que este es el más utilizado en la industria y es el determinador oficial del Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América.

Para realizar la verificación se utilizó lotes de arroz en granza de aproximadamente 2 kg de las variedades Puita INTA CL, Curime, CR5272, CFX-18 y Palmar 18, a los cuales se les determinó la humedad con porcentajes cercanos a 21 %, 19 %, 17 %, 15 %, 13 % y 11 %, tanto con el PQ-510, como con el horno de convección y el GAC 2100. Dichos contenidos de humedad se obtuvieron a través del secado de las muestras desde 21 % hasta 11 %, utilizando una secadora de laboratorio. De esta forma se elaboraron curvas que muestran la exactitud del método de determinación individual de granos, a través del uso del análisis de regresión (R^2).

Las muestras de arroz se obtuvieron directamente de un camión (escogido aleatoriamente) a su arribo a la industria Coopeliberia R.L. y se tomaron según el método de muestreo oficial descrito en el Reglamento Técnico de Arroz en Granza (MEIC 2008) y que se muestra en la Figura 1.

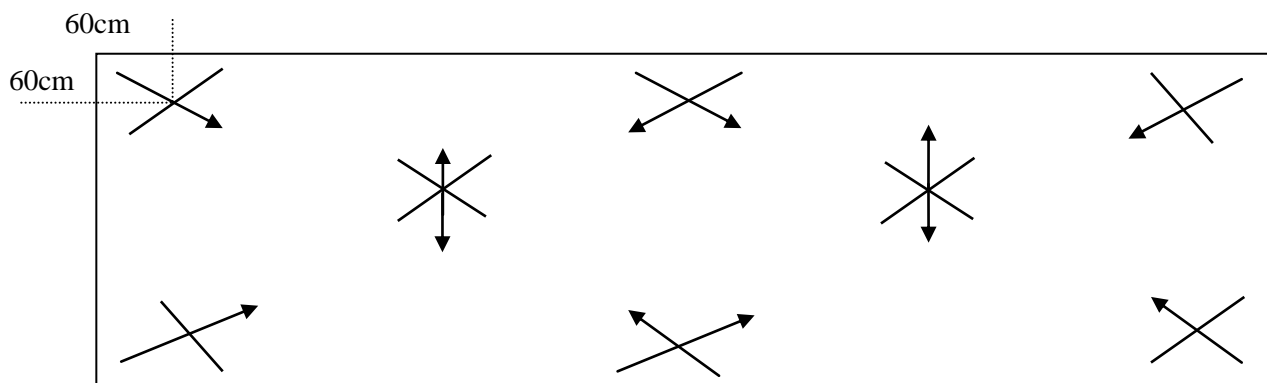


Figura 1. Esquema de muestreo para camiones de hasta 35 toneladas (RTCR 406-2007).

Una vez tomada la muestra de laboratorio, se colocó en bolsas de polietileno de 6 μm de espesor para evitar la pérdida de humedad, se cerraron y se trasladaron de inmediato en hieleras al Laboratorio de Control de Calidad de Conarroz.

Se utilizaron cuatro muestras de laboratorio de aproximadamente 1,5 kg libres de impurezas por cada variedad y nivel de humedad. Cada muestra se homogeneizó y dividió utilizando un divisor de precisión hasta obtener una submuestra de aproximadamente 250 g para la determinación de humedad con el medidor GAC 2100. Luego, esta misma submuestra se redujo con el divisor hasta aproximadamente 30 g para realizar la determinación individual de humedad de 100 granos en el PQ-510. La determinación de humedad de los 100 granos toma aproximadamente 30 segundos en completarse. Finalmente, la submuestra de 30 g se almacenó en recipientes herméticos y se transportó al CIGRAS para realizar la medición del contenido de humedad en el horno de convección, según el método oficial de determinación del contenido de humedad al horno (CIGRAS 2011).

La verificación del Kett PQ-510 culminó con un análisis de regresión para comparar las curvas de mejor ajuste (R^2) entre el método directo del horno y los determinadores de humedad PQ-510 y Dickey John GAC 2100.

Determinación de la dispersión de humedad de cosecha

En esta etapa se determinó la humedad de cosecha y la dispersión de humedad con que el arroz en granza ingresaba al proceso industrial de secado en la industria Coopeliberia R.L.

Esta industria cuenta con tres secadoras recílicas o intermitentes alimentadas por un mismo horno que utiliza la cascarilla del arroz como combustible y es manejado por medio de controles electrónicos que permiten mantener la temperatura de secado relativamente estable. Cada vuelta o ciclo completo en estas secadoras tiene una duración aproximada de 40 min a 60 min para lotes de aproximadamente 700 qq (32 toneladas). Estas secadoras trabajan con un caudal de aire entre 50 m^3/min y 60 m^3/min y la velocidad de secado es de aproximadamente uno o dos puntos porcentuales por hora, según los datos proporcionados por la industria y verificados a lo largo de esta investigación.

El promedio y desviación estándar de la humedad de cosecha se evaluó en lotes de arroz seleccionados al azar de los camiones que arribaban a la industria. Se realizaron tres repeticiones por cada lote de arroz. Se tomó muestras de las principales variedades sembradas e industrializadas en el país: Palmar 18, Puita INTA CL, CR-5272, CFX-18 y Aceituno 2540. Se procuró muestrear como mínimo cinco lotes por variedad, abarcando el mayor ámbito de humedades posible.

La unidad experimental para evaluar la humedad de cosecha fue una muestra de aproximadamente 2 kg de granza húmeda tomada luego del proceso industrial de prelimpieza y antes de iniciar el secado. A dicha muestra se le eliminaron las impurezas en el laboratorio y se homogeneizó y dividió para realizar la determinación de humedad en el Dickey John GAC 2100 y la dispersión de humedad de 100 granos con el Kett PQ-510. Luego de esto, se llevó hasta una humedad entre 11 % y 13 % con una secadora de convección de laboratorio y se determinó la calidad molinera según el Reglamento Técnico Nacional (MEIC 2008).

Determinación de la dispersión de humedad de granos durante el proceso industrial de secado

Para analizar la variación de la dispersión de humedad durante el proceso industrial de secado se seleccionaron al azar nueve lotes de la variedad Puita INTA CL y seis de Palmar 18. Una ventaja importante del procedimiento de secado utilizado es que se acostumbra secar cada camión individualmente, lo que facilitó el análisis del comportamiento de secado de las variedades.

Durante el proceso de secamiento, la primera muestra se tomó antes de iniciar el secado y luego se tomó una muestra cada dos horas hasta que el grano alcanzó la humedad segura de almacenamiento (11 % a 13 %). En cada etapa se determinó la humedad con el GAC 2100 y la dispersión de la misma con el PQ-510. Se realizaron tres repeticiones sobre submuestras de 2 kg cada una.

Determinación del rendimiento de grano entero y factores de calidad durante el proceso industrial de secado

Para determinar la evolución del rendimiento de grano entero (índice de pilada) a lo largo del proceso de secado, se seleccionaron al azar tres lotes de la variedad Puita INTA CL y tres de Palmar 18.

El método de muestreo durante el proceso industrial de secado se realizó de la misma forma como se efectuó la determinación de la dispersión de humedad. A cada muestra tomada para realizar las pruebas de molino, también se le determinó el contenido de humedad y la dispersión de humedad para complementar la toma de datos.

Las muestras parcialmente húmedas que se extrajeron cada dos horas durante las diferentes etapas del proceso de secado industrial, se terminaron de secar en la secadora del laboratorio de la industria hasta alcanzar una humedad entre 11 % y 13 %, apropiada para realizar las pruebas de molinería. Es importante mencionar que conforme avanzaba el proceso de secado industrial, menor era el tiempo requerido para secar las muestras en la secadora de laboratorio, la cual opera a una temperatura máxima de 38 °C y una

velocidad de secado de uno a dos puntos porcentuales por hora, mismo parámetros utilizados en los laboratorios de calidad de la industria.

Una vez que las muestras alcanzaron un contenido de humedad menor de 13 %, se dejaron reposar por al menos 12 h en bolsas de polietileno cerradas antes de realizar las pruebas de molino en el laboratorio de la industria.

A la primera muestra (antes del secado) y a la última (final del secado) de cada uno de los lotes de las variedades Puita INTA CL y Palmar 18, también se les determinó el porcentaje de granos dañados, manchados y dañados por calor, con el propósito de determinar si el proceso de secado influyó en alguno de estos factores de calidad.

Para determinar los rendimientos de molino y los factores de calidad, primero se pesó 1000 g de granza seca y limpia de cada submuestra en una balanza granataria con una precisión de 0,1 g, luego se realizó el descascarado y seguidamente el pilado en un pulidor McGill No. 3 (Seedburo Equipment Co., EE. UU.). La calibración de todos los equipos utilizados en el laboratorio de la industria fue previamente verificada. El arroz recién pilado se dejó reposar por 20 min en un recipiente hermético y luego se procedió a pesar en la balanza granataria (MEIC 2008). El cálculo del rendimiento de pilada se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Rendimiento de pilada (Rp)} = \frac{\text{AP} \times 100}{\text{Ma}}$$

en donde:

AP es la masa del arroz pilado en g

Ma es la masa de la muestra de ensayo de 1000g ± 0,1g

(MEIC 2008)

Luego se procedió a subdividir la muestra de arroz pilado con un divisor de precisión, hasta obtener una muestra de ensayo de mínimo 40 g para determinar la relación de grano entero. El grano entero se define como aquel grano de arroz pilado cuya longitud es igual o mayor a tres cuartos de la longitud del grano sin quebraduras en la muestra (MEIC 2008). El cálculo del rendimiento de grano entero se realizó de la siguiente manera:

$$\text{Rendimiento de grano entero} = \frac{\text{E}}{\text{Ma}} \times \text{Rp}$$

en donde:

E es la masa del grano entero en g

Ma es la masa de la muestra de ensayo de arroz pilado de 40g ± 0,1g

Rp es el rendimiento de pilada

(MEIC 2008)

A la primera (humedad de cosecha) y última muestra (final del secado industrial) de cada uno de los tres lotes analizados de Palmar 18 y Puita INTA CL, se les determinó

adicionalmente el porcentaje de granos dañados por calor en una muestra de ensayo de un peso mínimo de 500 g sin puntilla obtenida por medio del divisor de precisión (MEIC 2008). También se determinó el porcentaje de grano manchado y dañado en una muestra de ensayo de un peso mínimo de 25 g sin puntilla obtenida por medio del divisor de precisión (MEIC 2008).

Finalmente se realizó el cálculo de las diferencias estadísticas en cuanto a la dispersión del contenido de humedad, el rendimiento de grano entero y los factores de calidad por medio del análisis de variancia y la separación de medias se realizó mediante la prueba de LSD Fisher.

Experimento adicional en la secadora de laboratorio

Debido a que el análisis de rendimiento de grano entero mostró un inusual aumento durante el proceso de secado, se realizó un experimento adicional para comprobar el origen de esos resultados. En este experimento se tomó un lote de 20 kg con 20 % de humedad y se dividió en cuatro muestras de 5 kg cada una. Una de ellas se secó hasta 12 % a temperatura ambiente (condiciones controladas del laboratorio), otras dos se secaron hasta 17 % y 13 % al ambiente y se terminaron de secar hasta 12 % en la secadora de laboratorio. La cuarta muestra se secó hasta 12 % en secadora de laboratorio. Se realizaron tres repeticiones por cada tratamiento y al final del secado se determinó la dispersión del contenido de humedad y el rendimiento de grano entero. Para determinar la existencia de diferencias estadísticas entre tratamientos se realizó un análisis de variancia y la separación de medias se efectuó mediante la prueba de LSD Fisher.

Resultados y Discusión

Verificación del Kett PQ-510

En el Cuadro 1 se muestran los promedios de los contenidos de humedad calculados a partir de las cuatro repeticiones medidas en el PQ-510 y sus respectivas desviaciones estándar y coeficientes de variación por cada nivel de contenido de humedad. Adicionalmente, se muestra el promedio de dispersión de humedad entre granos individuales que proporciona el PQ-510 en cada determinación de humedad. En este cuadro se muestra que en lotes de granos homogéneos en cuanto a la humedad de los granos individuales (dispersión de humedad menor a 2 %), la variabilidad entre las determinaciones de humedad es baja, como queda evidenciado por los bajos porcentajes de los coeficientes de variación. Por el contrario, cuando existe mayor diferencia entre la humedad de los granos (dispersión mayor a 2 %) la variabilidad entre las mediciones de humedad (repeticiones) del PQ-510 aumenta, en la mayoría de los casos.

Cuadro 1. Datos de contenido de humedad promedio, desviación estándar, coeficiente de variación (C.V.) y promedio de la dispersión de humedad de los granos individuales obtenida con el Kett PQ-510 (n=120).

Variedad	Promedio Humedad PQ-510 (%) *	Desv. Est. de Promedio Humedad PQ-510 (%) **	C.V. de Humedad Promedio PQ-510 (%) ***	Promedio Dispersión Humedad de Granos Individuales PQ-510 (%) ****
CFX-18	22,85	0,44	1,94	2,23
	19,53	0,13	0,64	1,17
	16,45	0,13	0,78	1,10
	14,45	0,06	0,40	0,95
	14,30	0,08	0,57	1,18
	11,48	0,10	0,83	0,52
CR 5272	21,15	0,21	0,98	1,64
	17,98	0,46	2,58	2,70
	17,08	0,41	2,41	2,84
	15,45	0,06	0,37	0,60
	13,33	0,05	0,38	0,42
	11,68	0,05	0,43	0,39
Curime	21,58	0,13	0,58	2,49
	18,85	0,31	1,65	1,46
	17,58	0,10	0,54	1,40
	15,40	0,08	0,53	0,59
	13,70	0,12	0,84	0,45
	11,93	0,05	0,42	0,41
Puita INTA CL	20,18	0,33	1,64	3,04
	19,00	0,08	0,43	0,78
	17,15	0,10	0,58	0,68
	15,83	0,05	0,32	0,53
	13,18	0,05	0,38	0,51
	11,68	0,05	0,43	0,36
Palmar 18	21,80	0,27	1,24	1,45
	19,85	0,44	2,20	2,01
	16,45	0,17	1,05	0,91
	15,05	0,13	0,86	0,62
	13,48	0,05	0,37	0,44
	11,60	0,00	0,00	0,36

* Promedio (\bar{x}) de las 4 repeticiones de humedad promedio determinado con el PQ-510

** Desviación estándar de \bar{x}

*** C. V.= (desviación estándar de \bar{x} / \bar{x}) * 100

**** Promedio de las 4 repeticiones de la dispersión de humedad entre los granos individuales determinado con el PQ-510

La línea de mejor ajuste (R^2) resultante de comparar los promedios de contenido de humedad obtenidos con el determinador Kett PQ-510 y el horno de convección (método directo) demuestra que los porcentajes de humedad promedio obtenidos con el PQ-510 son muy exactos en relación con el método de referencia del horno. En forma general, el R^2 entre este equipo y el método directo varió entre 0,97 y 0,99. Con respecto al medidor Dickey John GAC 2100, el ajuste fue mayor y el R^2 se mantuvo en general entre 0,98 y 0,99. También se determinó un adecuado ajuste del GAC 2100 con respecto al horno de convección, lo que da confianza a los resultados obtenidos con este equipo. En general, los resultados del GAC 2100 con respecto al horno de convección se mantuvieron entre 97 % y 99 % de ajuste.

Con respecto al análisis de regresión por variedad, se pudo observar que en el caso de la variedad CFX-18, los datos de contenido de humedad obtenidos con el PQ-510 se ajustan en un 98 % con el método directo del horno de convección (Figura 2a) mientras que con el GAC 2100 los datos se ajustan en un 99 % (Figura 2c).

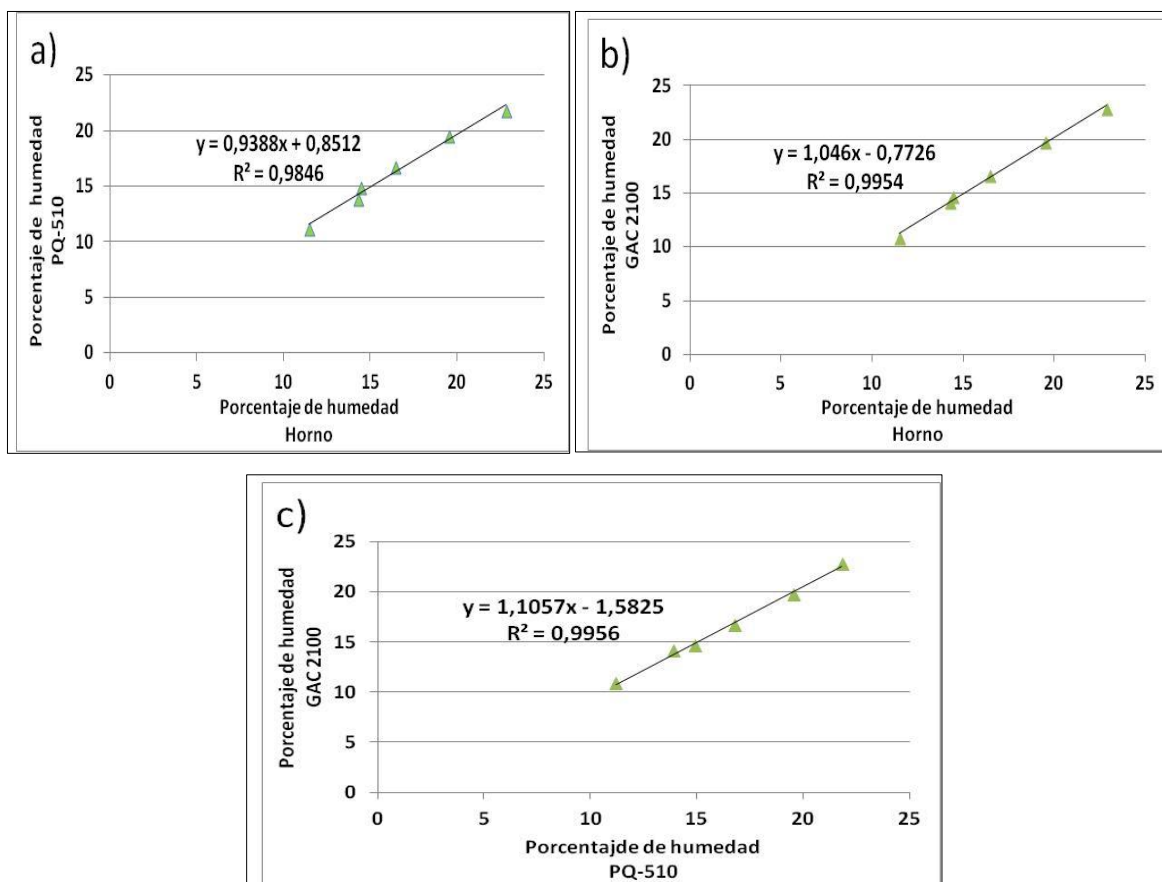


Figura 2. Curvas de regresión: a) PQ-510/Horno, b) GAC 2100/Horno y c) GAC 2100/PQ-510 en la variedad CFX-18.

En el caso de la variedad Curime, los valores de humedad obtenidos con el PQ-510 también se ajustaron en un 98 % con los datos de contenido de humedad del horno de convección y en un 99 % con los datos del GAC 2100 (Figura 3).

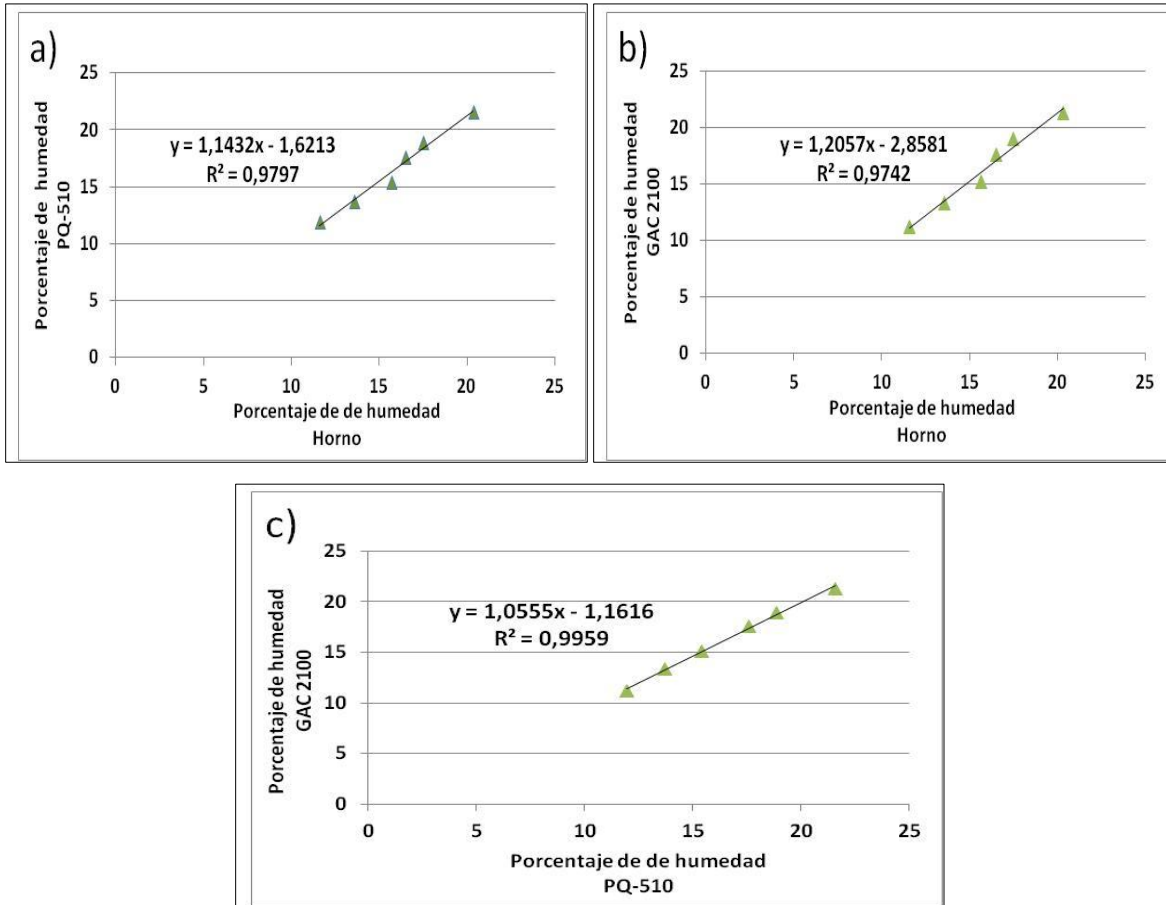


Figura 3. Curvas de regresión: a) PQ-510/Horno, b) GAC 2100/Horno y c) GAC 2100/PQ-510 en la variedad Curime.

Los datos de contenido de humedad promedio del PQ-510 con respecto a la variedad CR-5272 mostraron, en general, la mayor variabilidad con respecto a los datos obtenidos con el método directo. Aún así el R^2 fue superior a 0,96 (Figura 4a).

De igual forma, los datos de ajuste del PQ-510 contra el GAC 2100 en la variedad CR-5272 mostraron los menores valores de R^2 de todas las variedades (Figura 4c). No obstante, el nivel de ajuste de los datos de estos dos equipos se mantuvo por encima del 98 %.

Estos resultados concuerdan con los de Zeledón y Alizaga (1994), quienes evaluaron el desempeño del medidor Motomco 919 a diferentes contenidos de humedad en las tres variedades más populares de la época (CR-1821, CR-5272 y CR-1113). Los autores

observaron que de las tres variedades, los datos de contenido de humedad de CR-5272 mostraban la mayor desviación con respecto al método directo del horno de convección, especialmente con contenidos de humedad mayores de 18,5 %.

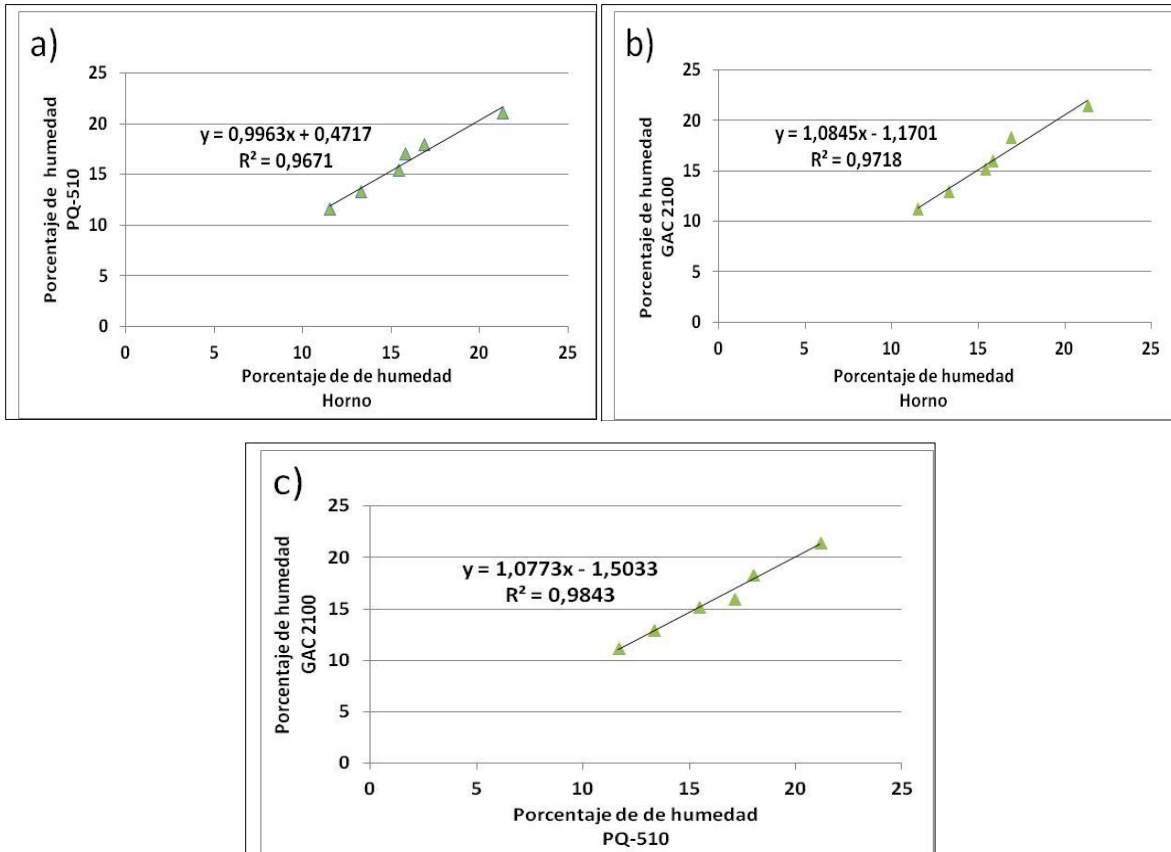


Figura 4. Curvas de regresión: a) PQ-510/Horno, b) GAC 2100/Horno y c) GAC 2100/PQ-510 en la variedad CR-5272

Como se muestra en la figuras 5 y 6 los mayores valores de R^2 se obtuvieron en las variedades Puita INTA CL y Palmar 18.

En las Figuras 5a y 6a se pueden observar que los datos de humedad del PQ-510 en relación con el método directo se ajustan casi en un 100 % en estas dos variedades y con respecto al GAC 2100, el nivel de ajuste es de un 99 % en ambas (Figura 5c y 6c).

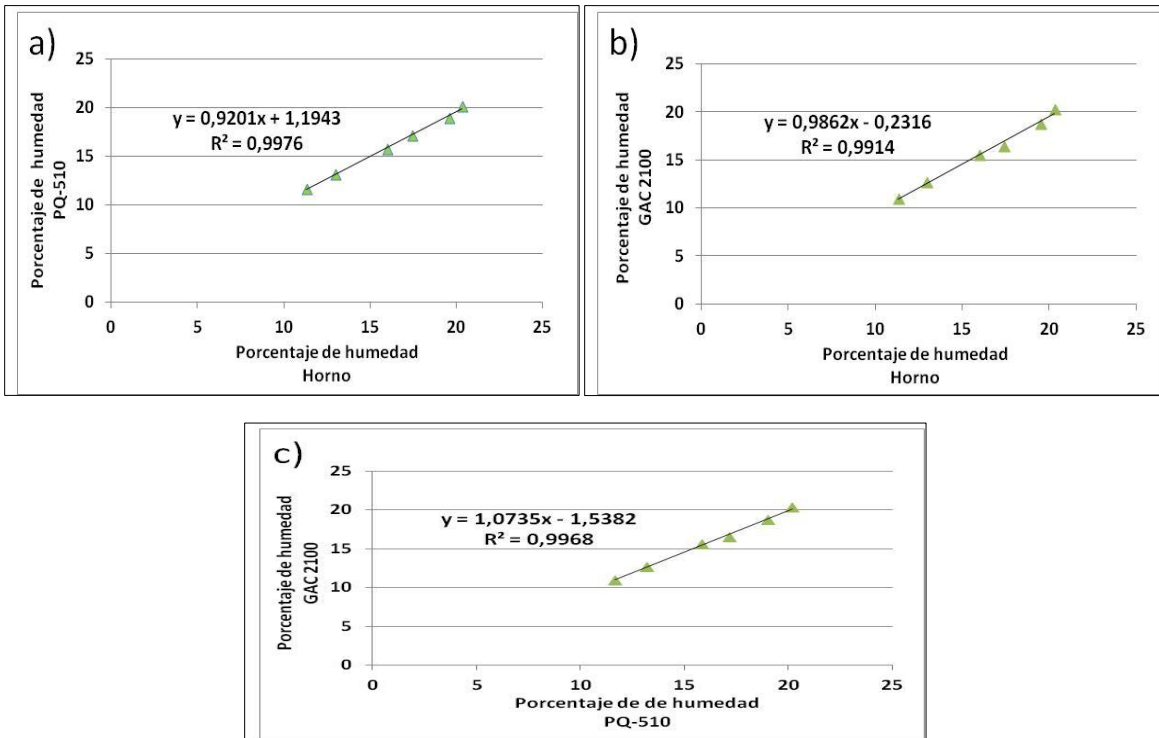


Figura 5. Curvas de regresión: a) PQ-510/Horno, b) GAC 2100/Horno y c) GAC 2100/PQ-510 en la variedad Puita INTA CL

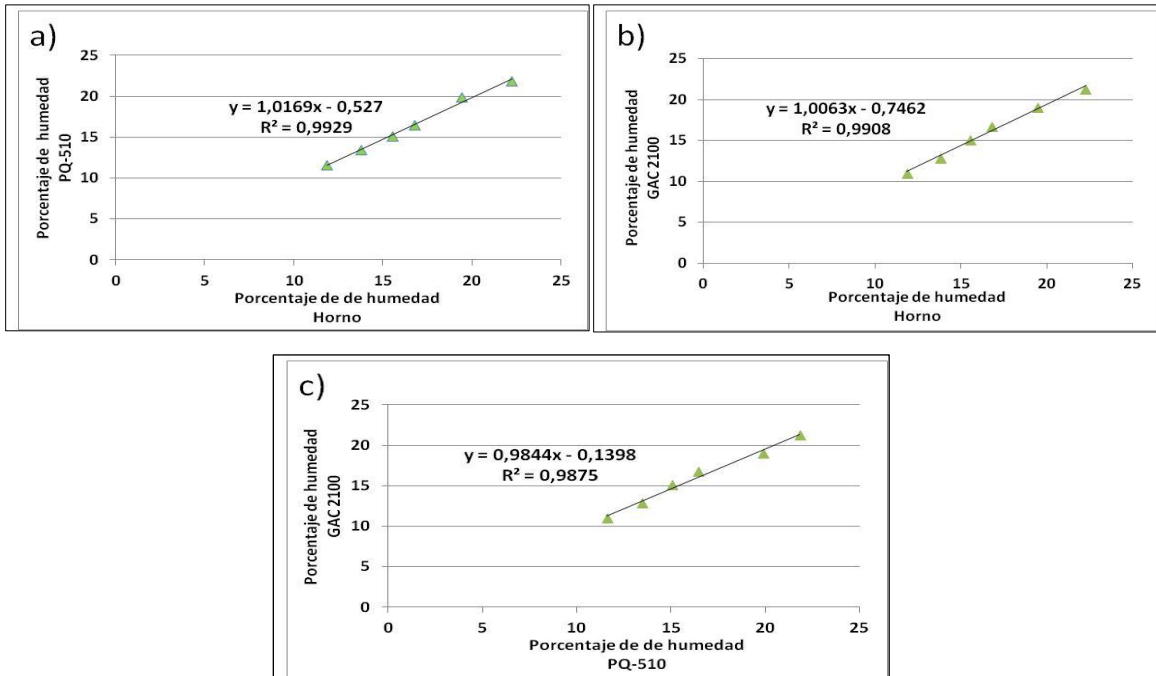


Figura 6. Curvas de regresión: a) PQ-510/Horno, b) GAC 2100/Horno y c) GAC 2100/PQ-510 en la variedad Palmar 18

En un trabajo realizado por Alizaga (1981) se compararon las humedades determinadas por medio del método directo del horno de convección y el método indirecto del Motomco 919. En dicha investigación se observó que a humedades menores de 13 % no existe una diferencia significativa entre las determinaciones del horno y del Motomco 919. Sin embargo, por encima de 13 % la diferencia entre estos dos métodos aumenta hasta llegar a un punto en que esta es mayor de 3 % y de 6 %, en humedades superiores a 20 %. Lo anterior sugiere que la tecnología de los determinadores de humedad modernos como el PQ 510 y el GAC 2100 han permitido minimizar estas diferencias en las determinaciones de humedad en granos con altos contenidos de humedad, según lo observado en el presente trabajo.

Siebenmorgen *et al.* (1990) realizaron la verificación de un determinador individual de humedad de granos similar al PQ-510 (Shizouka CTR-800A, Shizouka, Japón) comparando los datos de humedad promedio de este equipo con los del método directo del horno de convección en una variedad de arroz tipo largo. La diferencia en cuanto a los resultados de contenido de humedad entre el CTR-800A y el horno de convección fue mínima, especialmente con contenidos de humedad menores de 18 % (0,35 % de diferencia en promedio entre ambos métodos).

Los resultados de esta etapa permitieron demostrar que el determinador Kett PQ-510 es apto para las variedades utilizadas en nuestro país y comparable con el equipo usado comúnmente en la industria arrocera. Además proporciona datos de humedad confiables para el uso rutinario en las labores de secado industrial. Según Soto (1990) un nivel de ajuste (R^2) mayor a 85 % es aceptable, por lo que los resultados son completamente confiables. No obstante, las propiedades del arroz pueden cambiar de una época de cosecha a otra por lo que es recomendable realizar la verificación de los equipos cada periodo arrocero con el objetivo de comprobar la veracidad de los datos proporcionados por estos aparatos (Zeledón y Alizaga 1994).

Dispersión de humedad en los granos de arroz a la cosecha y su relación con el rendimiento y calidad final

Los resultados del contenido de humedad a la cosecha demostraron que existe una relación entre la dispersión de humedad y la calidad final del grano.

Con respecto al rendimiento de grano entero (índice de pilada) se observó que existe una relación inversamente proporcional entre la dispersión de humedad de los granos y este factor, como se puede observar en las figuras 7, 8, 9, 10 y 11; es decir, que al disminuir la dispersión, los rendimientos tienden a aumentar. Esto se debe a que la molienda hace que se manifieste el quebrado del grano que ya venía con fisuras del campo (Siebenmorgen *et al.* 2011).

Al aumentar la dispersión de la humedad, aumenta la proporción de granos cuya humedad se aleja del promedio (Siebenmorgen *et al.* 1990), por lo que, el porcentaje de grano susceptible al quebrado tiende a aumentar (Siebenmorgen *et al.* 2007).

Siebenmorgen *et al.* (1992) determinaron el promedio del contenido de humedad y la dispersión de humedad de los granos individuales de una variedad de arroz tipo largo en diferentes fechas a lo largo de la época de cosecha y compararon estos datos con el rendimiento de grano entero. En una de esas fechas el contenido de humedad promedio fue de 19,0 % con una dispersión de humedad de 2,4 % y un rendimiento de grano entero de 56,6 %. Cinco días después el contenido de humedad promedio bajó a 15,5 %, sin embargo la dispersión de humedad se mantuvo en 2,2 % y el rendimiento de grano entero fue estadísticamente igual (55,9 %). Estos resultados demuestran que, a pesar de que la humedad promedio es un buen indicador para determinar el momento de cosecha, es un dato incompleto si no se cuenta con información sobre la dispersión de la misma.

Asimismo, en este trabajo se demostró que en varios de los lotes procesados, la dispersión de humedad no está directamente relacionada con los valores promedio de contenido de humedad. Es decir, que no necesariamente una mayor humedad significa una mayor dispersión, ya que este factor también depende de otras variables como manejo agronómico, genética, humedad relativa, temperatura, tipo y fertilidad de suelos, entre otros (Bautista y Siebenmorgen 2005).

Algunos autores mencionan que una humedad ideal de cosecha es aquella en que la dispersión de humedad es mínima y el rendimiento de entero es máximo, según el potencial establecido para una determinada variedad (Bautista y Siebenmorgen, 2004, 2005; Siebenmorgen *et al.* 1992, 2007).

Por ejemplo, en la variedad CR-5272 (Figura 7) se puede observar que con contenidos de humedad entre 16 % y 18 %, la dispersión o desviación estándar de la humedad de los grano individuales alcanza valores menores que 1 %. Con una humedad de 16,6 % se obtiene el valor de dispersión mínimo (0,7 %) y el rendimiento de grano entero alcanza el valor máximo de 59,0 %, estadísticamente superior a los demás lotes. En contenidos de humedad de 20,5 % y 21,6 % se puede observar que la dispersión de la misma aumenta y dichos valores superan el valor crítico de 1 %, lo que reduce el rendimiento de grano entero. Esto probablemente se debe a que a pesar de que existen algunos granos que ya tienen la humedad apropiada para cosecha (en este caso entre 16 % y 19 %) aún existe un alto porcentaje de granos inmaduros que son más delgados y más débiles, lo que los hace más propensos a quebrarse durante la molienda (Bautista y Siebenmorgen 2008).

Por el contrario, cuando la humedad del grano a la cosecha es menor de 16 %, generalmente se encuentra por debajo del punto de equilibrio higroscópico con respecto a la HR ambiente, lo que hace que readsorba humedad, se fisure y finalmente se incremente el porcentaje de grano quebrado al momento de la molienda (Kunze y Calderwood 2004). En este estudio se determinó que cuando la humedad de cosecha de

las variedades CR-5272, Aceituno 2540 y Puita INTA CL fue menor de 16 %, el rendimiento de grano entero se redujo con respecto al grano cosechado entre 16 % y 17 %. Esto concuerda con los hallazgos de Bautista y Siebenmorgen (2008).

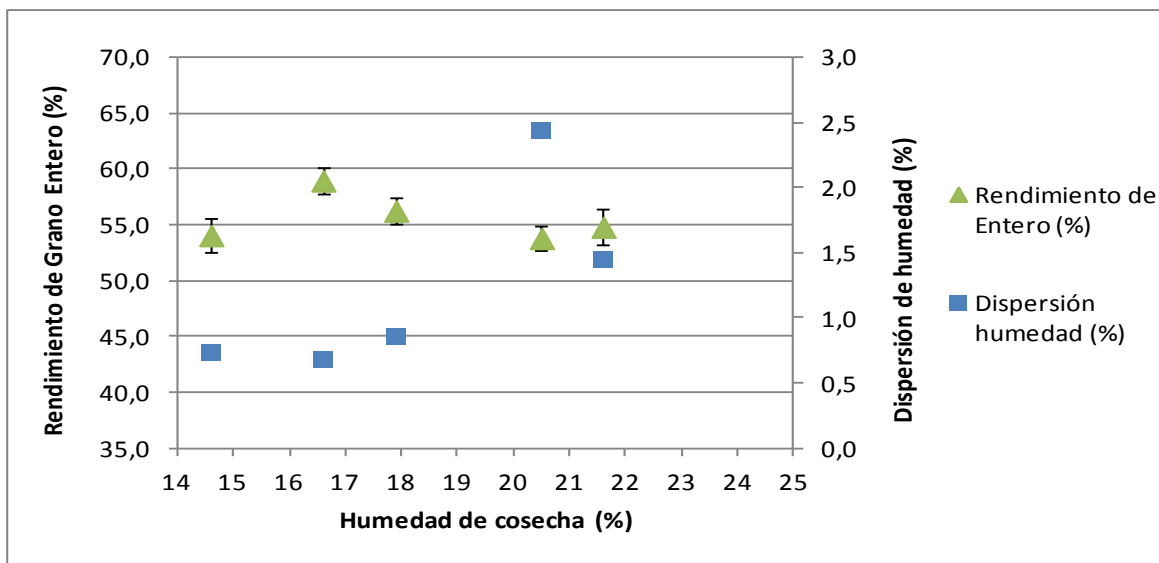


Figura 7. Rendimiento de grano entero (índice de pilada) y dispersión de la humedad a la cosecha en lotes con diferentes contenidos de humedad de la variedad CR 5272.

Prakash y Pan (2011) indican que la parte externa del grano alcanza la humedad de equilibrio con el ambiente que le rodea mucho más rápido que la parte interna del grano, sin importar si éste está adsorbiendo o perdiendo humedad. Los gradientes de humedad que se crean por esta razón hacen que la parte externa se expanda mientras la interna se contrae, acciones opuestas que hacen que el grano se fisure de adentro hacia afuera.

Wratten y Kendrick (1970) citados por Kunze y Calderwood (2004) estudiaron los fenómenos que causa el fisurado del grano en el campo y encontraron que cuando el grano alcanza la humedad de equilibrio de campo, su humedad se mueve en ciclos que acompañan los cambios en la HR del campo. Por ejemplo, si el ambiente diurno es de 37 °C o menos y la HR próxima a 60 %, el contenido de humedad de equilibrio sería de 10 % a 12 %, mientras que en la noche 27 °C y 97 % HR el contenido de humedad de equilibrio sería de 22 % a 24 %. Estos ciclos de adsorción y pérdida de humedad son los que causan el fisurado de los granos secos en el campo.

De acuerdo con Siebenmorgen *et al.* (2011), el punto crítico en el cual las fracturas empiezan a desarrollarse por la readsorción es aproximadamente 14 % de humedad. En este trabajo la variedad Aceituno 2540 (Figura 8) mostró rendimientos de grano entero muy bajos, probablemente atribuibles al fisurado cuando la humedad de cosecha de la mayoría de los granos era tan baja como 14 %. Con base en los resultados se puede concluir que la humedad ideal de cosecha en esta variedad podría estar entre 17 % y 18 %,

ya que el máximo rendimiento de grano entero (55,0 %) se alcanzó con una humedad de 17,6 % y una dispersión de humedad de 0,9 %.

A diferencia de la variedad CR 5272, Aceituno 2540 sufrió una merma importante en el rendimiento cuando la humedad de campo del arroz era muy baja (16 %), posiblemente debido a que es más susceptible a fenómenos de adsorción y pérdida de humedad que la variedad CR 5272. En un experimento desarrollado por Bautista y Siebenmorgen (2000) se determinó que la humedad de cosecha crítica a la que los granos empezaban a reabsorber humedad era 17 %, de manera que al realizar la cosecha con contenidos de humedad promedio inferiores a este punto, observaron que la cantidad de granos con 14 % de humedad aumentaba significativamente, lo que provocó la disminución del rendimiento de grano entero por fisurado en campo.

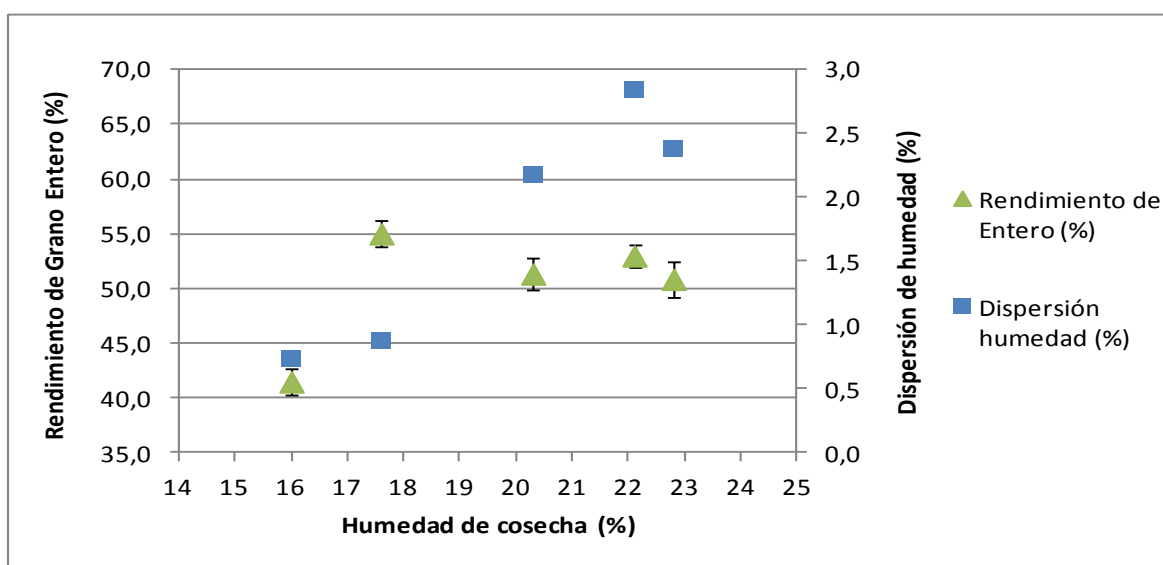


Figura 8. Rendimiento de grano entero (índice de pilada) y dispersión de la humedad a la cosecha en lotes con diferentes contenidos de humedad de la variedad Aceituno 2540.

Por encima de humedades de 20 %, la dispersión de humedad aumentó rápidamente y superó un 2,0 %, lo que significa que un lote cosechado a 21 % y 22 % contiene granos con 23 % y hasta 24 % de humedad, granos que aún están inmaduros, que se quiebran fácilmente y que afectan el rendimiento.

En el caso de la variedad Puita INTA CL, la humedad ideal de cosecha se concentró entre 20 % y 21 % (Figura 9). El pico de rendimiento de entero (57,5 %) se alcanzó aproximadamente a 20,5 % de humedad, pero con una dispersión de humedad de apenas 1,0 %.

Contrario al caso de Aceituno 2540, la merma en el rendimiento de esta variedad se vio más afectado por el aumento en el porcentaje de granos con alta humedad.

Probablemente esto se debió a la presencia de granos inmaduros y a que las condiciones ambientales no propiciaron el proceso de secado normal del grano. En el caso de los lotes con baja humedad (entre 15 % y 16 %) el rendimiento fue bajo posiblemente por pérdida y readsorción de humedad, propio del retraso de cosecha (Figura 9).

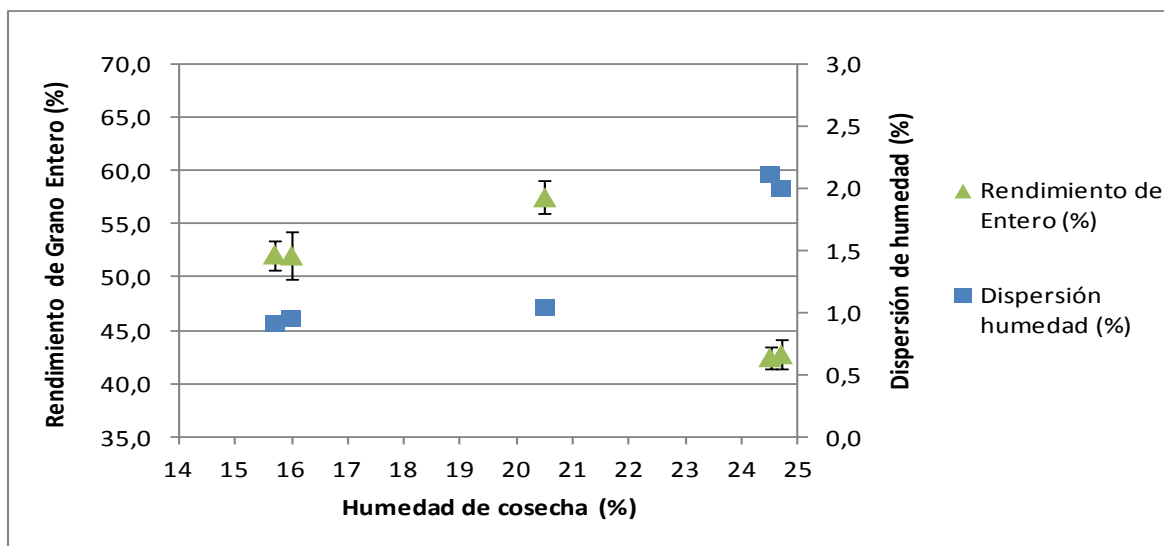


Figura 9. Rendimiento de grano entero (índice de pilada) y dispersión de la humedad a la cosecha en lotes con diferentes contenidos de humedad de la variedad Puita INTA CL.

La variedad Palmar 18, la cual es la más sembrada en el país al momento en que se realizó este trabajo, fue la que presentó menor relación entre la dispersión de humedad y el contenido de humedad promedio, como se puede observar en la Figura 10. Esto podría deberse a la gran diversidad de localidades, suelos, condiciones ambientales, sistemas de riego y de manejo en que se siembra.

El pico de rendimiento de entero (57,9 %) en esta variedad se encontró entre 18 % y 19 % de humedad, específicamente a 18,5 % y con una dispersión de humedad de 0,9 % (Figura 10).

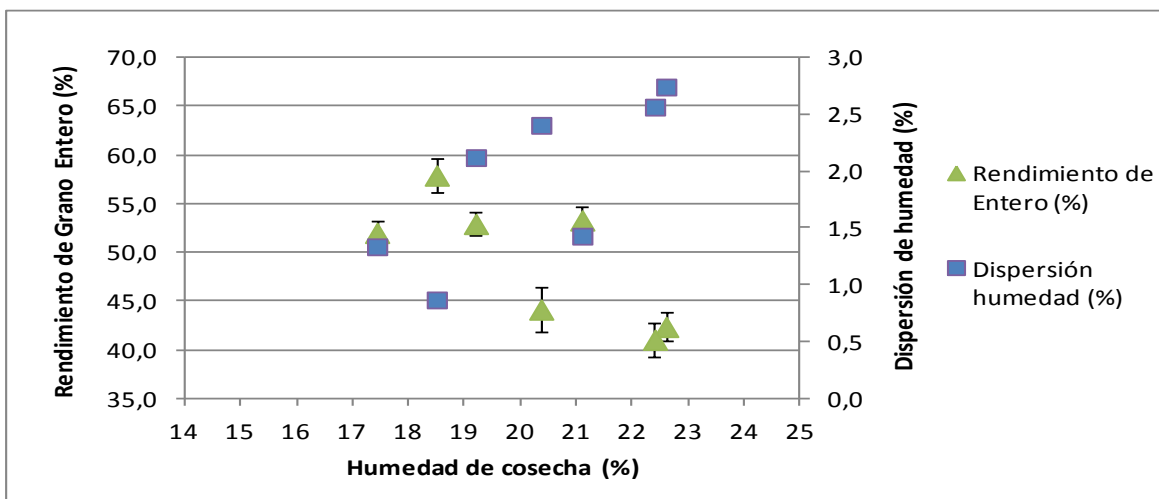


Figura 10. Rendimiento de grano entero (índice de pilada) y dispersión de la humedad a la cosecha en lotes con diferentes contenidos de humedad de la variedad Palmar 18.

Cabe mencionar que la variedad CFX 18 es un caso especial (Figura 11), ya que en la mayoría de los casos se cosecha con humedades altas debido a que la planta es de tallos débiles y tiende a volcarse por el peso de los granos maduros¹. Por lo anterior sólo se pudo realizar la determinación de dispersión a humedades altas y en un ámbito reducido de humedad de 20 % a 24 %. Los lotes con contenidos de humedad cercanos a 20 % mostraron un comportamiento opuesto al observado en los otros genotipos, ya que en el lote con mayor dispersión de humedad se obtuvo el mayor rendimiento de entero. El caso de CFX-18 es un caso único en este estudio y en la literatura consultada, y que por tanto se requiere de más estudios para encontrar la causa de estos resultados.

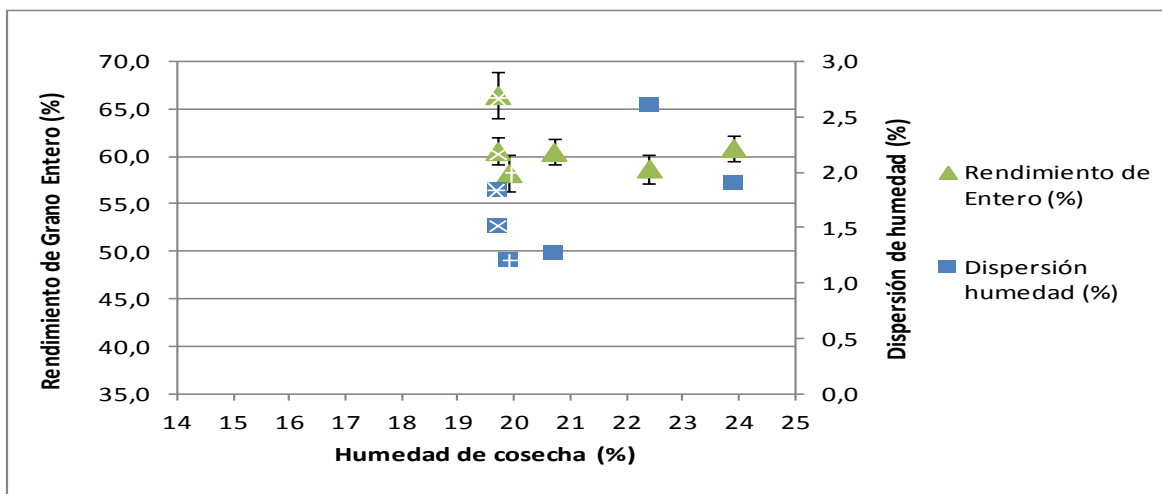


Figura 11. Rendimiento de grano entero (índice de pilada) y dispersión de la humedad a la cosecha en lotes con diferentes contenidos de humedad de la variedad CFX-18.

¹ Comunicación personal con productores de la zona de Guanacaste inscritos ante CONARROZ.

Los resultados obtenidos indican que, en general, los mayores rendimientos de grano entero se obtienen cuando la dispersión de humedad es cercana o igual a 1,0 %. Sin embargo, las humedades ideales de cosecha pueden cambiar dependiendo de la zona, variedad, manejo agronómico y clima.

La empresa colombiana EDIAGRO Ltda., una de las empresas pioneras en América Latina en cuanto al uso de datos de dispersión de humedad en los cultivos de arroz, realizó el primer intento del que se tenga conocimiento para clasificar los ámbitos de dispersión de humedad en zonas tropicales (Anexo 4), con el fin de facilitar el manejo y almacenamiento de lotes de arroz con diferentes dispersiones. Según la clasificación realizada por esta empresa, los lotes de granos con dispersión menor de 1,0 % son fáciles de manejar, mientras que aquellos con dispersiones entre 1,0 % y 1,7 % requieren mayores cuidados y son más susceptibles a las temperaturas de secado al inicio del proceso (EDIAGRO Ltda. 2006).

Evaluación de la eficiencia de la secadora recíclica con base en los datos del contenido de humedad del grano obtenidos con el determinador de humedad Kett PQ-510

Los resultados de dispersión de humedad antes, durante y después del secado en la secadora recíclica de la industria arrocera Coopeliberia R.L. demostraron que esta metodología de secado es muy eficiente para controlar y corregir las diferencias de humedad de campo entre los granos, gracias a los periodos de atemperado que recibe el grano entre ciclos de secado, los cuales favorecen una redistribución de la humedad dentro y entre los granos (De Dios 1996). En las figuras 12 y 13 se muestran las dispersiones de humedad a lo largo del proceso de secado industrial para las variedades Palmar 18 y Puita INTA CL.

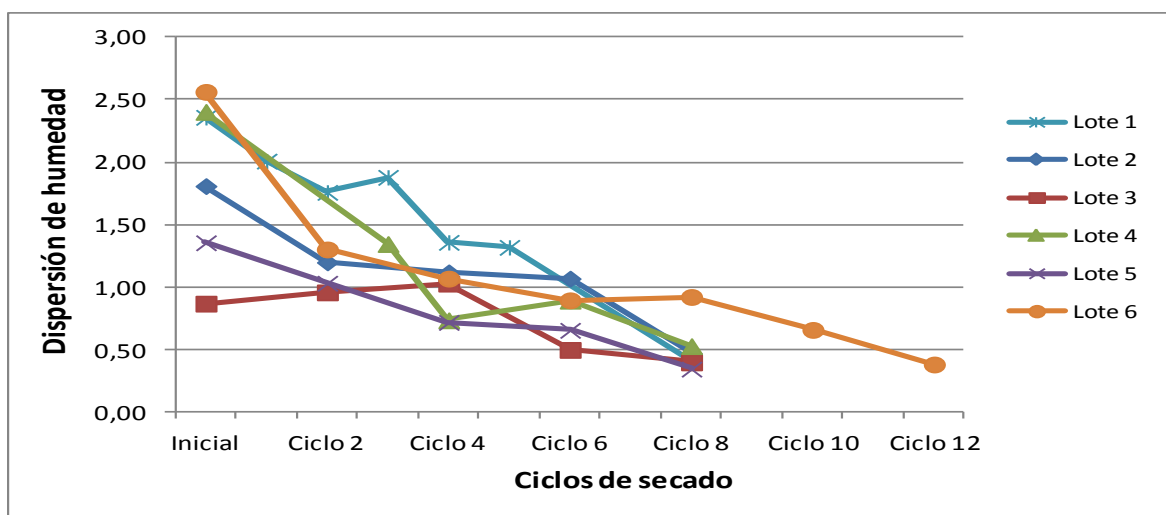


Figura 12. Dispersión de la humedad entre granos de seis lotes de arroz en granza de la variedad Palmar 18, durante el proceso de secado en secadora recíclica.

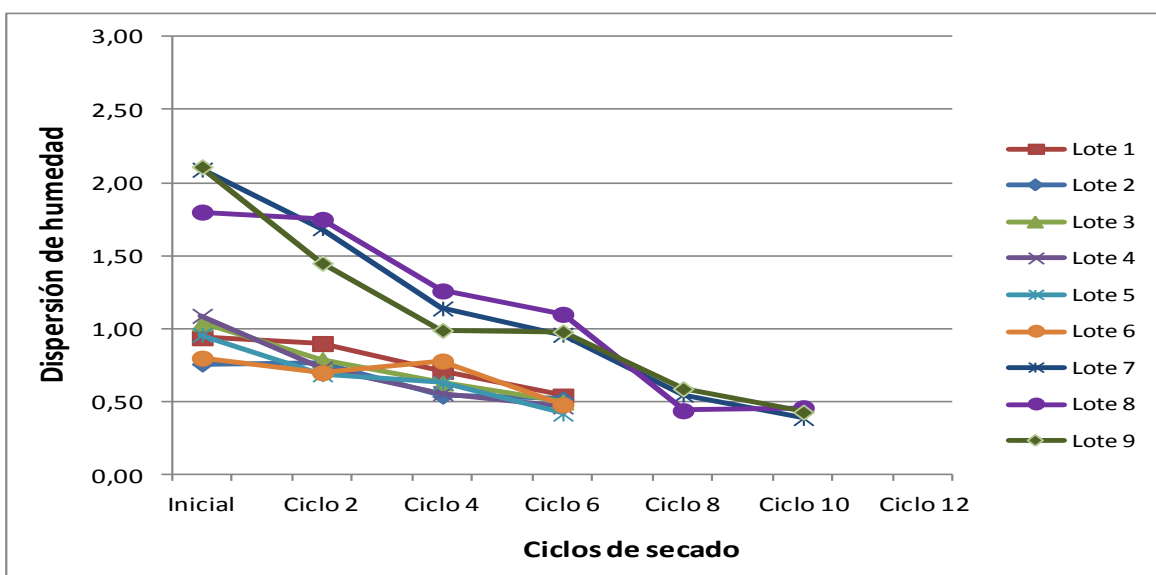


Figura 13. . Dispersión de la humedad entre granos en nueve lotes de arroz en granza de la variedad Puita INTA CL, durante el proceso de secado en secadora recíclica.

En las secadoras recíclicas, el arroz fluye por la secadora en forma intermitente por la cámara de secado y como consecuencia se produce un gradiente de humedad y de temperatura en cada grano, debido a que se remueve la humedad de la superficie del grano, mientras que el contenido de humedad en el interior se mantiene (De Dios 1996). El tiempo de atemperado entre ciclos permite que la humedad se desplace desde el centro hacia la superficie del grano, de manera que en el siguiente ciclo sea removida más fácilmente, por lo que se reduce el gradiente de humedad en el grano y el fisurado del mismo. De igual manera, estos tiempos de reposo también permiten que la humedad tienda a homogeneizarse entre los granos conforme avanza el secado (Kunze y Calderwood 2004).

Como se puede observar en las Figuras 12 y 13, con esta metodología fue posible corregir inclusive niveles de dispersión superiores a 2,5 % para llevarlos hasta niveles cercanos a 0,5 %, lo que es idóneo para almacenar el arroz en granza pues asegura que dentro del lote no se encuentran granos con humedades mucho mayores o menores al promedio (Gaviria y Gaviria 2011).

De acuerdo con las recomendaciones de EDIAGRO Ltda. (Anexo 5) lotes de arroz con dispersión de humedad menor de 0,7 % se clasifican como grano de muy buenas condiciones para el almacenamiento, mientras que los lotes con dispersión mayor a 0,9 % son granos que se deben vigilar y controlar con extremo cuidado y procesar lo más pronto posible².

² Castillo, A. 2012. Recomendaciones para la aplicación de los datos del PQ-510 en el secado y almacenamiento industrial de arroz en granza. CO, Ediagro Ltda. Comunicación personal.

Es importante que el grado de dispersión de humedad al finalizar el secado sea muy bajo ya que, en lotes muy heterogéneos (dispersión de humedad mayor a 0,8 %) los granos con humedades de 14 % o 15 %, pueden producir “focos de calentamiento” que deterioran el grano y hacen que este cambie de color a un tono ambarino y por ende dificulte su comercialización (Gaviria y Gaviria 2011). Por otra parte, lotes con humedad homogénea a la salida del secado también facilitan el proceso de descascarado. Varias pruebas de laboratorio han demostrado que el mayor porcentaje de granos que no se descascararon en el proceso industrial y que las clasificadoras retornan varias veces al descascarador, poseen una humedad mayor al promedio de los granos del lote (Gaviria y Gaviria 2011).

Además de preservar mejor la calidad del grano, las secadoras recílicas también hacen más eficiente la operación de secado, ya que se le da al grano un tiempo de atemperado que facilita la extracción de humedad con un mínimo de daño por fisura.

Según Kunze y Calderwood (2004), tiempos de reposo entre periodos cortos de secado son más efectivos para reducir la proporción de granos fisurados dentro de la masa de granos que tiempos de reposo entre periodos largos de secado. En lo que respecta a la temperatura de atemperado, Cnossen y Siebenmorgen (2000) atemperaron una variedad de arroz de tipo largo sin modificar la temperatura del grano luego del secado y demostraron que era posible alcanzar un equilibrio adecuado de humedad en solo 80 minutos y sin incurrir en pérdidas de rendimiento de entero.

Adicional a las pruebas de dispersión, se realizaron pruebas de grano quebrado a lo largo del proceso industrial de secado, para corroborar la eficiencia de esta tecnología para mantener la calidad y el rendimiento de grano entero de campo del arroz.

En la Figura 14 se puede observar los resultados de tres lotes de procedencia diferente de arroz Palmar 18 secados en la secadora recílica JMG. Es destacable que conforme avanza el proceso de secado y disminuye la dispersión de humedad de los granos (números sobre la línea de humedad), aumenta el rendimiento de grano entero. Resultados similares se obtuvieron en los lotes de la variedad Puita INTA CL (Figura 15).

Estos resultados difieren de los encontrados en la bibliografía consultada en cuanto al avance del proceso de secado y su efecto sobre el rendimiento de grano entero. En la literatura se ha documentado, que el estrés al que se ve sometido el grano durante el secado aumenta el daño mecánico y el quebrado, debido a las tensiones en la superficie del grano por las altas temperaturas, lo que se traduce en un incremento del quebrado de campo después del secado (Cnossen *et al.* 2003; Zeledón y Mora 1987; Zeledón y Mata 1992).

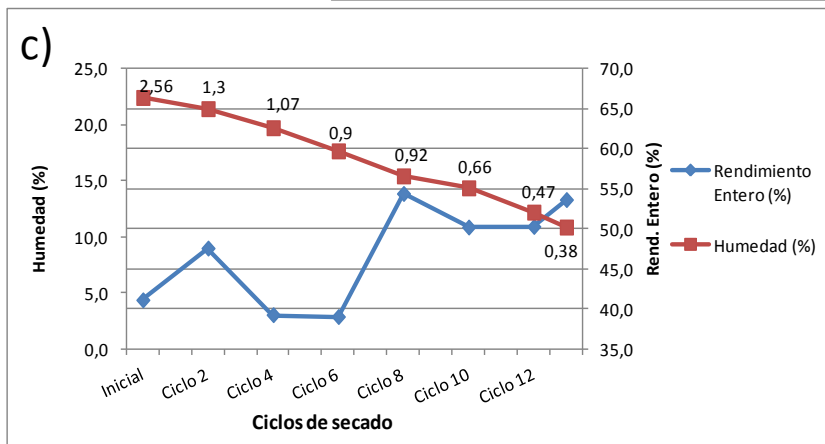
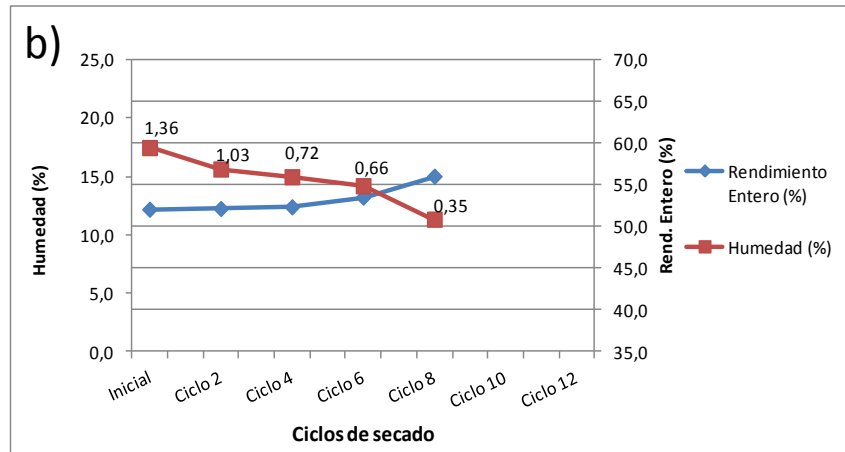
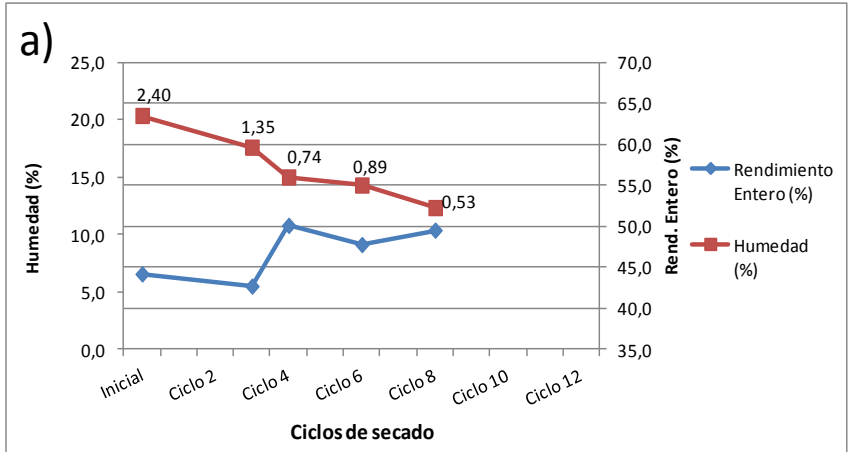


Figura 14. Contenido de humedad (%), rendimiento de grano entero (%) y dispersión de humedad (%) durante el secado de tres diferentes lotes (a, b, c) de arroz Palmar 18 en una secadora recíclca JMG de la industria Coopeliberia R.L.

Crossen y Siebenmorgen (2000) consideran que el quebrado durante el secado se da cuando los gránulos de almidón del grano sometidos a altas temperaturas se enfrían rápidamente y pasan de un estado “cauchoso” o gomoso a un estado vítreo, transición que provoca el fisurado del grano. Según los principios de transición vítrea, los granos con

mayor humedad son los que sufren más durante el secado a altas temperaturas, por lo que si un lote con humedad baja pero con dispersión alta es enfriado rápidamente, la mayor proporción de granos relativamente húmedos en el lote causará que el quebrado de este aumente (Castillo-Niño 2003).

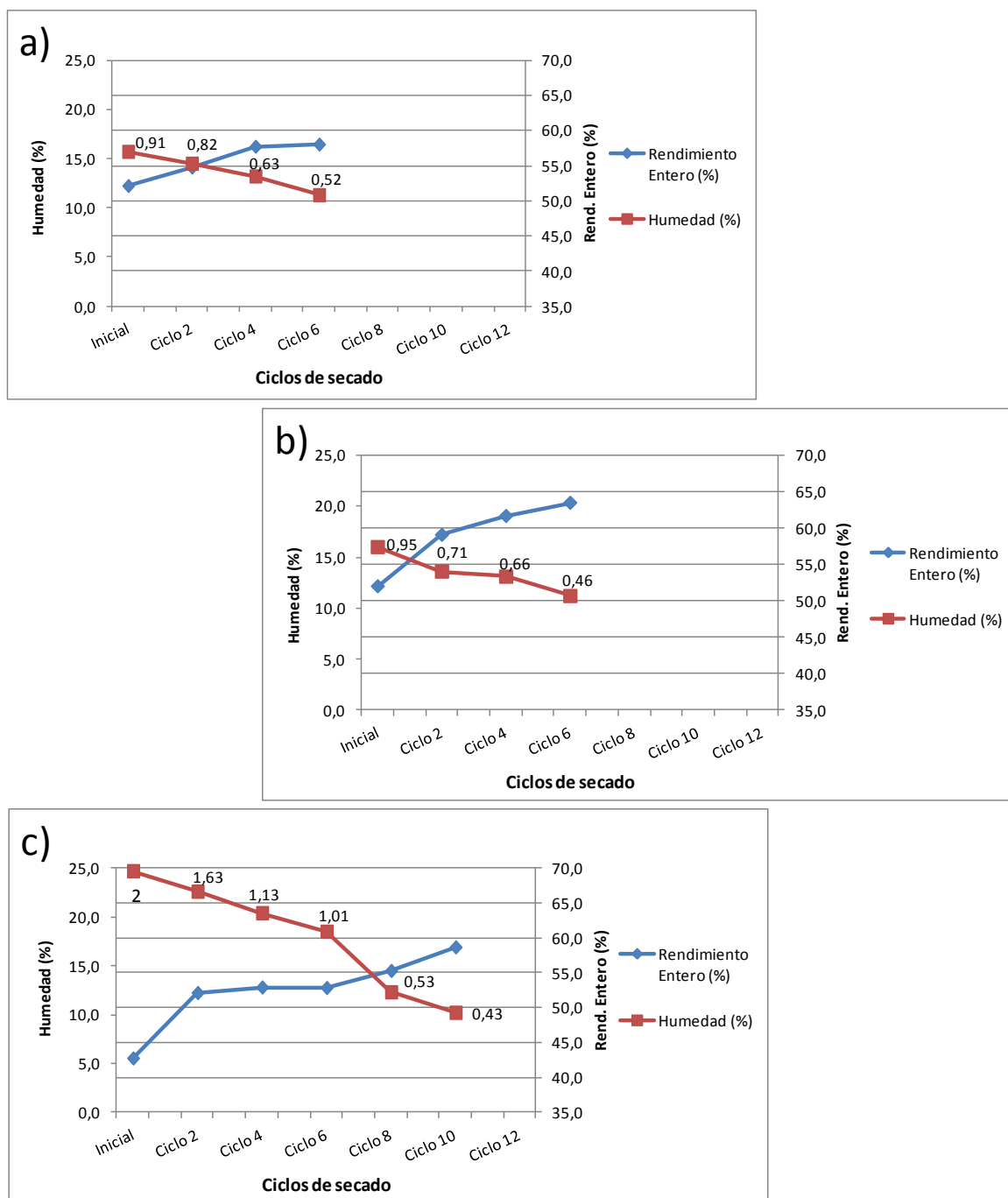


Figura 15. Contenido de humedad (%), rendimiento de grano entero (%) y dispersión de humedad (%) durante el secado de tres diferentes (a, b, c) lotes de arroz Puita INTA CL en una secadora recíclica JMG de la industria Coopeliberia R.L.

Cabe aclarar que por la combinación de temperaturas y tiempos de secado en las secadoras recílicas es poco probable que se presenten cambios de temperatura muy drásticos, por lo que el quebrado atribuible a esta razón no es muy factible.

Además de los cambios drásticos de temperatura, Kunze *et al.* (2004) menciona que el quebrado durante el secado también se puede dar a causa del frente de secado. El frente de secado se forma cuando el aire caliente y seco extrae la humedad de los granos más húmedos formando así un aire húmedo y caliente frente al aire caliente y seco capaz de extraer humedad.

En secadoras columnares y de tipo albercas, si el frente de secado avanza lentamente y granos secos están expuestos al mismo por un periodo prolongado antes de que el aire seco con capacidad de extracción de agua entre en contacto con los mismos, se pueden formar fisuras en el grano por readsorción de humedad antes de completarse el secado. Esta situación no se presenta en secadoras recílicas o intermitentes, debido a que no forman un frente de secado (Kunze *et al.* 2004).

A pesar de lo anterior, ninguna metodología es conocida por disminuir el porcentaje de quebrado con que el grano viene del campo. Sin embargo, en este trabajo se observó una merma en el mismo al avanzar el proceso de secado, por lo que el análisis de los resultados llevó a pensar en la posibilidad de un problema metodológico, ya que esta tendencia fue consistente a lo largo de todo el proyecto sin importar la variedad, la humedad y su dispersión a la cosecha. Finalmente, se consideró la posibilidad de que el secado de laboratorio complementario al secamiento industrial estuviera causando que las muestras tomadas al inicio del secado se quebraran aparentemente más que las tomadas al final del proceso.

En el sector arrocerero se considera que el secado de laboratorio se realiza en condiciones de temperatura y tiempo tan moderadas que no afecta el porcentaje de grano quebrado. Sin embargo, se determinó que diferencias en el tiempo de secado en la secadora de laboratorio provocaron aumentos significativos ($p \leq 0,05$) en el porcentaje de grano quebrado, que por el contrario no se presentaron en el secado industrial. Así, en el caso del lote de Puita INTA CL en la Figura 15c la primera muestra que se tomó previo al secado industrial con una humedad de 25 % estuvo 12 horas en la secadora de laboratorio, la segunda que se tomó con 22 % de humedad estuvo nueve horas, la tercera con 20 % de humedad estuvo siete horas y así sucesivamente hasta la última muestra que se secó totalmente en la secadora industrial.

Con el fin de determinar las causas de estos resultados contradictorios, se realizaron pruebas adicionales con diferentes tiempos de secado en el Laboratorio de Control de Calidad de CONARROZ. Los resultados de este experimento demostraron que las muestras secadas totalmente en secadora de laboratorio presentan una dispersión de humedad y

un porcentaje de grano quebrado significativamente mayor ($p \leq 0,05$) que las muestras secadas totalmente al ambiente (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto de diferentes tiempos de secado en la secadora del laboratorio de Control de Calidad de CONARROZ sobre la dispersión de humedad y el rendimiento de grano entero en arroz.

Tratamiento	Dispersión de humedad (%)	Rend. Entero (%)
Secado total en secadora hasta 12 %	0,85 c	39,44 a
Secado hasta 17% al ambiente y hasta 12% en secadora	0,69 bc	44,07 b
Secado hasta 13% al ambiente y hasta 12% en secadora	0,50 a	49,13 c
Secado total al ambiente hasta 12 %	0,51 ab	47,13 c

Los resultados de molinería demostraron que la dispersión de humedad influye en el rendimiento de grano entero de la muestra (Cuadro 2). Debido a que el secado en el laboratorio resultó poco uniforme, es posible que haya granos que se estén sobresecando, por lo que son más susceptibles al fisurado. Además, entre mayor fue el tiempo de secado en la secadora de laboratorio, menor resultó el rendimiento de entero.

Es posible que una modificación en la metodología de secado de las muestras en el laboratorio, reduzca el efecto sobre el quebrado y permita una mejor evaluación de las secadoras recílicas.

Además de los rendimientos de molinería, entre la primera y última etapa de secado industrial también se evaluó las diferencias en calidad en términos de porcentaje de granos manchados, de granos con daño mecánico y de granos dañados por calor. A pesar de que la temperatura de secado varía entre 60 °C y 70 °C, en ninguno de los lotes analizados se encontró diferencias estadísticas que indicaran deterioro de la calidad del grano. Al respecto Kanai *et al.* (2013) investigaron el efecto de la temperatura y del tiempo de secado sobre el cambio de color y calidad del grano de trigo y observaron que a temperaturas de secado de 60 °C y caudales de aire bajos, la coloración y calidad de la harina del trigo se veía afectada, sin embargo, al aumentar el caudal de aire aumentaba la velocidad de secado por lo que la temperatura de 60 °C no afectó la calidad ni la coloración de la harina de trigo. De igual manera, la metodología de secado intermitente utilizada en esta industria permite que el grano no se vea expuesto por largos periodos de tiempo a altas temperaturas, por lo que era de esperarse que no se produjera deterioro en la calidad del grano.

Conclusiones

- Los datos de contenido de humedad obtenidos con el Kett PQ-510 son muy confiables en todas las variedades evaluadas, debido a que coinciden notablemente con los resultados obtenidos con el método de referencia (horno de convección de aire). Así mismo los resultados son congruentes con los obtenidos con el Dickey John GAC 2100.
- En general, el rendimiento de grano entero o índice de pilada es mayor conforme se reduce la dispersión de humedad de cosecha en lotes de diferentes variedades de arroz.
- El aumento o disminución de la dispersión de humedad no está exclusivamente relacionado con el contenido de humedad como quedó evidenciado en los análisis de dispersión de humedad a la cosecha.
- El grano que se cosecha “muy seco” (humedad promedio <16 %), a pesar de presentar una baja dispersión de humedad, tiende a producir menores índices de pilada debido a que están expuestos a procesos de adsorción y pérdida de humedad (retraso de cosecha) que fisuran el grano.
- Dispersiones de humedad muy altas provocan mermas en el rendimiento de grano entero.
- Dispersiones de humedad de aproximadamente 1,0 % o menos, favorecen la obtención de mayores rendimientos de entero.
- La secadora recíclica o intermitente es muy efectiva para disminuir las dispersiones de humedad con que viene el grano del campo y permite alcanzar niveles de dispersión adecuados para el almacenamiento.
- Los tiempos y temperaturas de secado utilizados en las secadoras recíclicas de la industria Coopeliberia R.L. permiten conservar la calidad original del arroz.

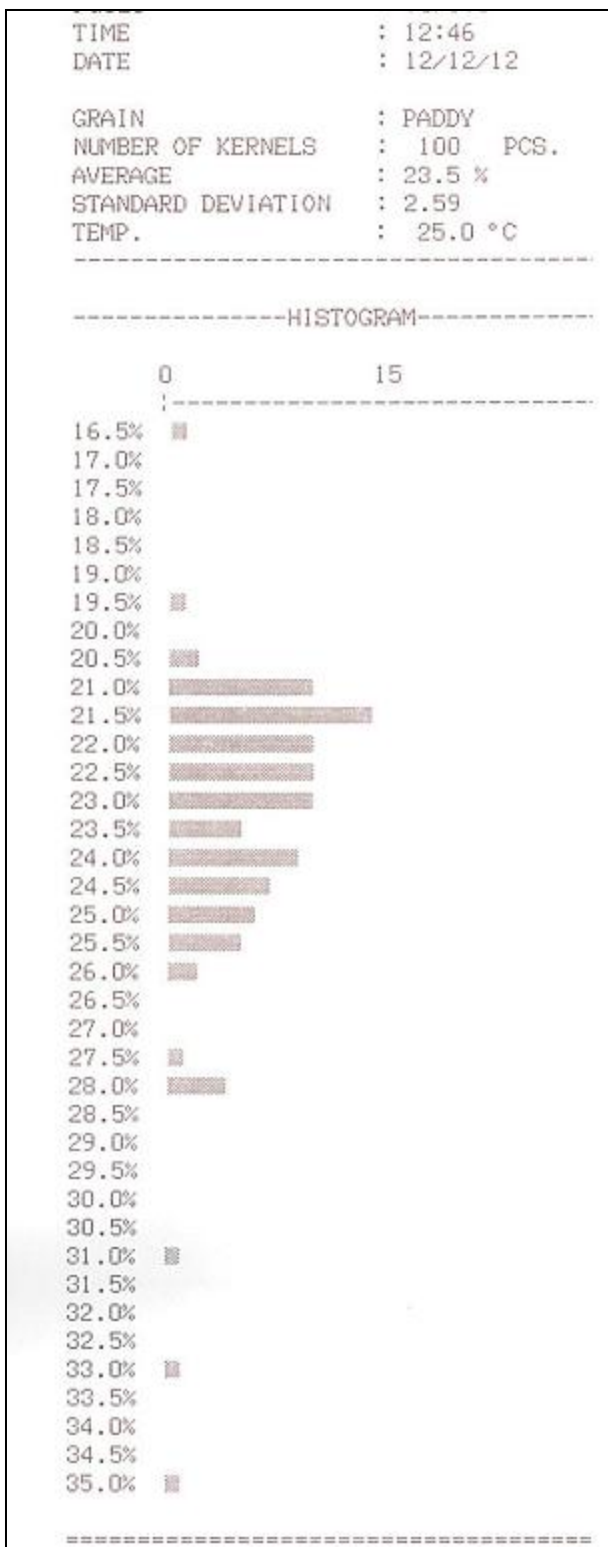
Anexos



Anexo 1. Secadora recíclica o intermitente marca JMG de la industria arrocera Coopeliberia R.L.




Anexo 2. Determinador individual de humedad de granos Kett PQ-510




Anexo 3. Papel de impresión de los datos de humedad promedio, dispersión de humedad e histograma del Kett PQ-510.

CLASIFICACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE LA HUMEDAD DE GRANOS INDIVIDUALES				
<u>GRANO PARA SECAMIENTO</u>				
	Baja	Media	Alta	Muy alta
Grano de campo	Desviación Estándar Inferior a 1	Desviación Estándar entre 1 y 1,7	Desviación Estándar entre 1,7 y 2,5	Desviación Estándar superior a 2,5
Comentarios	Grano de fácil manejo	Se deben tomar precauciones relacionadas con la temperatura de secado inicial.	Se deben aumentar las precauciones relacionadas con la temperatura de secado inicial. Puede presentar problemas posteriores durante el almacenaje.	Se deben extremar las precauciones relacionadas con la temperatura de secado inicial. No sobrepasar 45 C en torres y 32 C en Albercas. Debería tratar de consumirse con la mayor brevedad posible.



Anexo 4. Clasificación de condiciones para el secado de granza húmeda según nivel de dispersión de humedad. Elaborado por EDIAGRO Ltda.

CLASIFICACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE LA HUMEDAD DE GRANOS INDIVIDUALES				
<u>GRANO PARA ALMACENAJE</u>				
	Baja	Media	Alta	Muy alta
	Desviación Estándar Inferior a 0,7	Desviación Estándar entre 0,7 y 0,8	Desviación Estándar entre 0,8 y 0,9	Desviación Estándar superior a 0,9
Comentarios	Grano de muy buenas condiciones para almacenar	Grano que exige control de temperatura en zonas de alta humedad relativa	Grano que exige controles cuidadosos de temperatura durante su almacenaje.	Grano que debería vigilarse con extremo cuidado y procesarse antes de 30 días.



Anexo 5. Clasificación de condiciones para el almacenaje de granza según nivel de dispersión de humedad. Elaborado por EDIAGRO Ltda.

Literatura citada

- Agrimaq S.R.L. s.f. Agrimaq Industrial y Comercial S.R.L. Argentina. Consultado 15 set. 2012. Disponible en: http://www.agrimaq.com.ar/secadoras_arroz.php
- Alizaga, R. 1981. Medición del contenido de humedad en granos básicos con el determinador motomco modelo 919. Tesis de Lic. San José, CR. Universidad de Costa Rica. 42 p.
- Bautista, R.; Siebenmorgen, T. 2000. Rice kernel properties affecting milling quality at harvest. *In Rice Research Studies*. Ed. R Norman and J Meullenet. Arkansas, U.S.A. University of Arkansas. 238-241 pp.
- _____. 2004. Milling quality trends with harvest moisture content and the relationship to individual kernel moisture content distribution. *Arkansas Rice Research Studies*: 364-370 pp.
- _____; Burgos, R. 2004. Moisture adsorption effects on rice milling quality of current cultivars. *Arkansas Agricultural Experiment Station Research*: 351-356 pp.
- _____. 2005. Individual rice kernel moisture content variability trends. *Applied Engineering in Agriculture*, **21**(4): 637p.
- _____; Counce, P. 2007. Rice kernel dimensional variability trends. *Applied Engineering in Agriculture*, **23**(2): 207-217 pp.
- _____. 2008. Estimating rice optimal harvest moisture content using individual kernel moisture content distributions at harvest. *Applied Engineering in Agriculture*: 254-263 pp.
- Castillo-Niño, A. 2003. Improving rice milling yields. *Rice Quarterly*. Consultado en. 2013. Disponible en: <http://www.World-Grain.com>
- CIGRAS (Centro para Investigaciones en Granos y Semillas). 2011. Instructivo para la determinación del contenido de humedad al horno (IT-LG-02). Universidad de Costa Rica. 10 p.
- Cnossen, A.; Siebenmorgen, T. 2000. The glass transition temperature concept in rice drying and tempering: effect on milling quality. *American Society of Agricultural Engineers*, **43**(6): 1661-1667 pp.

- _____; Jiménez, T.; Siebenmorgen. 2003. Rice fissuring response to high drying and tempering temperatures. *Journal of Food Engineering*, **59**(1): 61-69 pp.
- CONARROZ (Corporación Arrocera Nacional). 2012. Informe estadístico periodo 2011/2012. 58 p.
- De Dios, Carlos A. 1996. Secado de granos y secadoras. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. 314 p.
- Ediagro (Estudios y Diseños Agroindustriales Ltda.). 2006. Conservación de granos almacenados. Colombia. 112 p.
- _____. s.f. Instrucciones de funcionamiento y mantenimiento del determinador individual de la humedad de los granos Kett PQ-510. Colombia. 19 p.
- Gaviria, J.; Gaviria, J. C. 2011. Control de calidad de granos II. Agropress Service. Bogotá, Colombia. 222 p.
- Holloway, G.; Siebenmorgen, T.; Counce, P.; Lu, R. 1995. Causes of multimodal moisture content frequency distributions among rice kernels. *Applied Engineering in Agriculture*, **11** (4): 561-565 pp.
- IRRI (International Rice Research Institute). 2013. Rice basics. (En línea). Laguna, Philippines. Consultado 08 jun. 2013. Disponible en http://irri.org/index.php?option=com_k2&view=itemlist&layout=category&task=category&id=663&Itemid=100343&lang=en
- ISTA (International Seed Testing Association). 2013. Chapter 9: Determination of Moisture content *In* International Rules for Seed Testing. Switzerland. 1-20 pp
- Kanai, G.; Tamaki, K.; Nagasaki, Y. 2013. Development of classification drying of high moisture wheat grain according to the moisture content. *Japan Agricultural Research Quarterly*, **47**(2): 141-151 pp.
- Kunze, O; Calderwood, D. 2004. Rough-rice drying: moisture adsorption and desorption. In *Rice: Chemistry and technology*. Ed. Elaine Champagne. 3 ed. Minnesota, U.S.A, American Association of Cereal Chemists. 223-263 pp.
- _____; Lan, Y; Wratten, F. 2004. Physical and mechanical properties of rice. *In* *Rice: Chemistry and technology*. Ed. Elaine Champagne. 3 ed. Minnesota, U.S.A, American Association of Cereal Chemists. 191-218 pp.

- MEIC (Ministerio de Economía, Industria y Comercio). 2008. Reglamento Técnico 406-2007: Arroz en Granza. Especificaciones y métodos de análisis para la comercialización e industrialización. Decreto N° 34487-MEIC-MAG-S. Diario Oficial La Gaceta. San José, CR, mayo 7, 2008.
- Prakash, B.; Pan, Z. 2011. Modeling moisture movement in rice. *In Advanced Topics in Mass Transfer*. Ed. Mohamed El-Amin. InTech. 283-305 pp.
- Shizouka Seiki Co., Ltd. s.f. Analyzers and inspectors. Consultado 18 nov. 2013. Disponible en: http://www.shizuoka-seiki.co.jp/hp/ss_eg/company/c_04.html
- Soto, H. 1990. Prueba adicional sobre la medición del contenido de humedad en granos básicos con el determinador Motomco 919. Tesis de Lic. San José, CR. Universidad de Costa Rica. 60 p.
- Siebenmorgen, T.; Banaszek, M.; Kocher, M. 1990. Kernel moisture content variation in equilibrated rice samples. *American Society of Agricultural Engineers*, **33**(6): 1979-1983 pp.
- _____; Counce, P.; Lu, R.; Kocher, M. 1992. Correlation of head rice yield with individual kernel moisture content distribution at harvest. *Transactions of the ASAE*, **35**(6): 1879-1884 pp.
- _____; Perdon, A.; Chen, X.; Mauromoustakos, A. 1998. Relating rice milling quality changes during adsorption to individual kernel moisture content distribution. *American Association of Cereal Chemists*, **75**(1): 129-136 pp.
- _____; Bautista, R.; Counce, P. 2007. Optimal harvest moisture contents for maximizing rice milling quality. *Applied Engineering in Agriculture* **23**(4): 517-527 pp.
- _____; Counce, P.; Wilson, C. 2011. Factors affecting rice milling quality. *Agriculture and Natural Resources, University of Arkansas*, 6 p.
- Yoshida, Shouichi. 1981. Fundamentals of rice crop science. Laguna, Philippines. International Rice Research Institute. 49-63 pp.
- Yang, W.; Jia, C.; Siebenmorgen, T.; Howell, T.; Cnossen, A. 2002. Intra-kernel moisture response of rice to drying and tempering treatments by finite element simulation. *American Society of Agricultural Engineers*, **45**(4): 1037-1044 pp.
- Zeledón, M.; Mora, M. 1987. Relación entre el secado y el quebramiento del arroz en cinco molinos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, **11**(2): 163-168 pp.

_____ ; Mata, C. 1992. Efecto del secado continuo o en dos etapas y de la temperatura del aire sobre variables de rendimiento molinero en arroz producido en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, **16**(1): 91-98 pp.

_____ ; Alizaga, R. 1994. El presecado rápido como una alternativa para mejorar la exactitud de los estimados de humedad de campo del arroz con un medidor de capacitancia. *Agronomía Costarricense*, **18**(1): 113-119 pp.