

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

**Estudio de viabilidad para el análisis técnico de la calidad del arroz (*Oryza sativa*)
según el Reglamento Técnico Nacional RTCR 202:1998 empleando procesamiento
de imágenes digitales y medidor de blancura automático**

Trabajo Final de Graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Luis Arley Zúñiga Picado

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2021

HOJA DE APROBACIÓN

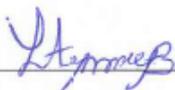
Este proyecto de graduación ha sido aceptado por el Tribunal Examinador como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas de la Facultad de Ingeniería perteneciente a la Universidad de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Examinador:



Luis Arley Zúñiga Picado

Candidato



Ing. Stefanny Campos Boza

Directora, Comité Asesor.



Ing. Juan Roberto Mora

Miembro, Comité Asesor.



Dr. Luis Barboza Barquero

Miembro, Comité Asesor.



Nombre. Ing. Matías Chaves

Miembro, Tribunal Examinador



Nombre. Dra. Marta Montero

Presidente, Tribunal Examinador

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia, a mis padres que nunca han dejado de apoyarme en mi vida y formación, para ellos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos especiales al CIGRAS y todos sus colaboradores, que me ayudaron en el proceso de capacitación y ejecución del trabajo. Especiales gracias a la Ing. Stefanny Campos Boza y demás miembros del comité asesor, por su continua asistencia y paciencia. Y finalmente a la UCR, alma mater que tanto me ha dado.

Luis Arley Zúñiga.

ÍNDICE GENERAL

HOJA DE APROBACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ECUACIONES	ix
ÍNDICE DE CUADROS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
INTRODUCCIÓN	1
Resumen	1
CAPÍTULO 1. Marco Teórico.	2
1.1 Antecedentes.	2
1.2 Importancia del tema.	2
1.3 Objetivos.	6
1.3.1 Objetivo General.	6
1.3.2 Objetivos Específicos.	6
1.4 Marco muestral.	7
1.5 Orígenes del grano.	8
1.6 Panorama mundial del grano.	8
1.7 Panorama nacional del grano.	9
1.8 Análisis digital de imágenes como herramienta en la evaluación de calidad.	9
1.9 Captura de imagen.	10
1.10 Procesamiento de Imagen.	11
1.11 Interpretación algebraica de datos.	11
1.12 Requerimientos para la captura digital.	13
1.13 Método de muestreo.	13
1.14 Unidad experimental.	13
1.15 Comparación estadística.	13
CAPÍTULO 2. Materiales y métodos.	14
2.1 Capacitación en metodología de análisis manual.	15
2.2 Obtención de resultados por muestreo manual.	16
2.3 Desarrollo de placa muestral.	16
2.3.1 Selección de equipo.	16
2.3.2 Diseño de prototipo.	17
2.3.3 Manufactura de placa.	18
2.4 Obtención de parámetros de características de interés.	20
2.5 Desarrollo de interfaz digital.	21

2.6	Obtención de resultados digitales para propiedades de grano entero, quebrado, puntilla y mesa.	23
2.6.1	Preparación de muestras.	25
2.7	Análisis de muestras de blancura.	25
2.7.1	Obtención de resultados con equipo de blancura Satake MM1D.	26
2.7.2	Obtención de resultados digitales para blancura, transparencia y grado de pulido.	26
2.8	Comparación estadística de resultados.	27
CAPÍTULO 3. Resultados y discusión.		28
3.1	Obtención de imágenes.	28
3.2	Resultados del análisis para puntilla.	28
3.2.1	Resultados del método tradicional para puntilla.	29
3.2.2	Resultados del método digital por área para puntilla.	30
3.2.3	Resultados del método digital por peso para puntilla.	30
3.2.4	Comparación estadística entre resultados de puntilla.	31
3.3	Resultados del análisis para grano quebrado.	36
3.3.1	Resultados del método tradicional para grano quebrado.	37
3.3.2	Resultados del método digital por área para grano quebrado.	38
3.3.3	Resultados del método digital por peso para grano quebrado.	38
3.4	Resultados para propiedades de mesa.	44
3.4.1	Grano dañado.	45
3.4.2	Grano rojo.	46
3.4.3	Grano manchado.	48
3.4.4	Grano yesoso.	49
3.4.5	Comparación estadística para resultados obtenidos de propiedades de mesa.	50
3.5	Resultados de las propiedades de blancura en los granos.	57
3.5.1	Resultados para propiedad de blancura.	58
3.5.2	Resultados para propiedad de transparencia.	59
3.5.2	Resultados para la propiedad grado de pulido.	61
3.5.3	Comparación estadística para resultados obtenidos para las propiedades de blancura.	62
CONCLUSIONES.		67
RECOMENDACIONES.		68
BIBLIOGRAFÍA		69
ANEXOS		76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sectores involucrados en el entorno nacional para la fijación del precio del arroz.....	3
Figura 2. Arreglo de bandas roja (R), verde (G), y azul (B) en un sensor típico CCB	11
Figura 3. Matriz de datos en una imagen digital.....	12
Figura 4. Arreglo vectorial para segmentación de imagen en bandas R, G y B.....	12
Figura 5. Diagrama de metodología desarrollada y aplicada.....	14
Figura 6. Proceso de análisis con metodología tradicional.....	15
Figura 7. Medidor de blancura de arroz MM1D.....	17
Figura 8. Diseño de placa muestral experimental (cotas en mm).....	17
Figura 9. Prototipos de placas muestrales manufacturadas, placa inicial transparente (a) y placa con patrón seleccionado (b).....	18
Figura 10. Diseño final de placa muestral (cotas en mm).....	19
Figura 11. Placa muestral final para el análisis de arroz pilado, fabricada bajo especificaciones de diseño.....	19
Figura 12. Muestras control de características de interés. Grano extruido (a), grano recubierto (b), grano dañado (c), grano rojo (d), grano yesoso (e) y grano manchado (f) respectivamente.....	20
Figura 13. Serie de pasos implementada en el análisis digital para GEQP y propiedades de mesa.....	22
Figura 14. Proceso de preparación de las muestras de arroz pilado en la placa muestral prototipo. ...	25
Figura 15. Serie de pasos implementada en el análisis digital de blancura.....	27
Figura 16. Ejemplo de la captura digital de una muestra de arroz pilado (a) y su imagen resultante del procesamiento dimensional (b).	28
Figura 17. Ilustración de la forma de los granos de arroz pilado clasificados como puntilla.	29
Figura 18. Porcentaje para puntilla obtenido en las muestras de arroz pilado de calidad: 99% - 95% (a) y 91% - 80% (b), mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD) por área. Las barras representan el error estándar de la media.	32
Figura 19. Porcentaje para puntilla obtenido en las muestras de arroz pilado de calidad: 99% - 95% (a) y 91% - 80% (b), mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD) por peso. Las barras representan el error estándar de la media.	33
Figura 20. Análisis de normalidad Q-Qplot para para la variable de puntilla, obtenida por los métodos tradicional, digital por área y digital por peso.....	34
Figura 21. Correlación entre los resultados obtenidos para la variable de puntilla mediante el método tradicional y el método digital por área.	35
Figura 22. Correlación entre los resultados obtenidos para la variable de puntilla mediante el método tradicional y el método digital por peso.....	35
Figura 23. Bloxplot comparativo entre los métodos de análisis utilizados para para determinar la variable de puntilla.....	36
Figura 24. Ilustración de la forma de los granos de arroz pilado clasificados como grano quebrado.....	37
Figura 25. Porcentaje para grano quebrado obtenido en las muestras de arroz pilado de calidad: 99% - 95% (a) y 91% - 80% (b), mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD) por área. Las barras representan el error estándar de la media.	40
Figura 26. Porcentaje para grano quebrado obtenido en las muestras de arroz pilado de calidad: 99% - 95% (a) y 91% - 80% (b), mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD) por peso. Las barras representan el error estándar de la media.	41
Figura 27. Análisis de normalidad Q-Qplot para para la variable de grano quebrado, obtenida por los métodos tradicional, digital por área y digital por peso.....	42
Figura 28. Correlación entre los resultados obtenidos para la variable de grano quebrado mediante el método tradicional y el método digital por área.....	42

Figura 29. Correlación entre los resultados obtenidos para la variable de grano quebrado mediante el método tradicional y el método digital por peso.	43
Figura 30. Bloxplot comparativo entre los métodos de análisis utilizados para grano quebrado.	43
Figura 31. Ejemplo de captura digital (a), imagen procesada para propiedades dimensionales (b) e imagen procesa para propiedad de mesa específica (c), en los granos de arroz pilado, todas bajo la herramienta de identificación ROI.	44
Figura 32. Ilustración de los granos de arroz pilado clasificados como granos dañados (sup) contra granos estándar (inf).	45
Figura 33. Ilustración de los granos de arroz pilado clasificados como granos rojos (sup) contra granos estándar (inf).	47
Figura 34. Ilustración de los granos de arroz pilado clasificados como granos manchados (sup) contra granos estándar (inf).	48
Figura 35. Ilustración de los granos de arroz pilado clasificados como granos yesosos (sup) contra granos estándar (inf).	49
Figura 36. Porcentaje para grano dañado obtenido en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD). Las barras representan el error estándar de la media.	51
Figura 37. Porcentaje para grano rojo obtenido en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD). Las barras representan el error estándar de la media.	52
Figura 38. Porcentaje para grano manchado obtenido en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD). Las barras representan el error estándar de la media.	52
Figura 39. Porcentaje para grano yesoso obtenido en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD). Las barras representan el error estándar de la media.	53
Figura 40. Análisis de normalidad Q-Qplot para variables de grano dañado y grano rojo, obtenidas por los métodos tradicional, digital por área y digital por peso.	54
Figura 41. Análisis de normalidad Q-Qplot para variables de grano manchado y grano yesoso, obtenidas por los métodos tradicional, digital por área y digital por peso.	55
Figura 42. Correlaciones entre los resultados obtenidos mediante AT y AD para las propiedades de grano dañado (a), rojo (b), manchado (c) y yesoso (d).	56
Figura 43. Ejemplificación del proceso de análisis para propiedades de blancura y transparencia, imagen original (a), imagen resultante del proceso deconvolution (b), imagen resultante del proceso thresholding (c).....	57
Figura 44. Porcentaje de blancura en grano obtenido en las muestras de arroz pilado por medio del análisis digital y el equipo automático SATAKE. Las barras representan el error estándar de la media.	62
Figura 45. Porcentaje de transparencia en grano obtenido en las muestras de arroz pilado por medio del análisis digital y el equipo automático SATAKE. Las barras representan el error estándar de la media.	63
Figura 46. Grado de pulido en grano obtenido en las muestras de arroz pilado por medio del modelo de regresión y el equipo automático SATAKE. Las barras representan el error estándar de la media	63
Figura 47. Análisis de normalidad Q-Qplot aplicados en las variables de blancura, para el método digital y el equipo SATAKE.	64
Figura 48. Correlación entre los resultados obtenidos para las variables de blancura y transparencia.	65
Figura 49. Correlación entre los resultados obtenidos para las variables grado de pulido.	65

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Porcentaje de puntilla.....	16
Ecuación 2. Porcentaje de grano quebrado total.....	16
Ecuación 3. Ecuación para la recta de longitud máxima vs peso.....	23
Ecuación 4. Ecuación general de una regresión polinomial univariable.....	24
Ecuación 5. Sistema de ecuaciones para determinar factores de regresión polinomial univariable. ..	24
Ecuación 6. Ecuación general de una regresión lineal multivariable.....	24
Ecuación 7. Sistema de ecuaciones para determinar factores de regresión lineal multivariable.....	24
Ecuación 8. Coeficiente de correlación.....	24
Ecuación 9. Coeficiente de determinación.....	24
Ecuación 10. Error estándar residual.....	25

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Porcentajes de puntilla obtenidos en las muestras de arroz pilado analizadas por el método tradicional.....	29
Cuadro 2. Porcentajes de puntilla obtenidos en las muestras de arroz pilado analizadas por el método digital por área.....	30
Cuadro 3. Modelo de regresión polinomial aplicado a los resultados obtenidos mediante el método digital por peso para el factor puntilla.....	30
Cuadro 4. Porcentajes de puntilla obtenidos en las muestras de arroz pilado analizadas por el método digital de peso.....	31
Cuadro 5. Porcentajes de grano quebrado obtenidos en las muestras de arroz pilado analizadas por el método manual.....	37
Cuadro 6. Porcentajes de grano quebrado obtenidos en las muestras de arroz pilado analizadas por el método digital por área.....	38
Cuadro 7. Modelo de regresión polinomial aplicado a los resultados obtenidos mediante el método digital por peso para el factor grano quebrado.....	39
Cuadro 8. Porcentajes de grano quebrado obtenidos en las muestras de arroz pilado analizadas por el método digital por peso.....	39
Cuadro 9. Porcentajes de grano dañado obtenidos en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el análisis digital (AD).....	46
Cuadro 10. Porcentajes de grano rojo obtenidos en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el análisis digital (AD).....	47
Cuadro 11. Porcentajes de grano manchado obtenidos en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el análisis digital (AD).....	48
Cuadro 12. Porcentajes de grano yesoso obtenidos en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el análisis digital (AD).....	50
Cuadro 13. Modelo de regresión lineal multivariable aplicado a los resultados obtenidos para la propiedad de blancura.....	58
Cuadro 14. Resultados para propiedad de blancura obtenidos con el equipo SATAKE MM1D y análisis digital por área.....	59
Cuadro 15. Modelo de regresión lineal multivariable aplicado a los resultados obtenidos de las capas para la propiedad de transparencia.....	60
Cuadro 16. Resultados para propiedad de transparencia obtenidos con el equipo SATAKE MM1D y análisis digital por área.....	60

Cuadro 17. Modelo de regresión lineal multivariable aplicado a los resultados de las capas obtenidos para la propiedad grado de pulido.....	61
Cuadro 18. Resultados para propiedad grado de pulido obtenidos con el equipo SATAKE MM1D y modelo de regresión (MR).....	61

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Resultados totales del análisis digital por área para grano entero, quebrado y puntilla.	76
Anexo B. Resultados totales del análisis digital por peso para grano entero, quebrado y puntilla.	77
Anexo C. Resultados totales de las propiedades de blancura en grano pulido mediante el método digital.	78
Anexo D. Resultados totales de las propiedades de blancura obtenidas en grano pulido mediante el equipo Satake MM1D.....	79
Anexo E. Resultados del estadístico de prueba Shapiro-Wilk para las variables de puntilla.	79
Anexo F. Análisis de correlación entre los resultados obtenidos para puntilla mediante análisis tradicional y análisis digital por área.	79
Anexo G. Análisis de correlación entre los resultados obtenidos para puntilla mediante análisis tradicional y análisis digital por peso.....	80
Anexo H. Resultados de la prueba ANOVA para la variable de puntilla.	80
Anexo I. Resultados del estadístico de prueba Shapiro-Wilk para las variables de grano quebrado. .	80
Anexo J. Análisis de correlación entre los resultados obtenidos para grano quebrado mediante análisis tradicional y análisis digital por área.	80
Anexo K. Análisis de correlación entre los resultados obtenidos para grano quebrado mediante análisis tradicional y análisis digital por peso.....	80
Anexo L. Resultados de la prueba ANOVA para la variable de grano quebrado.	80
Anexo M. Resultados del estadístico de prueba Shapiro-Wilk para las variables de grano dañado, rojo, manchado y yesoso.....	81
Anexo N. Análisis de correlación entre los resultados obtenidos mediante el método tradicional y digital para grano dañado, rojo, manchado y yesoso.	81
Anexo O. Resultados del estadístico de prueba Shapiro-Wilk para las variables de blancura, transparencia y grado de pulido.	81
Anexo P. Análisis de correlación entre los resultados obtenidos mediante el método digital y equipo automático SATAKE para las propiedades de blancura y transparencia.	82
Anexo Q. Análisis de correlación entre los resultados obtenidos mediante el modelo de regresión (MR) y el equipo automático SATAKE para el grado de pulido.....	82
Anexo R. Algoritmo utilizado para analizar propiedades de grano entero, quebrado y puntilla (GQEP) en ImageJ.....	82
Anexo S. Algoritmo utilizado para analizar propiedades de mesa en ImageJ.	83
Anexo T. Algoritmo utilizado para analizar propiedades de blancura en ImageJ.	86
Anexo U. Algoritmo utilizado para cuantificar propiedades de GEQP por área en Rstudio.	87
Anexo V. Algoritmo utilizado para cuantificar propiedades de GEQP por peso en Rstudio.	88
Anexo W. Algoritmo utilizado para cuantificar propiedades de mesa en Rstudio.	89
Anexo X. Algoritmo utilizado para cuantificar propiedades de blancura en Rstudio.....	90

INTRODUCCIÓN

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo el estudio de viabilidad para un método de análisis digital por imágenes, utilizado para determinar propiedades de calidad en granos de arroz. Esto se desarrolló haciendo uso de los softwares ImageJ 1.563c y Rstudio 1.4.1717. Este análisis fue aplicado a las propiedades de grano quebrado, puntilla, grano manchado, grano con daño mecánico, grano yesoso, grano rojo y grano contrastante, definidas por el Reglamento Técnico Nacional RTCR 202:1998 para arroz pilado, mediante procesos de análisis por umbrales de valores límite. También fueron analizados los factores de blancura, transparencia y grado de pulido mediante procesos de deconvolución, estas fueron contrastadas con los resultados obtenidos por el equipo automático MM1D Rice Milling-SATAKE. Para las propiedades de grano entero, quebrado y puntilla (GEQP), se compararon los puntos porcentuales (pp) del método de análisis estándar tradicional (AT) con dos métodos de análisis digitales (AD), por área y peso asignado, respectivamente. Mientras que para las propiedades de mesa (dañado, rojo, manchado y yesoso), junto con las propiedades de blancura y transparencia, se empleó el análisis digital por área. El grado de pulido fue obtenido como resultado de un modelo de regresión lineal, utilizando los valores de las propiedades de blancura y transparencia obtenidas por el equipo SATAKE, como variables predictoras. Se realizaron análisis de correlación gráfica y de hipótesis, haciendo uso las pruebas de Pearson y Spearman, para corroborar así la viabilidad de los métodos digitales. Se obtuvo para las propiedades de GEQP coeficientes de correlación (R^2) altos (0,93 – 0,99) entre los métodos de AD y AT, siendo más preciso en los resultados obtenidos, el método digital por peso, tanto para puntilla como grano quebrado. Para las propiedades de mesa se obtuvo coeficientes menores, siendo el grano manchado, el que presentó un mayor valor de correlación (0,68 y 0,75). Para el caso de las características de blancura, se obtuvo coeficientes de correlación (R^2) de aproximadamente 0,5 para blancura, 0,75 y 0,85 para transparencia; y finalmente para el grado de pulido, valores de aproximadamente 0,5 para ambas pruebas de análisis. Comprobando de esta forma una alta viabilidad de los métodos de análisis digital para la identificación de las propiedades GEQP, una viabilidad media para la identificación de las propiedades de grano manchado y transparencia; y una baja o nula viabilidad del método en el análisis de las demás propiedades estudiadas.

Palabras clave: análisis digital, arroz, imagen digital, calidad de granos, propiedades de mesa, blancura de granos, transparencia de granos, grado de pulido.

CAPÍTULO 1. Marco Teórico.

1.1 Antecedentes.

El análisis digital de imágenes ha mostrado ser una excelente alternativa en los muestreos de calidad para granos comercializados en el mercado, con la intención de reemplazar el tradicional panel sensorial humano. Por ello, se ha realizado gran cantidad de investigaciones basadas en sus propiedades de forma, longitud, blancura, color y daño interno (Herath, 2016); (Mahale & Korde, 2014), entre otras. Siendo una excelente metodología en comparación con los métodos biológicos y químicos que son usados en la detección del tipo de semilla y calidad, los cuales son más costosos y de mayor complejidad (Devi et al, 2017). Este método de verificación de calidad es utilizado en análisis e identificación de diferentes variedades de grano, mostrando resultados altos en exactitud para la mayoría de los casos, al ser comparados con la calificación técnica dada por los evaluadores en diferentes sistemas de prueba (Ghatkamble & Vishwanatha, 2017). De igual manera, Acosta et al (2017), previamente lograron desarrollar una metodología capaz de identificar de forma certera defectos visuales de interés comercial en los granos de arroz, tales como: granos colorados o con estrías rojizas, granos yesosos, con panza blanca, granos manchados, partidos y picados, esto según los estándares establecidos por El Código Alimentario Argentino.

Las principales técnicas de preprocesamiento digital, que fueron aplicadas en investigaciones anteriores, utilizan como métodos directos o combinación de estos: suavizado, parametrización de valores límites “thresholding”, filtración, dilatación, erosión, detección de límites geométricos, remoción de fondo, contraste, segmentación de imágenes, entre otros (Gudipalli et al, 2016, Petrou & Petrou, 2010). En combinación con ellos se han realizado análisis de capas por color en configuración: Rojo, Verde, Azul (RGB por sus siglas en inglés), como métodos de percepción por múltiples capas para el entrenamiento de una red o sistema de procesamiento (Silva & Sonnadara, 2013). De forma similar, también se ha realizado el análisis de muestras digitales utilizando escalas de grises y redes neuronales de información continua neuronal “networks”, como método de entrenamiento en sistemas de análisis digital (Mousavirad et al, 2012). Así como también, el análisis por configuración: Matiz, Saturación e Intensidad (HSI por sus siglas en inglés) y Matiz, Saturación y brillo (HSB), entre otras. Obteniendo valores con alta correlación, mayores al 90 % en los resultados determinados por la aplicación de estos métodos en la gran mayoría de investigaciones publicadas. De esta manera, se ha destacado a la tecnología digital como una efectiva herramienta en la evaluación de la calidad de los alimentos, razón por la cual se requiere para la calibración del sistema de evaluación, una apropiada selección de la técnica de procesamiento, según el objetivo o propiedades de análisis que se quieren estudiar (Gudipalli et al, 2016).

1.2 Importancia del tema.

Dada la necesidad de ofrecer a los consumidores la garantía y seguridad nutricional de los alimentos, como parte fundamental de los requerimientos comerciales, se crean reglamentos, normas y decretos que deben ser seguidos para este fin. Por esto, existen tanto a escala nacional como internacional, organizaciones públicas y privadas que se encargan de ofrecer y ejecutar apoyo de carácter logístico a las entidades implicadas en la cadena comercial (Parada & Chacón, 2005), lo cual es fundamental para el funcionamiento eficiente de los sistemas guía en la cadena productiva (Oconitrillo, 2020). Dichos estatutos permiten supervisar la comercialización de los

alimentos, como es el caso de los granos de arroz, otorgando como función principal a los respectivos entes reguladores, el velar por la protección del consumidor, en términos de calidad e inocuidad.

En Costa Rica se utiliza como protocolo y parámetro para el análisis de calidad, lo establecido en los Reglamentos Técnicos Nacionales: RTCR 406:2007 y RTCR 202:1998, para el caso del arroz en granza y para arroz pulido respectivamente, en donde estos últimos, fueron los considerados para estudiar la comprobación de viabilidad para la determinación de las propiedades de mesa, características morfológicas o dimensionales y factores de blancura. Y de forma específica, fue en esta área del proceso o dinámica del agromercado arrocero (Figura 1), en la cual el presente trabajo de investigación se basó para llevar a cabo su línea de estudio y función aplicable de resultados obtenidos.

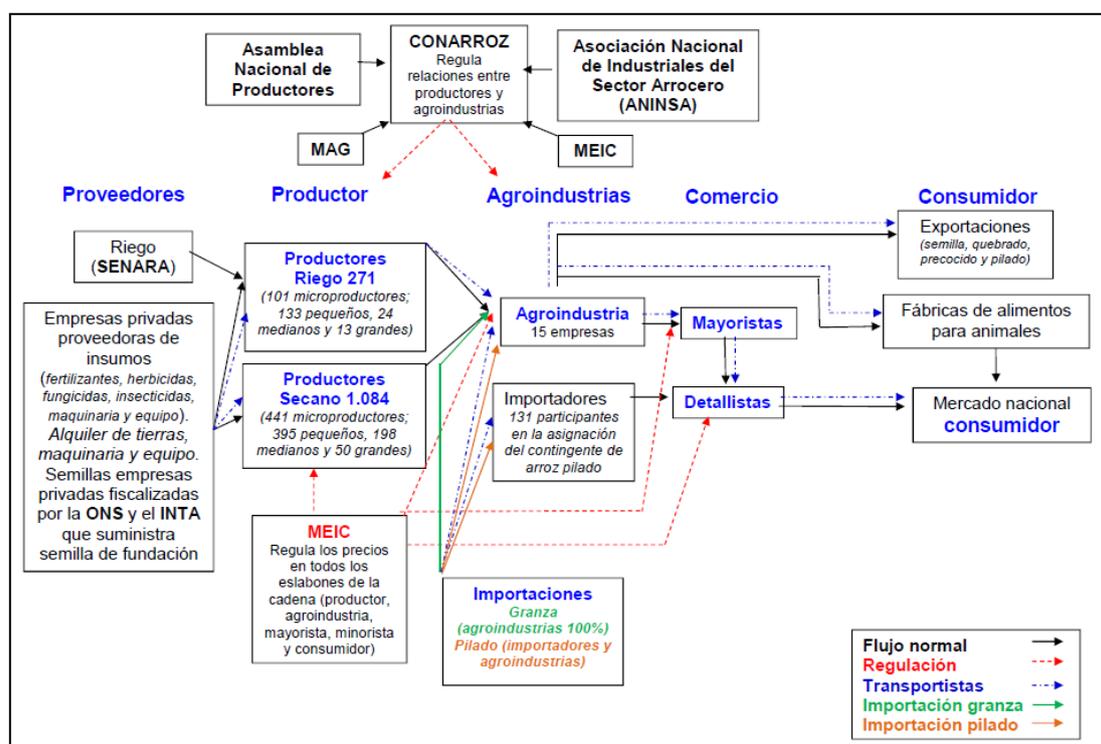


Figura 1. Sectores involucrados en el entorno nacional para la fijación del precio del arroz (Fuente: Arroyo et al, 2013).

El proceso de regulación, el cual involucra la inspección de calidad e inocuidad del grano es fundamental en la cadena comercial entre productores y la agroindustria, para verificar la calidad del producto bruto y determinar el precio específico del grano entre los vendedores mayoristas y detallistas (Figura 1). Esto también aplica para los productos “secundarios” que son importados al país y forman parte de la agroindustria como material de consumo animal generalmente. El grano que es exportado en sus diferentes presentaciones, junto con este producto destinado a la fabricación de alimento animal, no son regulados mediante los métodos de inspección concernientes al presente trabajo de investigación.

La garantía de calidad se logra mediante el establecimiento de clases, características, calidades y métodos de análisis para la comercialización de alta calidad para el arroz nacional (FAO, 2018b). Así como también, clasificando las diferentes variedades disponibles en el mercado, con base en las propiedades de calidad e interés comercial, tales como: tamaño, forma, blancura, tiempo de cocción y limpieza, junto con otros factores que definen el precio de

transacción del arroz. Condiciones que son afectadas por las prácticas y métodos de procesamiento en postcosecha, así como los procesos de molienda y pulido que podrían representar pérdidas directas a los molineros o productores de grano (Yadav & Jindal, 2001).

En Costa Rica dicha labor es llevada a cabo principalmente por el Ministerio de Economía, Industria y Comercio (MEIC), en conjunto con entidades pares como el Ministerio de Salud (MS), El Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), el Servicio Fitosanitario del Estado (SFE), entre otras, con la finitud común de velar por la regulación del arroz en el mercado nacional. Existen varios reglamentos y leyes que deben ser considerados en la regulación del precio y comercio en general del arroz. Se enfatiza en este trabajo el Decreto N° 26901-MEIC: RTCR 202:1998. Arroz Pilado. Especificaciones y métodos de análisis, 1998.

Es importante resaltar que, a partir del mes de febrero del 2015, con la publicación del Decreto Ejecutivo N° 38.884-MEIC, se inició un proceso sistemático de desregulación del esquema productivo, con la finalidad de migrar a una modalidad de comercialización más abierta para el arroz, tanto en granza como pilado. Y de esta forma permitir al sector arrocero implementar acciones que mejoren sus condiciones de competitividad y sostenibilidad de forma más ágil. Según el último informe de Valuación de Costos de la Industrialización de Arroz Pilado, para el año 2019 se obtuvo un costo total para la presentación en saco de 46 kg, igual a ₡23.851,69 y para el empaclado en bolsas de 24 kg, un total de ₡24.073,27. Recomendando al consumidor, rangos de presentaciones entre 90% y 100% de grano entero, y entre 81% y 89% de grano entero. Y un precio máximo para la presentación 80/20, igual a ₡608 por kg, presentación más consumida en el país (cerca del 40% del consumo nacional total) (Vargas & Gutiérrez, 2019).

Tomando en cuenta que el precio de un producto de la canasta básica nacional, como lo es el arroz, tiene un impacto directo en la economía y condición económica de sus consumidores, es de suma importancia su regulación y el velar por su justo trato en el mercado. Se puede definir al precio como la acumulación de costos basados en las actividades de una organización, que luego son reflejados en el precio de un producto, servicio u otro objeto de costos que causaron la actividad inicialmente (Vicerrectoría de Investigación UCR, 2018). De aquí surge la necesidad directa de sistemas para cuantificar calidad, que permitan mantener un estándar homogéneo en el grano comercializado. A nivel nacional, es utilizado como método de análisis, la inspección manual por técnicos de laboratorio, equipados con sistemas de tamizado e instrumentos que permiten la inspección ocular, de una forma amplificada. Mediante estos métodos se evalúa la condición y la calidad de los granos, según las regulaciones establecidas por decreto nacional. Dicha metodología será conocida en el presente documento como el: análisis tradicional (AT).

Se debe considerar que, la utilización y aplicación del protocolo tradicional implica una serie de posibles problemáticas, características de un proceso de inspección técnica realizado por un panel humano. Ante esto, la aplicación de un sistema de análisis digital podría implicar una reducción importante en los principales factores adversos presentes en la dinámica de análisis actual, tales como: discrepancia de resultados de evaluación, el alto costo que conlleva personal técnico altamente calificado y experimentado, y el principal de estos el error humano. Por ello, la tecnología de análisis digital podría implicar una mejora directa al procesamiento o ser una herramienta que acompañe al técnico en su proceso de clasificación de calidad.

Stallard et al (2018) mencionan como los tipos de errores más frecuentes en las inspecciones de calidad: el error tipo I, también conocido como una falsa alarma que ocurre cuando es identificado un defecto que realmente no está presente; y el error tipo II, el cual ocurre cuando es pasada por alto alguna imperfección. Estos autores correlacionan ambos tipos de

errores con los siguientes factores: capacitación de inspectores, tipo de juicio utilizado en el proceso, material defectuoso, condiciones ambientales y las capacidades del inspector.

El error humano se puede presentar cuando el comportamiento o su influencia sobre el sistema de análisis excede el límite de aceptación. Como principales factores negativos de importancia en la medición del error humano, se deben considerar la fatiga física y mental, causante de situaciones tales como: equivocaciones (acciones erróneas producto de una planificación incorrecta), lapsus (omisiones u olvidos) y slips o deslices (fallas en la ejecución motora de la acción) (Salas et al, 2017). Los procesos de inspección visual son exigentes, incluso para los inspectores entrenados, esto es debido a la amplia variación en las características visuales, causada por clases contrastantes, variedad y efectos ambientales (Brosnan & Sun, 2004).

La ambigüedad entre resultados y el tiempo requerido para las pruebas técnicas son factores que también podrían influir en la eficiencia del método de análisis tradicional. Se requiere un tiempo promedio de 1 hora y 24 minutos para realizar el análisis tradicional para presentaciones de grano entero de 95%, mientras que para presentaciones de 50% grano entero, se requieren en promedio 2 horas, según mediciones realizadas en el CIGRAS para los ensayos en granos de arroz pilado.

Por su parte, el análisis digital aplicado a la inspección de productos biológicos ofrece una alternativa viable en la reducción y prevención de estos errores y/o factores adversos en las pruebas de calidad. Resaltan Li et al (2009) en su investigación aplicada, a la visión artificial, como un método de análisis que muestra buenos resultados en pruebas de calidad aplicadas en fases de postcosecha. Éstas se relacionan con una mejor calidad en el producto final, ofrece eliminación de inconsistencias en evaluaciones de tipo manual y de igual forma, una reducción en la dependencia de personal técnico experimentado. Estos los adjudica al establecimiento de parámetros fijos y estandarizados, que permitan estudiar características digitales que fueron previamente establecidas, ya sea de una forma cuantitativa o cualitativa.

Debido a la necesidad de establecer parámetros estandarizados y condiciones técnicas, que permitan la aplicación del método científico la presente investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS) de la Facultad de Ciencias Agroalimentarias en la Universidad de Costa Rica (Sede Rodrigo Facio), bajo el marco del proyecto de investigación: Evaluación de la calidad comercial de los granos de arroz pilado: efecto del uso de otras tecnologías y variedades comerciales (B9125), inscrito ante la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica. Se trabajó en conjunto con el personal técnico del Laboratorio de Análisis de Calidad de Granos, utilizando el equipo del laboratorio y en el proceso de capacitación e instrucción de uso. Para el análisis digital de las imágenes y el procesamiento de los datos se utilizaron los softwares libres: Rstudio 1.4.1717 y Fiji ImageJ 1.563c.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo General.

Estudiar la viabilidad técnica del análisis digital de imágenes y el uso del equipo MM1D Rice Milling Meter en el arroz comercial regulado por el Reglamento Técnico Nacional, para determinar los factores de calidad en los granos de arroz pilado y nivel de blancura.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Analizar y parametrizar los factores de calidad en muestras de granos de arroz pulido (grano quebrado, puntilla, grano manchado, grano con daño mecánico, grano yesoso, grano rojo y grano contrastante), mediante el uso del método manual establecido en el RTCR 202:1998 y el procesamiento digital de imágenes.
- Comparar y evaluar estadísticamente los resultados obtenidos experimentalmente con el método técnico tradicional (según el RTCR 202:1998) y el procesamiento digital.
- Evaluar la transparencia, blancura y grado de pulido en muestras de arroz pilado comercial ofrecido en el mercado nacional, utilizando el medidor de blancura MM1D SATAKE y análisis digital.

1.4 Marco muestral.

El presente trabajo de investigación evaluó un método alternativo de análisis para determinar los factores de calidad, en los granos de arroz que se comercializan a nivel nacional e internacional. Para ello, se utilizó la metodología técnica de análisis, especificada por el RTCR 202:1998, este análisis técnico se realiza con granos de arroz pulido, utilizando procesos netamente mecánicos, donde por mediciones de masas, son calculados pérdidas en los procesos, contenidos de granza, cantidad de semolina removida y posteriormente, en conjunto con la inspección visual, son estimados porcentajes de grano entero, quebrado, puntilla, dañado, entre otras.

Es así, como la implementación de imágenes digitales se puede considerar como una posible alternativa en los análisis de calidad u otras características de interés mercantil, económico y nutricional. Los resultados obtenidos por Solano (2018) en su trabajo de investigación, evidencian el alto potencial de las imágenes digitales en la verificación de correlaciones entre variables como peso y dimensión, con información obtenida a través de un análisis digital de las capturas. La línea objetivo del presente trabajo, está delimitada a la validación de una metodología digital alternativa, para la determinación de calidad en granos, utilizando como referencia, los resultados obtenidos a través del método de análisis tradicional técnico, en el laboratorio.

Con respecto a la validación de métodos, Ávila et al (2012) asociaron la evaluación interlaboratorial, con una mayor concordancia en los resultados de análisis de la apariencia del grano de arroz pulido, destacaron los resultados obtenidos en las pruebas sobre granos translúcidos, yesosos, granos con panza blanca y dañados. Es importante considerar que, para el desarrollo de este proyecto, realizado en las instalaciones del CIGRAS, los resultados de referencia obtenidos por el análisis tradicional, no fueron comparados de forma interlaboratorial, debido a condiciones sanitarias y restricciones, del otro único laboratorio comparable y certificado en Costa Rica, en el periodo de experimentación requerido. Por lo tanto, se podría considerar una posible variación entre los resultados y la realidad de las muestras. Lo que, para su defecto en la práctica, no será considerado y los resultados obtenidos mediante el método tradicional serán referencia exacta para la comparación estadística entre pruebas. No debe ser esta condición, motivo para desconsiderar la calidad de evaluaciones realizadas por los técnicos del CIGRAS, los cuales, son sometidos a procesos de capacitación y calibración periódicamente.

Existe amplia variedad de investigaciones y documentación, en donde se redactan diversas metodologías para el procesamiento de imágenes digitales y la evaluación de características de calidad en ellas. Es por esta razón, que la creación de una metodología algorítmica no fue la finalidad del trabajo, aunque si se requirió la creación de una propia y específica, sino más bien, la aplicación de esta y su validación como método de análisis bajo las normativas establecidas en el RTCR 202:1998 (Decreto N° 26901, 1998).

La temática de esta investigación varió de otras aplicadas, en la cantidad de granos analizados por análisis, utilizando muestras de aproximadamente 25 g por cada captura. Proporcionando así, la posibilidad de analizar digitalmente muestras grandes (100 g o más) conformadas por miles de granos, en periodos de tiempos relativamente cortos (7 - 23 min aproximadamente). Permitiendo comparar diferentes métodos de análisis con exactamente la misma muestra en volumen y cantidad.

1.5 Orígenes del grano.

La producción de arroz tradicional de mesa (*Oryza sativa*) para el consumo humano es originaria de China. Este fue domesticado 3000 AC en las regiones húmedas de Asia tropical y subtropical, para luego extenderse al continente Africano 1500 años AC (Oladimeji et al, 2018), situación similar a la de la India. Introduciéndose posteriormente a Europa, en los siglos VIII, IX y X, para llegar finalmente al continente americano, a través de las conquistas colonialistas y el trasiego de esclavos de origen africano.

En Costa Rica, se localizan en las regiones de Esparza y el valle del Río Grande de Tárcoles, las primeras zonas dedicadas al cultivo de arroz, en el año 1780. Iniciando de esta forma su producción en el Valle Central y expandiéndose posteriormente, hacia las regiones norte, y del pacífico, durante los siglos venideros. En la década de 1950, el sistema productivo recibió importantes estímulos con el fin de expandir la actividad agro-arrocera en el país, lo cual desplazó al maíz como principal cereal consumido por los costarricenses. Paralelamente, la producción de arroz se expandió en el Pacífico Norte, entre 1950 y 1970, para luego desarrollarse en el Pacífico Central en las décadas de 1970 y 1980 (Arroyo et al, 2013).

1.6 Panorama mundial del grano.

El arroz constituye una de las principales fuentes de alimento para la nutrición humana, en la mayor parte del mundo y, en consecuencia, es de fundamental importancia para la seguridad alimentaria global. Este grano aporta vitaminas, minerales, elementos y aminoácidos esenciales para la nutrición, de tal forma que representa una de las principales fuentes de alimento para casi la mitad de la población mundial (Sadeghi et al 2013).

El arroz es el cuarto grano de mayor producción en el mundo. Su labor agraria representa el 8% del área cultivada a nivel mundial, con un equivalente a 157 millones de hectáreas, produciendo 740 millones de toneladas de grano, equivalentes al 30% de todos los granos producidos en el mundo. Permitiendo alimentar de esta manera, 4 mil millones de personas alrededor del mundo, al ser consumido por aproximadamente el 56% de la población total y con una economía valuada en 206 mil millones de USD, equivalente al 13% del valor mundial de granos producidos (CGIAR Research program on rice, 2017). Durante el año 2016, la producción fue de aproximadamente 740 961 miles de toneladas, superada únicamente por la producción de caña de azúcar, maíz y trigo. Paralelamente, para el año 2018 se produjeron 780 000 miles de toneladas (FAO, 2018a), resaltando una tendencia creciente al colocar como punto de comparación el año 2006, donde se obtuvo una producción estimada de 640 706 miles de toneladas (FAO, 2018b).

A nivel centroamericano, el arroz es uno de los tres principales granos básicos de consumo y mercadeo, además del frijol y del maíz. Según cifras de la FAO los principales países de consumo de arroz, aparente per cápita en la región son: Panamá, Costa Rica y Nicaragua (FAO, 2015). Sus volúmenes de producción en granza para el 2019 fueron de aproximadamente: 305 000 toneladas para el caso de Panamá, 153 805 toneladas para Costa Rica, 406 000 toneladas para Nicaragua, 42 000 toneladas para Guatemala, 57 244 toneladas Honduras y 35 000 toneladas para El Salvador, respectivamente (FAO, 2021).

1.7 Panorama nacional del grano.

Para el caso específico de Costa Rica, país que se califica como alto consumidor del grano de arroz, se promedia un 34,6% de dependencia en la dieta costarricense y su canasta básica de consumo. El volumen aproximado de producción es de más de 150 000 toneladas anuales, mientras que el volumen de importación es de más de 80 000 toneladas, con menos de 10 000 toneladas para el caso de reservas y exportaciones (FAO et al 2013).

Para el año 2019, se contó con 36 978,92 ha del territorio nacional dedicadas a la producción del grano, más de 3300 ha menos que en el año 2014. La producción se dio principalmente en la región Chorotega del país, que contó con 19357,39 ha dedicadas a la siembra de arroz (un 41,53% del total de la producción nacional), seguida de la región Brunca, con un 18,81%, equivalente a 6 955 ha. En la zona del Pacífico Central se produjo un 16,27%, equivalente a 6017,19 ha. Por su parte, en la zona Huetar Norte la producción alcanzó un 12,22%, equivalente a 4517,84 ha. Finalmente, en la región Huetar Caribe, únicamente se produjo un 0,36% de la producción total, lo cual equivale a 132 ha (INEC, 2019)

Específicamente, para el periodo 2019-2020, se obtuvieron 149 339 toneladas del grano en granza, producto del trabajo de 497 productores nacionales, en un área de laboreo equivalente a 33 048 ha. Este volumen al ser procesado y agrupado con las importaciones, dio como resultado un total de 239 972 toneladas de grano pilado, consumido por los costarricenses en este periodo de tiempo. Lo anterior equivale a un consumo de 19 998 toneladas mensuales y a 47.70 kg per cápita (CONARROZ, 2020). Por lo cual, la regulación y certificación de la calidad del arroz es fundamental para la seguridad alimentaria del país.

La regulación y control de calidad del grano en el mercado nacional, es contemplada por el MEIC, el cual realiza su labor mediante sub-apéndices de control, como lo es el Departamento de Verificación de Mercado y la Comisión Nacional del Consumidor, entre otros. En el país los únicos laboratorios autorizados y debidamente acreditados para los análisis de calidad por el Ente Costarricense de Acreditación, son el Laboratorio de Análisis de Calidad de Granos del CIGRAS y el Laboratorio de Control de Calidad de CONARROZ.

Dichas entidades han logrado realizar una mejora continua y de gran importancia en verificar la calidad del producto brindado al consumidor costarricense. Esto se ha obtenido mediante incentivos, regulaciones y exigencias de mejoramiento en los procesos productivos, logrando para el año 2018, pasar de un 30,5% a un 6,52% en el nivel de inconformidad en la calidad de los productos, en el parámetro de grano quebrado, con respecto al año anterior (Cerdas, 2018). Lo anterior evidencia la importancia del papel que desarrollan estas instituciones para garantizar la seguridad y la calidad de los alimentos a nivel nacional, utilizando metodologías de inspección mecánica y modalidades de panel sensorial, entre otras.

1.8 Análisis digital de imágenes como herramienta en la evaluación de calidad.

Como resultado de las condiciones y del entorno comercial actual, se han tomado consideraciones en los sectores productivos, con respecto a temáticas como la higiene, la seguridad de consumo y problemáticas con alimentos adulterados, en cualquiera de sus fases de la cadena de suministros. Existe una tendencia creciente a demandar una inspección de calidad, rápida y precisa, que pueda ser aplicada de forma asertiva en los productos agrícolas y alimenticios comercializados. Estas evaluaciones de calidad aún son realizadas mediante procesos rutinarios en función de las preferencias del consumidor, utilizando inspecciones visuales y pruebas subjetivas para medir el nivel de satisfacción (Mohd Ali et al, 2020). Existen

metodologías basadas en la visión computacional y que son utilizadas en la determinación de grados de calidad para productos comestibles, en sus respectivas líneas de procesos. Estas brindan la posibilidad de predecir atributos de carácter sensorial tales como: color, apariencia y forma (Morales, 2008).

Una común aplicación de sistemas de análisis digital en modelos de comprobación de calidad para los alimentos es la medición de su color y la posterior transformación de esta información en unidades L, a, y b; esto, como una alternativa al uso de los colorímetros (Tarlak et al, 2016). El análisis por visión computacional ha mostrado ser una eficaz herramienta para la medición de color en carne, permitiendo detectar enfermedades en pollos de corral, esta industria exige un método de comprobación de calidad rápida y sin contacto mediante la evaluación de color (Barbin et al, 2016).

Las técnicas de análisis para imágenes digitales, en combinación con sistemas de captura en diferentes espectros de luz, son en la actualidad una herramienta altamente útil en la evaluación no destructiva de calidad para productos agrarios. Se debe considerar que la gran cantidad de información generada por estos procesos de análisis es una tarea ardua de procesar y esto involucra una importante dificultad de su aplicación en los procesos industriales en tiempo real. Por esta razón, se deben complementar los métodos de análisis con algoritmos emergentes y eficientes que permiten analizar factores de calidad en tiempo real, cómo lo es la aplicación del aprendizaje profundo, un proceso de automatización, en las etapas de entrenamiento del método (Saha & Manickavasagan, 2021).

1.9 Captura de imagen.

La utilización de sistemas de escáner tipo “flatbed” permite la digitación e interpretación digital de imágenes bidimensionales. Esto es logrado por sus dos principales partes funcionales: el mecanismo de escaneo y software de interpretación digital; este primero se conforma del sistema fotodetector CCD (charged coupled device) y una fuente de luz (Zheleznyak & Sidorov, 2015).

Un hardware CCD o en otros casos CMOS (complementary metal oxide semiconductor) se encuentra compuesto por un arreglo matricial de diminutas celdas fotoeléctricas, estas interactúan con los fotones que chocan en su área de contacto, la cual entre más amplia sea, mayor será el campo de captura que podrá obtener (Alfaro et al, 2001). Este sensor permite transformar la intensidad de luz en la imagen escaneada, a potenciales eléctricos o voltajes, y posteriormente ser convertidos a señales digitales numéricas (binarias) mediante el convertidor analógico digital.

Debido a que un sensor fotoeléctrico solamente puede captar e interpretar una longitud de onda a su vez, se utiliza un arreglo de sensores interpolados y superpuestos que permiten crear una imagen a color (Figura 2). Este patrón se repite y compone el arreglo matricial del sensor CCD.

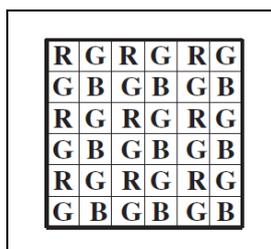


Figura 2. Arreglo de bandas roja (R), verde (G), y azul (B) en un sensor típico CCB (Fuente: Petrou & Petrou, 2010).

Como se muestra el arreglo matricial de los fotorreceptores se encuentra en una configuración RGR y GBG intercala por filas (Figura 2). Cada píxel o conjunto de estos, representa una respectiva porción de la imagen total. La información o magnitud electrónica captada por cada píxel, es introducida a la computadora en un arreglo fila-columna, formato que ofrece una representación de la imagen real (Raji & Alamutu, 2005).

Para la captura, los objetos que requieren ser escaneados son colocados primeramente sobre una placa de vidrio transparente y fija, debajo de la cual es acarreado el sistema óptico del escáner, que emite un rayo de luz que rebota sobre la superficie del objeto. Dependiendo de la longitud de onda respectiva a su coloración, porciones de este son absorbidas o reflejadas hacia los fotodetectores. Sobre la superficie de los fotodetectores la información es separada por colores (3 bandas) mediante el convertidor analógico digital y finalmente es reorganizada en formato digital, haciendo uso del software de análisis e interpretación (Zheleznyak & Sidorov, 2015).

1.10 Procesamiento de Imagen.

El procesamiento digital de las imágenes capturadas está usualmente compuesto por etapas o pasos bien definidos. Esto le permite ser aplicada a gran cantidad de granos, analizar gran variedad de colores y configuraciones o texturas, entre otras (Mousavirad et al, 2012).

La metodología general en el análisis digital de granos consiste en una primera fase de segmentación de la imagen, donde se separan los granos muestra del fondo y entre ellos mismos, luego se realiza la extracción de capas o conjuntos de datos característicos a una respectiva banda y/o propiedades morfológicas de interés analítico. Se continua con la fase de selección, donde se determinan las características superiores, que serán la base de “conocimiento” para el sistema clasificador o estructura de análisis, para el caso de una red neural automatizada o no, respectivamente (Siddagangappa & Kulkarni, 2014). Posteriormente, se finaliza el proceso con la clasificación, conformado por tres fases: la fase de entrenamiento, donde se entrena al clasificador mediante correcciones y pruebas, la fase de validación cruzada, donde se corrobora la problemática y objetivo del algoritmo solucionar y la fase de pruebas, donde se valida la clasificación (Zareiforous et al, 2016).

1.11 Interpretación algebraica de datos.

El proceso requerido para lograr una efectiva traducción o transformación de la información, que puede ser interpretable desde una imagen digital a un conjunto de datos matriciales, consiste en métodos de análisis algebraicos e informáticos. Se entiende como una imagen digital a la matriz de valores en función de las variables de posición (x, y), donde el valor

de brillo está dado por la función $f(x,y)$, en una configuración cuadrada de N columnas y N filas, tal y como se ejemplifica en la Figura 3.

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(1,1) & \cdots & f(1,N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f(N,1) & \cdots & f(N,N) \end{bmatrix}$$

Figura 3. Matriz de datos en una imagen digital (Fuente: Petrou & Petrou, 2010).

El brillo está relacionado con la visibilidad de la respectiva onda a interpretar en la imagen total. Para el caso de una imagen a color compuesta por bandas en diferentes longitudes de onda, se utilizan en forma general tres vectores o arreglos matriciales, que representan su brillantez específica por banda, aunque podrían ser cientos, si se requiere un profundo análisis multispectral (Petrou & Petrou, 2010).

Estas tres bandas son usualmente: R, G y B y están asociadas respectivamente a los colores: rojo, verde y azul (“red”, “green” y “blue”; por sus siglas en inglés), pero también existen configuraciones de banda H, S, B (“hue”, “saturation” y “brightness”; por siglas sus en inglés), entre otras. Las cuales correlacionan valores numéricos a un respectivo píxel de una imagen digital y son también conocidos como “signaturas espectrales”. La conformación de estos arreglos matriciales o capas, se basa en el número de elementos en la imagen original, que cumplen con los valores frontera de brillo en una banda. Se aplica un arreglo vectorial para su segmentación, tal y como se muestra en la Figura 4.

$$\begin{aligned} R(i,j) &= \begin{cases} R_0(i,j) & R_0(i,j) \leq T_r \\ 255 & R_0(i,j) > T_r \end{cases} \\ G(i,j) &= \begin{cases} G_0(i,j) & G_0(i,j) \leq T_g \\ 255 & G_0(i,j) > T_g \end{cases} \\ B(i,j) &= \begin{cases} B_0(i,j) & B_0(i,j) \leq T_b \\ 255 & B_0(i,j) > T_b \end{cases} \end{aligned}$$

Figura 4. Arreglo vectorial para segmentación de imagen en bandas R, G y B (Fuente: Li et al., 2009).

En el arreglo algebraico de la Figura 4, $R_0(i,j)$, $G_0(i,j)$, $B_0(i,j)$ y $R(i,j)$, $G(i,j)$, $B(i,j)$ son los valores de gris en píxel para los tres canales, antes y después de la segmentación de fondo, respectivamente; mientras que T_r , T_g , T_b son los valores límite para la segmentación de fondo. El valor 255 corresponde al fondo, un color netamente blanco, es el utilizado usualmente en la práctica de análisis digital por imágenes en arroz (Li et al., 2009).

Para ser obtenidas estas capas de arreglos numéricos, deben ser primeramente divididas de la imagen total inicial, para poder estudiar su aporte a esta. Esto se realiza mediante el establecimiento de un valor umbral y la creación de una imagen binaria que será utilizada para delimitar las regiones de interés. En ImageJ/Fiji las imágenes binarias tienen un valor de 0 (fondo) o 255 (objeto). Este método permite establecer objetivamente el valor de intensidad umbral o límite y posteriormente su cuantificación (Campa, 2017).

1.12 Requerimientos para la captura digital.

Para lograr obtener imágenes digitales con una calidad, tal que, se permita determinar variaciones o irregularidades en muestras de granos, se requiere una estación de captura con características idóneas. Un sistema capaz obtener imágenes claras y lo mayormente libres de ruido, distorsión, reflejo y demás inconsistencias presentes en la imagen (Gomez, 2018), con una resolución de imagen de 8 Mp o más preferiblemente. Además, se requiere de una iluminación uniforme, bajo una intensidad de luz, que permita visualizar con precisión una muestra (Zhang, et al., 2021).

Es necesario emplear un fondo que permita resaltar la muestra y contraste con su coloración. Asimismo, se recomienda utilizar color azul o negro como fondo, para simplificar las fases de segmentación en el análisis digital, al igual que la utilización de cubiertas oscuras, lo cual elimina el ruido ambiental que pudiese interferir en la imagen (Zareiforous et al, 2016).

1.13 Método de muestreo.

Se utilizó como método tradicional de muestreo, el análisis visual del grano, el cual consistió en una meticulosa inspección de las muestras por medios tradicionales de calidad técnica. Posteriormente, se utilizó un sistema de captura tipo escáner flatbed, para la obtención de las contrapartes digitales, finalmente, un equipo automatizado para la obtención de propiedades de blancura.

1.14 Unidad experimental.

Se utilizaron 10 unidades muestrales de arroz pilado, compuestas por tres bolsas comerciales en presentaciones de 1,8 kg, con la misma marca y porcentaje de grano entero y teóricamente, el mismo lote de producción. Cada muestra se denominó con los códigos muestrales 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260 y 261. Las unidades muestrales se seleccionaron de cinco diferentes marcas de actual oferta en el país (denotadas como: A, B, C, D y E), con porcentajes de grano entero iguales a: 80%, 91%, 95% y 99%. Se realizaron tres repeticiones por cada unidad muestral, una por cada bolsa de 1.8 kg. De estas se extrajeron mediante, a través de un proceso de homogenización previo, específicas masas representativas según la característica de interés a analizar.

Para el análisis de grano quebrado y de puntilla, se utilizaron 100 g de muestra, para el análisis de las propiedades de mesa: grano dañado, manchado, rojo, yesoso y contrastante, se utilizó una masa de 25 g. Análogamente, para el análisis de blancura, transparencia y grado de pulido se utilizaron muestras con una masa de 25 g para el análisis digital y para el análisis mediante el equipo Milling Meter MM1D (capacidad máxima de la recámara en el equipo).

1.15 Comparación estadística.

Para la comparación estadística, se realizó primeramente un análisis de normalidad para cada variable, relacionada a los resultados de cada característica de interés (propiedades de GEQP, propiedades de mesa y características de blancura) obtenidas por métodos tradicionales o métodos digitales. Posteriormente, se analizó el nivel de correlación entre estas, para ambas dinámicas de análisis, utilizando pruebas de correlación (Pearson y Spearman), así como, métodos estadísticos descriptivos sobre la muestra (gráficos), e interpretando sus resultados de forma inferencial, para la clasificación general de las unidades muestrales.

Para la utilización de la prueba de Pearson se requiere que ambas variables sean continuas y presenten una distribución normal, por su parte los niveles de significancia de la prueba se establecen con relación a la media y desviación estándar de las variables (Mishra et al, 2019). Asumiendo como hipótesis nula, la igualdad entre las medias. Por su parte, la prueba de Spearman es aplicada cuando la relación entre las variables es curvilínea o no lineal, cuando se viola el supuesto de normalidad bivariada, pero de igual manera se requirió realizar una prueba de hipótesis, y también cuando existen en las distribuciones de los resultados valores extremos. Se utilizó esta prueba para comprobar la asociación entre dos variables o poblaciones de datos, estableciendo como hipótesis nula, el hecho de que no existe una asociación entre estas (Mendenhall et al, 2010).

CAPÍTULO 2. Materiales y métodos.

El presente trabajo se desarrolló bajo el seguimiento de una estructura de pasos, correlacionados con el desarrollo y ejecución de los objetivos específicos, los cuales se aprecian en la Figura 5.

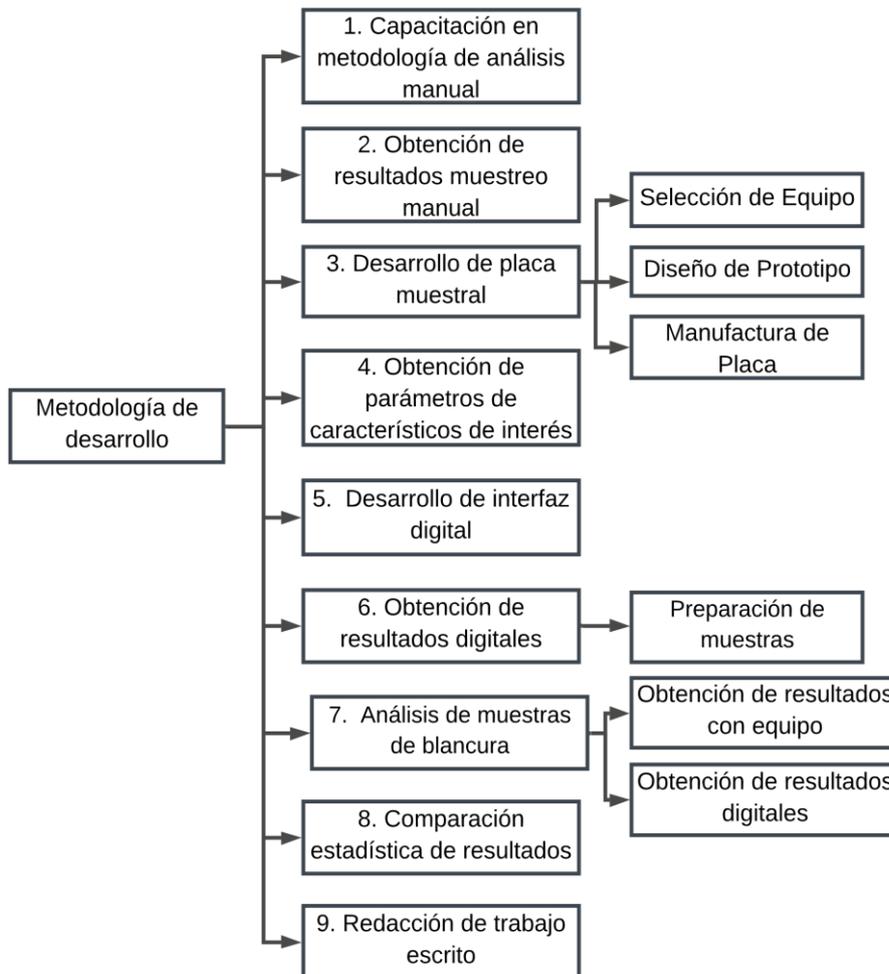


Figura 5. Diagrama de metodología desarrollada y aplicada (Fuente: Elaboración propia).

La secuencia de fases fue establecida con la finalidad de poder desarrollar la práctica desde sus etapas conceptuales. Iniciando con la capacitación y práctica del método de análisis tradicional, para continuar con el desarrollo de un sistema y metodología de análisis digital, continuando con las pruebas experimentales y finalmente concluir con la comparación por métodos estadísticos de cada propiedad analizada.

2.1 Capacitación en metodología de análisis manual.

Como parte inicial del proyecto se estudió, analizó y ejecutó la dinámica de análisis de calidad de granos de arroz, de forma tradicional, implementada en el laboratorio. Mediante la corrida de diferentes muestras por los métodos mecánicos de división, seguido por el análisis de mesa (Figura 6). Cabe resaltar que, los porcentajes de grano quebrado, puntilla y grano entero, se analizan en una submuestra homogenizada de 100 g; mientras que las propiedades de mesa se estudian con otra submuestra aparte de 25 g. Con este método de ensayo se obtienen resultados acertados y con un aceptable nivel de precisión según los criterios técnicos de calidad reglamentarios.

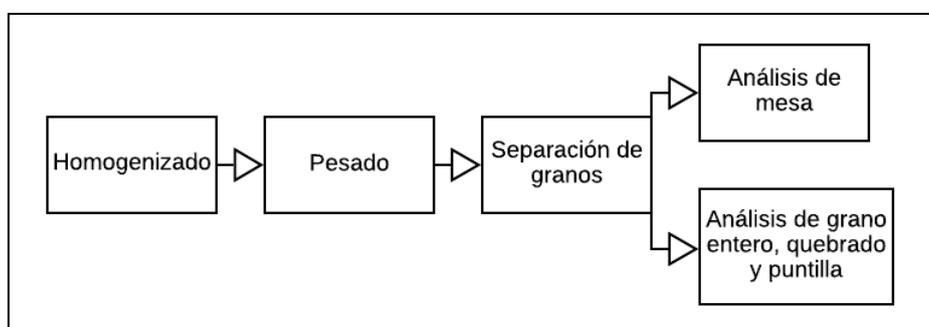


Figura 6. Proceso de análisis con metodología tradicional (Fuente: Elaboración propia).

Los equipos utilizados son mantenidos en óptimas condiciones de uso, almacenamiento y calibración. Los procesos involucrados y su mecanismo de acción son descritos a continuación de forma general.

- Homogenizado y división de muestra inicial. Se utiliza un equipo de precisión para la división de las muestras, el cual tiene como principio de función la fuerza centrífuga ejercida por un pequeño motor. Esto logra dividir una muestra del grano en submuestras equitativas y representativas de la muestra completa.
- Pesado. Se utilizan balanzas electrónicas con una precisión de más de 0,001 g.
- Separación de granos. Para la separación de grano quebrado, puntilla y grano entero se utilizó una máquina de separación mecánica por zarandeo. Esta realiza la separación física mediante la agitación de la muestra sobre las placas cribadas de calibres N°12/64 (4.76 mm) y N°6 (2.38 mm), para separar el grano quebrado y la puntilla, respectivamente.
- Análisis de grano entero, quebrado y puntilla. Los porcentajes de grano bajo estas categorías fueron determinados mediante el pesado de los elementos previamente separados y categorizados.
- Análisis de mesa. Las evaluaciones de factores de mesa determinan la calidad en arroz pilado en una muestra homogenizada de 25 g, bajo las especificaciones técnicas del reglamento RTCR 202:1998 (Decreto N° 26901, 1998). En donde se evalúa el grano dañado por calor, grano manchado, grano yesoso, grano rojo y grano contrastante. Los

granos identificados bajo estas características, con el uso de la lupa e iluminación, son separados de forma manual y pesados individualmente.

2.2 Obtención de resultados por muestreo manual

El análisis y obtención de resultados se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Análisis de Calidad de Granos del CIGRAS, de la Universidad de Costa Rica, donde fueron utilizados los equipos y metodología descrita en el punto anterior. Estos resultados fueron designados bajo las siglas “AT”, referentes al análisis tradicional. Para la obtención de los porcentajes de puntilla y grano quebrado se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$PP = \left(\frac{P}{Ma}\right) * 100 \quad (1)$$

$$PQG = \left(\frac{Q+P}{Ma}\right) * 100 \quad (2)$$

Donde:

- *P*: masa de puntilla obtenida.
- *Ma*: masa de la muestra.
- *Q*: masa de grano quebrado obtenida.

2.3 Desarrollo de placa muestral.

Para la obtención de una placa muestral que permitiera agilizar el proceso de captura y evitar el traslape de granos en la imagen resultante, se realizaron varias pruebas de fabricación para placas muestrales. Esto con la finalidad de poder comparar la capacidad y limitación de fabricación (corte láser), así como del material a utilizar y el patrón de distribución, tiempo requerido para preparar la muestra y su nivel de dificultad, entre otros.

2.3.1 Selección de equipo.

Para la manufactura de los cortes borde y patrones del acrílico para la placa muestra, fue llevado a cabo por un sistema láser CO₂. Por su parte, para la obtención de las imágenes digitales se utilizó el escáner de calidad profesional Epson Perfection V700 Photo. Sistema capaz de obtener imágenes de alta resolución, hasta 6400 dpi (puntos por pulgada, por sus siglas en inglés), equivalente a 2519,6 pixeles/cm, brindando imágenes con un peso y calidad digital de más de 117 Mb.

Para la fase de análisis de blancura, transparencia y grado de pulido, se analizaron muestras conocidas en la máquina medidora de blancura MM1D Rice Milling Meter, de marca Satake (Figura 7). El funcionamiento de este equipo se basa en los principios de absorbancia y reflectancia de la luz sobre la superficie del arroz para medir su respuesta al espectro (Yadav & Jindal, 2001), lo cual permite obtener porcentajes de blancura, transparencia y grado de pulido en una escala de: 5,0 – 70 %, 0,01 – 8,00 % y 0 – 199 (adimensional), respectivamente.

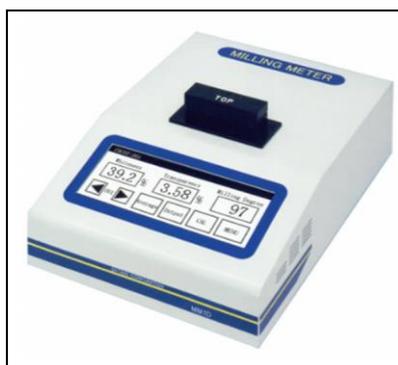


Figura 7. Medidor de blancura de arroz MM1D (Fuente: SATAKE, 2019).

Su método de uso consistió en una calibración inicial con placas o casets con magnitud de color definida (blanca y café), para luego, realizar la preparación de un caset muestral a analizar, con una capacidad de aproximadamente 25 g de arroz. Este caset fue posteriormente insertado en la ranura superior del equipo y mediante una luz LED de color azul interna, se logró determinar porcentajes de la blancura y transparencia, así como también grado de pulido en esta.

2.3.2 Diseño de prototipo.

Para obtener un sistema óptimo sin necesidad de realizar muchas pruebas de fabricación, se optó primeramente, por un diseño de prototipo prueba con varios patrones en él. Las dimensiones fueron de 7 mm x 2,4 mm para la forma de los orificios, con patrones ovalados (alveolos), tal y como se muestra en la Figura 8.

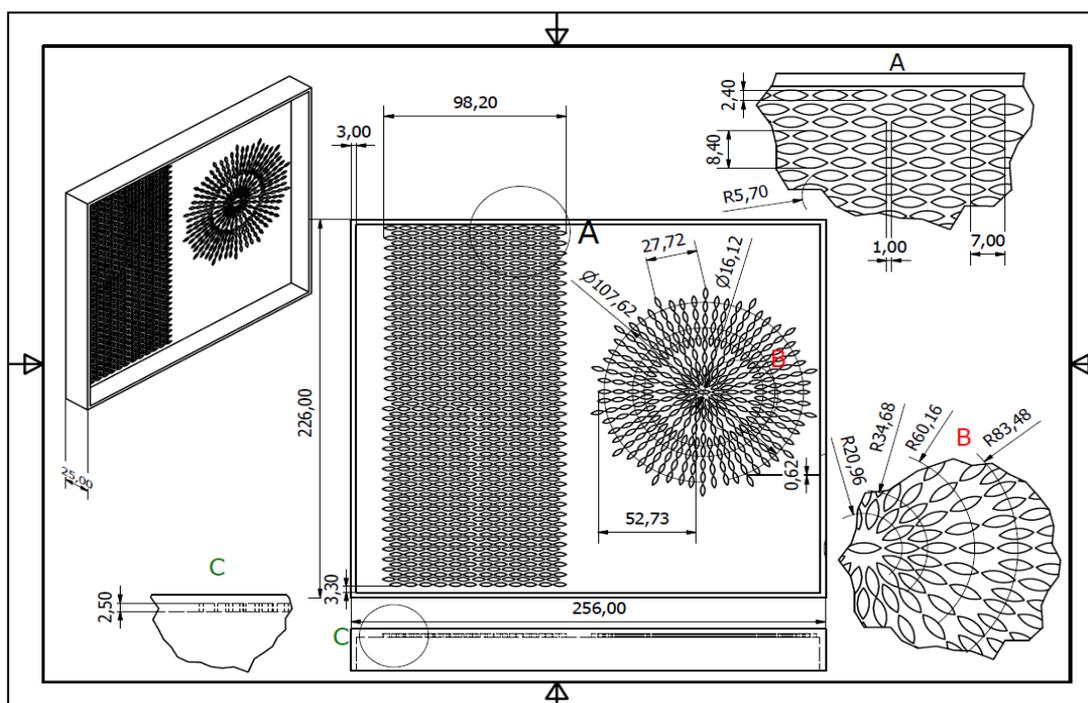


Figura 8. Diseño de placa muestral experimental (cotas en mm) (Fuente: Elaboración propia).

Este diseño prototipo presentó una dificultad muy alta para su elaboración, considerando la dimensión milimétrica de su perfil y el tiempo disponible del servicio. Por lo cual se requirió la elaboración de prototipos más simplificados y con un patrón de separación más sencillo, alveolos con direcciones lineales no concéntricas y espaciamentos más amplios entre estos, para reducir así, problemas de deformación por calor en el proceso de manufactura.

El primero de estos prototipos en ser fabricado se muestra en la Figura 9a, con un patrón circular sin orientación concéntrica en los alvéolos, contrario a como se había diseñado preliminarmente en la Figura 8 (por limitantes de precisión en equipo). También cuenta con un patrón rectangular más amplio, ambos esquemas en una placa transparente y con un grosor levemente mayor a 2,50 mm, factor no deseado ya que cada ranura pudo albergar un arroz sobre otro, lo cual se requirió evitar completamente. La segunda placa prototipo (Figura 9b), permitió comprender a fondo las limitaciones del equipo de corte y cómo aprovechar al máximo la capacidad de grabado láser en este material. Se optó por un patrón totalmente rectangular, con un grosor inferior a 2,5 mm y en color negro, con la intención de mejorar el contraste entre los granos y la placa muestral.

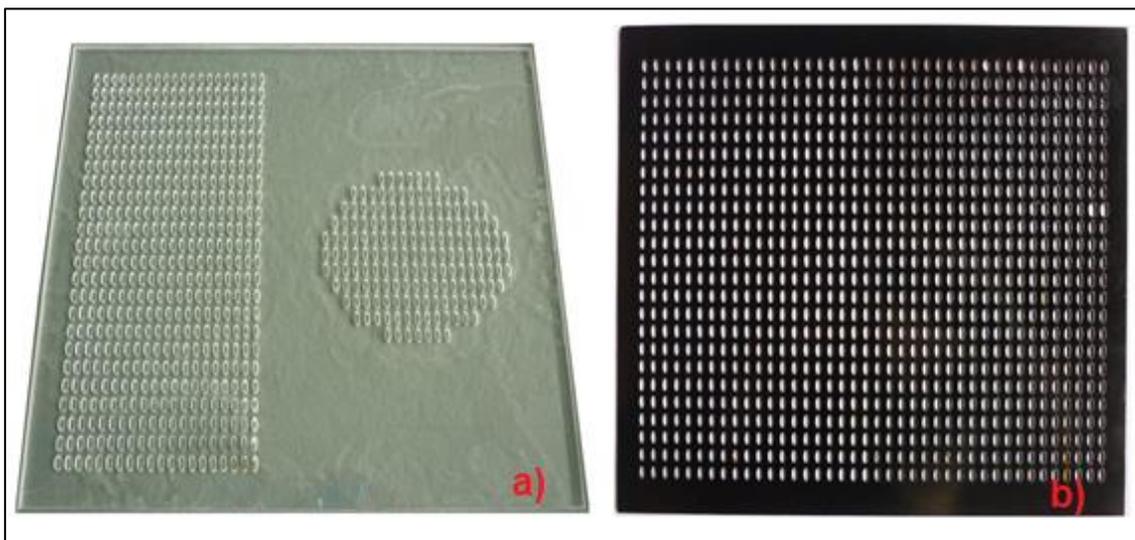


Figura 9. Prototipos de placas muestrales manufacturadas, placa inicial transparente (a) y placa con patrón seleccionado (b) (Fuente: Elaboración propia).

Estos diseños lograron ser de gran utilidad para minimizar los traslapes y fallos en la resolución del equipo, generados por el mal acomodo de los granos de arroz a la hora de tomar las imágenes. Y de igual manera, permitieron establecer las bases dimensionales, de funcionamiento y de material para la placa muestra al final.

2.3.3 Manufactura de placa.

La manufactura de la placa se realizó mediante un sistema de corte láser, en un taller privado. Finalmente, se optó por una placa de acrílico con patrón uniforme rectangular, de dimensiones: 21,9 cm x 25,7 cm y un espesor igual a 2 mm (Figura 10).

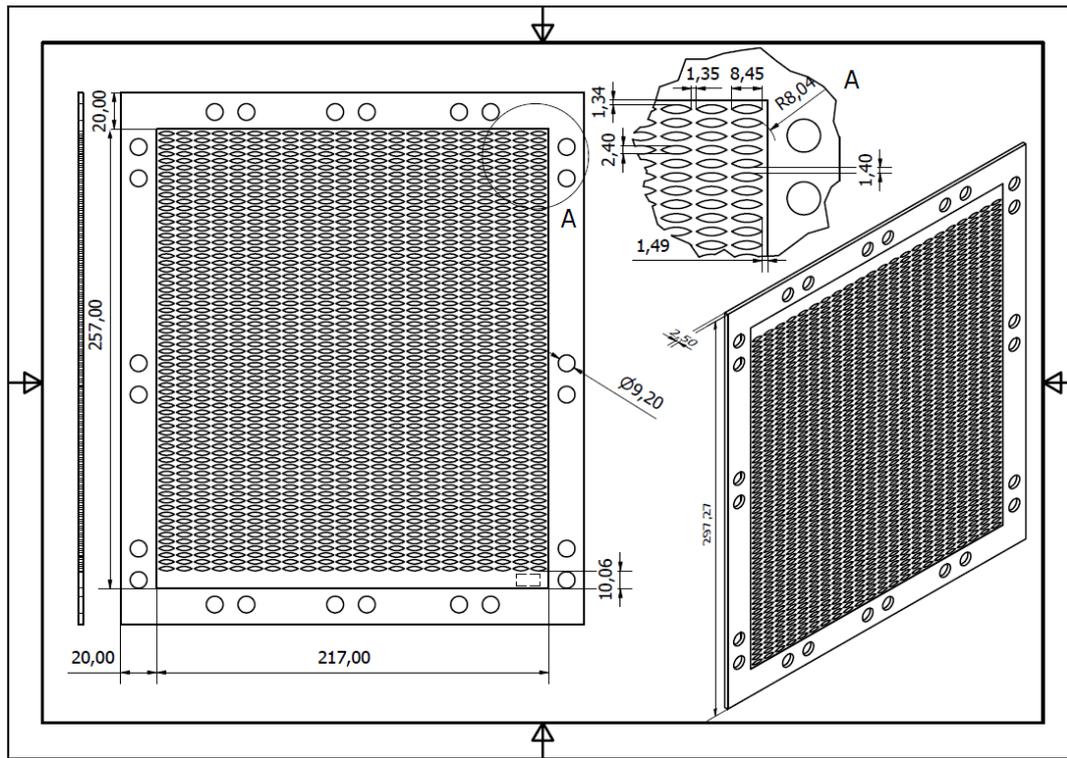


Figura 10. Diseño final de placa muestral (cotas en mm) (Fuente: Elaboración propia).

La placa muestral en la Figura 10 cuenta con 1430 orificios de forma ovalada con dimensiones 8,45 mm x 2,4 mm, es decir 1,45 mm más largo que los prototipos anteriores, con el fin de facilitar la colocación y conservación de la muestra, al no dañar el grano cuando se presionan las placas tapa. Asimismo, incluye una pequeña regla removible, en la parte inferior derecha del patrón de perforaciones, lo cual permitió calibrar correctamente las unidades de medición del software de análisis digital ImageJ. Mediante el uso de un acrílico con un grosor no mayor a 3 mm, se procedió a elaborar la placa del sistema propuesto (Figura 11).

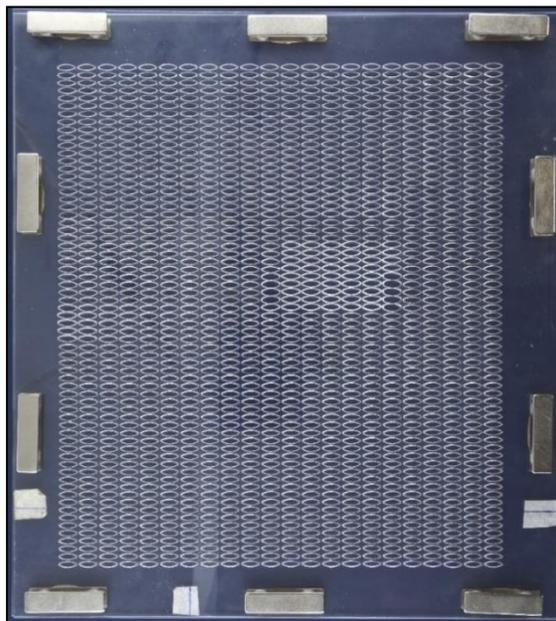


Figura 11. Placa muestral final para el análisis de arroz pilado, fabricada bajo especificaciones de diseño.

El sistema cuenta con una placa inferior lisa, esto con la función de fijar la muestra de arroz, una placa central perforada con el patrón de alveolos, diseñado para albergar la muestra y una tercera lámina lisa que encierra la muestra desde su posición superior. Por su parte, se utilizaron imanes en los bordes de las placas de fijación superior e inferior, para garantizar un cierre no destructivo y que brindara una fácil liberación de la muestra, así como también una imagen clara de los elementos a analizar.

2.4 Obtención de parámetros de características de interés.

En el caso específico de los porcentajes de puntilla, grano quebrado y grano entero se utilizaron los parámetros de longitud establecidos en el RTCR 202:1998 (Decreto N° 26901, 1998), específicamente menor o igual a 2,38 mm, entre 2,38 mm – 4,76 mm y mayor a 4,76 mm, respectivamente.

Para obtener los parámetros umbral de las características de mesa deseadas se prepararon muestras control, con elementos previamente identificados como característicos y de relevante importancia para el análisis digital. Se muestran en la Figura 12 una fila de estos elementos, y a su lado otra fila con granos normales (sin daños), para ayudar a identificar su diferenciación.

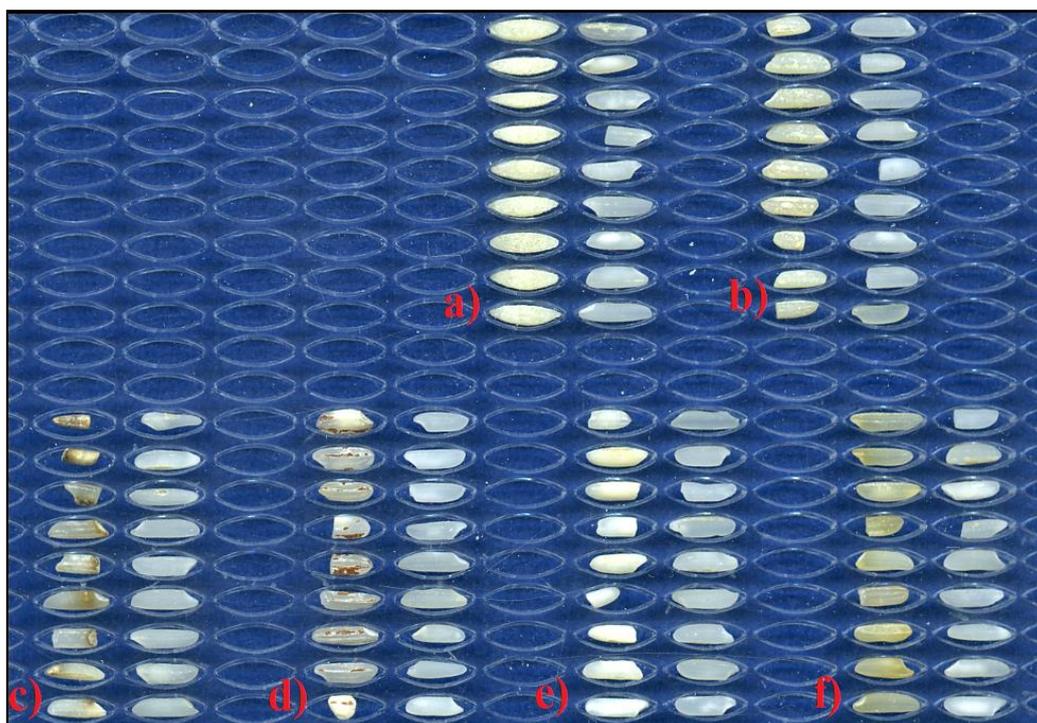


Figura 12. Muestras control de características de interés. Grano extruido (a), grano recubierto (b), grano dañado (c), grano rojo (d), grano yesoso (e) y grano manchado (f) respectivamente (Fuente: Elaboración propia).

Cabe destacar que, para el caso del grano contrastante no se realizó muestra de control individual, debido a su poca probabilidad de aparición, y a que este, no fue detectado por ningún método de análisis). En la Figura 12 se muestran no solamente las cuatro principales características de mesa, sino también, el grano extruido (a) y recubierto (b), elementos importantes que el sistema tuvo que diferenciar entre las demás características para evitar identificaciones erróneas. Una vez obtenidos y categorizados, se establecieron los parámetros

margen o frontera para el análisis digital de las muestras de experimentación, mediante métodos de procesamiento por “thresholding” y “particle analysis”.

2.5 Desarrollo de interfaz digital.

Para el desarrollo de la interfaz digital se optó por un mecanismo que procurara emular el modelo más simple de Red Neuronal Artificial, la de tipo Hacia Adelante (Artificial Neural Network Feed Forward). Sistema en el cual el flujo de información que ingresa desde las unidades de entrada y se dirige hasta las de salida es estrictamente hacia delante. El procesamiento de datos puede extenderse a través de múltiples capas de unidades, pero no hay conexiones hacia atrás (Morera, 2018), factor contrario a un sistema recíproco, el cual permite la interacción entre núcleos anteriores. Este último no fue aplicado debido a las limitaciones de software en el análisis categórico de los granos, al ser utilizada la variación de valores en las diferentes capas que componen la imagen (Red, Hue, Brightness, etc). Como mecanismo de identificación, se presentó la posibilidad de que un grano correctamente identificado y categorizado bajo una característica (rojo, por ejemplo), pudiese ser de nuevo identificado como manchado y duplicar el resultado.

Tomando en cuenta lo anterior, el mecanismo utilizado en este trabajo requirió de la corroboración humana de los resultados obtenidos por el software de análisis digital (neurona oculta), antes de pasar a los resultados de salida de peso. De igual manera esta requiere mucho menos tiempo en comparación con el tomado en el análisis tradicional y además ofrece gran cantidad de ventajas de análisis, tales como: zoom con detalles milimétricos, transposición de imágenes, corrección de ruido y mejoramiento de brillo, almacenamiento de resultados para uso futuro, entre otras más. Las imágenes digitalizadas se procesaron utilizando el software libre Fiji ImageJ 1.563c, con el que se obtuvo archivos de resultados en formato tiff y csv (excel), estos últimos se analizaron con el programa Rstudio 1.4.1717, para la obtención de porcentajes de características deseados, para así obtener un archivo de resultados conjunto para cada una de las muestras.

En el procesamiento digital, el software Fiji ImageJ permitió la obtención de parámetros digitales mediante análisis de valores por capas (composición RGB o HSB) y su manipulación por codificación en lenguaje Java. Se utilizaron algoritmos de fases o pasos para el procesamiento de imágenes en la identificación de las características de interés. Estas fases fueron constituidas por comandos o algoritmos específicos, relacionados a una respectiva herramienta de análisis en ImageJ, estos permitieron cuantificar, transformar y analizar la información requerida por pasos de ejecución consecutivos y replicables (Anexo R, Anexo S y Anexo T).

Con esto se logró obtener un método eficiente de análisis de calidad en granos, con menores tiempos requeridos, bajos requerimientos técnicos y con aceptables resultados, en comparación con los métodos tradicionales (Kumbharkar et al., 2016). La serie de pasos que se aplicaron en el software de análisis, tanto para el estudio morfológico del grano como el de características visuales, están representados en la Figura 13.

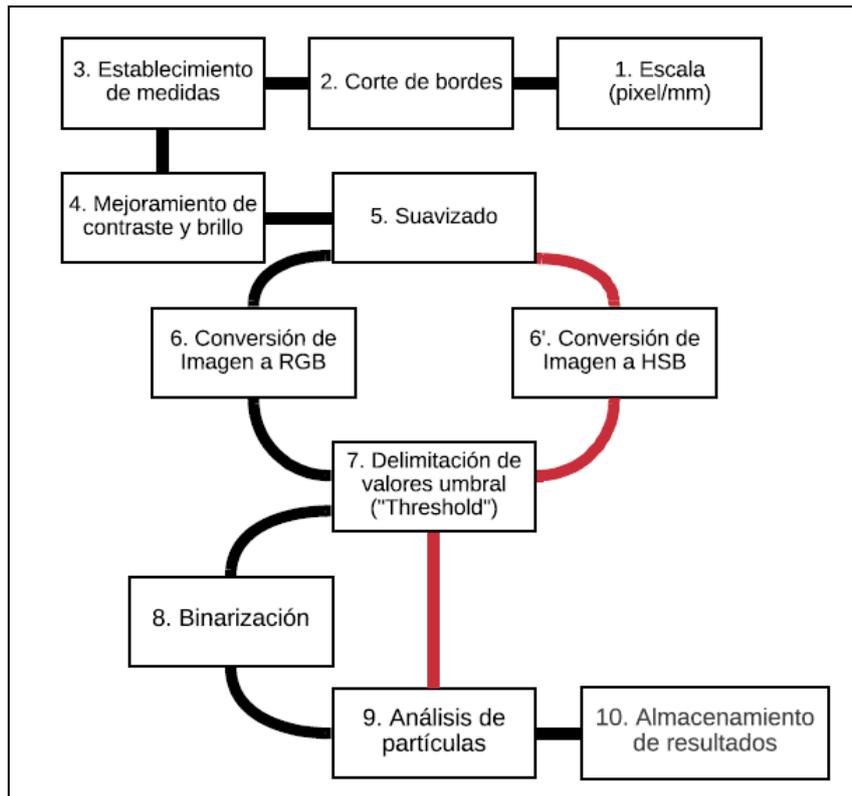


Figura 13. Serie de pasos implementada en el análisis digital para GEQP y propiedades de mesa (Fuente: Elaboración propia).

El análisis general inició con un proceso de escala, en donde el sistema asignó el número de píxeles presente en una longitud unidimensional real (regla en placa muestral). Posteriormente, se continuó con el corte de bordes innecesarios de la imagen y luego el establecimiento de las medidas requeridas para el análisis (área, circunferencia, perímetro, anchura, altura y distancia máxima entre dos bordes definidos del objeto “feret”, principalmente). Seguidamente, se procedió con un mejoramiento en el contraste y brillo de las imágenes, y un suavizado; con la intención de reducir la variedad de intensidad entre píxeles vecinos, junto con la disminución del ruido en la imagen, comandos requeridos antes de empezar el respectivo algoritmo de desarrollo (Herath, 2017). Una vez realizados estos procesos se aplicó una línea de trabajo distinta para la caracterización geométrica (grano entero, quebrado y puntilla) y otra para las características de mesa (grano manchado, rojo, yesoso, contrastante y dañado), representadas en la Figura 13 con color negro y rojo, respectivamente.

Para la caracterización geométrica se realizó una conversión de la imagen a una composición en capas: roja, verde y azul (RGB), para avanzar así con la delimitación de parámetros por valores umbral. Posteriormente, se continuó con un proceso de binarización y segmentación por patrón. Se debe recalcar, que la calidad de la imagen binaria depende en gran medida de qué tan apropiadamente se elija el umbral para la binarización, en otras palabras, qué tan bien se clasifiquen los píxeles en dos grupos (“threshold”) (Siddagangappa & Kulkarni, 2014), para luego terminar así el proceso con el análisis de partículas (Anexo R).

Por su parte, para las características de mesa, después del proceso de suavizado, se realizó una conversión de la imagen a una composición en las capas: matiz, saturación y brillo (HSB) mediante el análisis por valores umbral de intensidad por capa. La magnitud de estos valores fue determinada en base la interfaz de escala de intensidad por capa, ofrecida por la herramienta de

ImageJ, sus magnitudes pueden observarse en el Anexo S. Posteriormente, se realizó el análisis de partículas.

Una vez obtenidos los datos, estos fueron identificados y comprobados mediante la herramienta ROI. Los sistemas de identificación ROI permiten designar elementos de interés desde una imagen digital para su estudio exclusivo, ofrecen soluciones que no pueden ser obtenidas mediante dinámicas de procesamiento de imágenes estándar (Bäcker & Travo, 2006). Estos inclusive permiten establecer el contorno de los elementos identificados, con la finalidad de separarlos correctamente de su fondo, mediante la aplicación de procesos iterativos de segmentación (Silwal et al, 2014). Finalmente, los datos fueron almacenados en formato csv, como un archivo de resultados para cada característica o medición de interés.

2.6 Obtención de resultados digitales para propiedades de grano entero, quebrado, puntilla y mesa.

Los archivos resultantes del previo análisis fueron cargados en el software Rstudio (Anexo U y Anexo V), donde, haciendo uso de los algoritmos de análisis, para los datos generados por ImageJ (Anexo R y Anexo S), se obtuvo las magnitudes de área equivalente al total de granos entero, quebrado, puntilla y propiedades de mesa. Con estos valores de área se calculó el porcentaje de estas características en la muestra. La sumatoria total de la muestra corresponde a la porción de masa de grano entero, más la de grano quebrado y la de puntilla, fue en estas dos últimas, en las cuales se enfocó la comprobación y análisis comparativo. Esto, como resultado de su identificación por diferencias, ante el resultado previo de las otras dos propiedades.

Es importante mencionar que, para las propiedades de mesa todos los elementos detectados y cuantificados por el programa ImageJ fueron verificados y corregidos en la interfaz del código para Rstudio. Esto con la intención de reducir la cuantificación de datos errados, esta se realizó con una rápida inspección de cada imagen digital capturada, en donde los elementos identificados fueron corroborados mediante una comparación de la imagen digital inicial, la imagen digital de elementos totales identificados y los elementos de la característica de interés, todos bajo la herramienta de identificación ROI. En caso de ser rechazada la detección realizada por el sistema, en un elemento específico ya previamente identificado de forma numérica, se procedió a su eliminación mediante el ingreso de este valor en la interfaz del respectivo código de análisis.

Para el método de análisis digital por peso se catalogaron los elementos identificados en el análisis por dimensiones de área para grano entero, quebrado y puntilla, en intervalos de peso. Estos intervalos fueron establecidos del estudio realizado en una muestra de arroz (más 20 granos) a los cuales se les midió longitud y masa. Generando de esta forma la Ecuación 3, capaz de asignar un peso al grano con relación a su longitud máxima detectada. Estos resultados obtenidos fueron corregidos mediante la aplicación de un modelo de regresión lineal, método que involucró las Ecuaciones 4, 6, 8, 9 y 10 (Campos, 2011).

Ecuación de la recta de longitud máxima vs peso.

$$y = 0,0027x + 0,0007 \quad (3)$$

Donde:

- y : peso en g.
- x : longitud en mm.

Ecuación general de una regresión polinomial univariable.

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_mx^m \quad (4)$$

Donde:

- a : factores de regresión.
- x : variable predictora o explicativa.
- y : valores reales u observados de la variable que intenta explicar el modelo.
- n : número de observaciones en variable.

Sistema de ecuaciones para determinar factores de regresión polinomial univariable.

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0n + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 + \dots + a_m \sum x_i^m = \sum y_i , \\ a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 + \dots + a_m \sum x_i^{m+1} = \sum x_i y_i , \\ a_0 \sum x_i^2 + a_1 \sum x_i^3 + a_2 \sum x_i^4 + \dots + a_m \sum x_i^{m+2} = \sum x_i^2 y_i \\ \vdots \\ a_0 \sum x_i^m + a_1 \sum x_i^{m+1} + a_2 \sum x_i^{m+2} + \dots + a_m \sum x_i^{2m} = \sum x_i^m y_i \end{array} \right. \quad (5)$$

Ecuación general de una regresión lineal multivariable

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x^3 + \dots + a_mx^m \quad (6)$$

Sistema de ecuaciones para determinar factores de regresión lineal multivariable.

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0n + a_1 \sum x_{1i} + a_2 \sum x_{2i} + \dots + a_m \sum x_{mi} = \sum y_i , \\ a_0 \sum x_{1i} + a_1 \sum x_{1i}^2 + a_2 \sum x_{1i} x_{2i} + \dots + a_m \sum x_{1i} x_{mi} = \sum x_{1i} y_i , \\ a_0 \sum x_{2i} + a_1 \sum x_{2i} x_{1i} + a_2 \sum x_{2i}^2 + \dots + a_m \sum x_{2i} x_{mi} = \sum x_{2i} y_i \\ \vdots \\ a_0 \sum x_{mi} + a_1 \sum x_{mi} x_{1i} + a_2 \sum x_{mi} x_{2i} + \dots + a_m \sum x_{mi}^2 = \sum x_{mi} y_i \end{array} \right. \quad (7)$$

Coefficiente de correlación.

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (8)$$

Donde:

- y_i : valores reales u observados de la variable que intenta explicar el modelo.
- \bar{y} : media de la variable y .
- \hat{y}_i : Valores que estima el modelo de la variable explicada.

Coefficiente de determinación.

$$R^2 \quad (9)$$

Error estándar residual.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-p} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (10)$$

Donde

- p : número de parámetros.

2.6.1 Preparación de muestras.

La colocación de los granos en la placa muestral requirió un proceso de ejecución corto (Figura 14). Primeramente, estos se ubicaron en la superficie de la placa y con ayuda de una brocha se acomodaron en los patrones perforados. Durante el acomodo de los granos, se procuró evitar las superposiciones de estos, buscando con ello una adecuada identificación digital para cada grano por separado. Condición por la cual se optó por un espesor lo más reducido que las capacidades de fabricación permitieran producir y se pudiesen implementar en el proyecto.

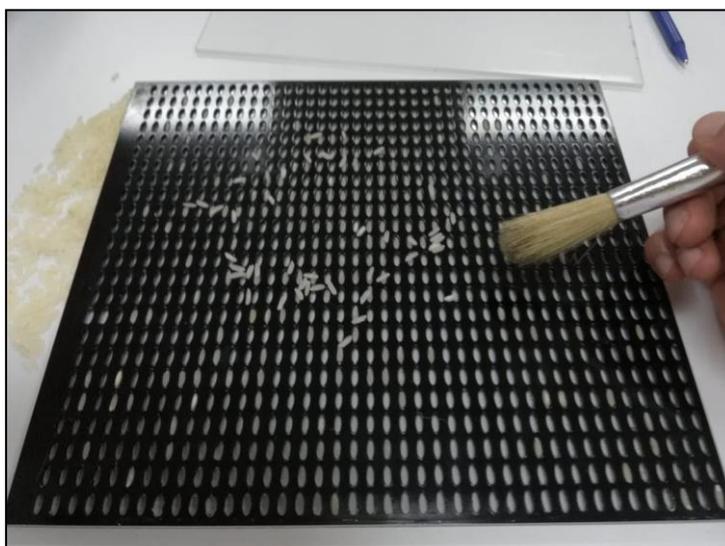


Figura 14. Proceso de preparación de las muestras de arroz pilado en la placa muestral prototipo.

2.7 Análisis de muestras de blancura.

La blancura del grano es una característica usualmente relacionada con la calidad y “pureza” del alimento, factor percibido como apetecible por parte del consumidor final, por lo que es de suma importancia en el mercado (Zuluaga, 2014). El color es el primer parámetro en ser evaluado por el consumidor de un producto, su presentación se relaciona con otros atributos de calidad y por ende es crítico en la influencia que este ejerce sobre la preferencia de elección final por parte del consumidor (Guadamuz, 2019). A pesar de su gran importancia y de ser un factor relevante en los análisis de calidad de industrias arroceras en gran cantidad de países, la blancura, la transparencia y el grado de pulido no son medidos ni delimitados como indicadores relevantes para la comercialización legal del grano en el país. Según Antonuc et al. (2014), además del control de granos quebrados, la característica de translucidez en el grano es de suma

importancia en el monitoreo de calidad para un producto terminado, que cumpla con estándares óptimos para la comercialización.

Por el hecho de no ser regulada la característica de blancura y sus respectivos factores a nivel nacional, no existe actualmente una norma específica para su evaluación, lo cual sí ocurre en gran variedad de mercados internacionales. Por lo tanto, se implementó un sistema de análisis comparativo específico para este estudio, donde se comparan los factores de blancura de cada unidad muestral mediante un análisis digital y los valores obtenidos por el sistema de detección automática Satake.

2.7.1 Obtención de resultados con equipo de blancura Satake MM1D.

Utilizando el equipo automático para la detección de blancura Satake MM1D (Figura 7) se obtuvo valores de blancura, transparencia y grado de pulido para las 10 unidades muestrales de arroz. Iniciando con un proceso de homogenización y extracción de grupos de masa específica igual a 25 g, uno para cada repetición. Seguidamente, se continuó con su inserción en la recámara de análisis del equipo, para realizarle así tres repeticiones por cada una de ellas. De esta manera, se obtuvo un grupo total de 90 datos resultante en el estudio y los promedios obtenidos de cada una de las tres repeticiones por subunidad muestral, fueron los usados en el análisis de resultados.

Las características de blancura buscan, a nivel industrial, ser propiedades que se encuentre en un rango homogéneo, al utilizar métodos de separación para el salvado de la superficie del endospermo, sin ejercer demasiado esfuerzo y presión. Para ello son utilizados usualmente, dos métodos en las líneas de producción, los sistemas de blanqueamiento por abrasión y los equipos de blanqueamiento por acción de fricción con agua a alta presión y a baja velocidad periférica (Fasabi, 2019).

2.7.2 Obtención de resultados digitales para blancura, transparencia y grado de pulido.

Para la obtención de los factores de blancura mediante el método digital, se hizo uso del proceso de “deconvolution”, el cual proporcionó la separación de la imagen en sus componentes o capas: azul, roja, y verde, esto mediante una transformación ortonormal de la información RGB de la imagen (Chen et al, 2017). Este proceso en conjunto con sistemas de regresión lineal, permitieron obtener porcentajes de datos ajustados, en la escala de valores respectiva a las propiedades requeridas. Se observa en la Figura 15 los pasos utilizados por el algoritmo de análisis en el software ImageJ, para la obtención de las propiedades: blancura y transparencia. Una vez obtenidos estos resultados digitales, se hizo uso del código programado en Rstudio (Anexo X) para la cuantificación de los elementos dictados por el software ImageJ.

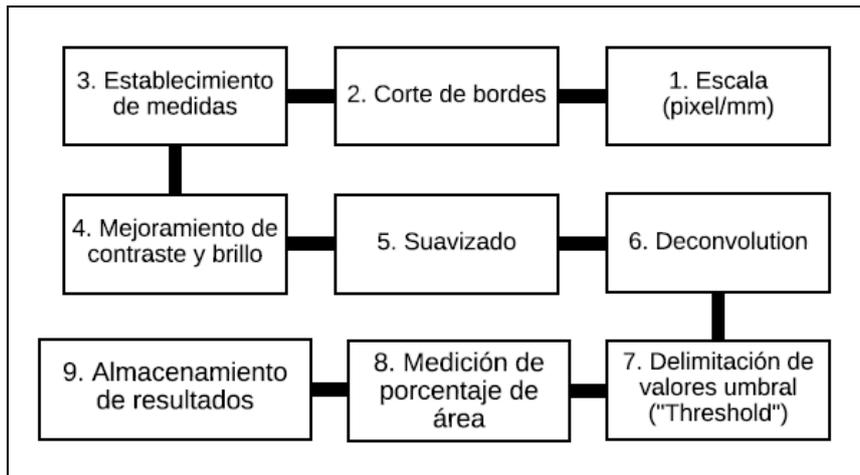


Figura 15. Serie de pasos implementada en el análisis digital de blancura (Fuente: Elaboración propia).

2.8 Comparación estadística de resultados.

Inicialmente, se utilizó como tratamiento estadístico, la prueba de Shapiro-Wilk y el método gráfico Q-Q plot, para analizar la normalidad en las distribuciones de los conjuntos de datos. Seguidamente, tratando los resultados de los dos métodos de experimentación, como grupos de variables dependientes, pareados, se utilizaron tanto una prueba de Pearson (recomendado para variables pareadas con distribución normal) como de Spearman (recomendado para variables pareadas con distribución no normal) para estudiar la correlación entre estas, bajo diferentes condiciones de prueba. Esto involucró para la prueba una misma muestra analizada en dos procesos no sincrónicos, sin variación estadísticamente considerable en la muestra, al utilizar un método y luego el otro. Adicionalmente, se realizó una prueba de análisis de medias tipo Anova entre las características de experimentación: GEQP, con la intención de comparar la similitud entre las medias de los resultados obtenidos por el método tradicional, el análisis digital por área y el análisis digital por peso.

Para las propiedades de mesa se realizó la comparación de datos entre aquellos obtenidos por el análisis tradicional y el análisis digital por área. El análisis de blancura por su parte, involucró una comparación estadística entre los resultados obtenidos por la implementación del sistema automático Satake MM1D y aquellos obtenidos mediante el análisis digital de imágenes. Se aplicó la misma dinámica de pruebas estadísticas que en las características anteriores, a excepción de la prueba ANOVA.

CAPÍTULO 3. Resultados y discusión.

3.1 Obtención de imágenes.

Para la obtención de las imágenes muestrales, se requirieron 183 capturas digitales en alta resolución para el inicio del análisis (Figura 16a). A partir de estas capturas, se obtuvieron 351 imágenes procesadas de forma dimensional, mediante la delimitación de sus áreas (Figura 16b) y de forma específica a una respectiva característica de mesa (Figura 16c).

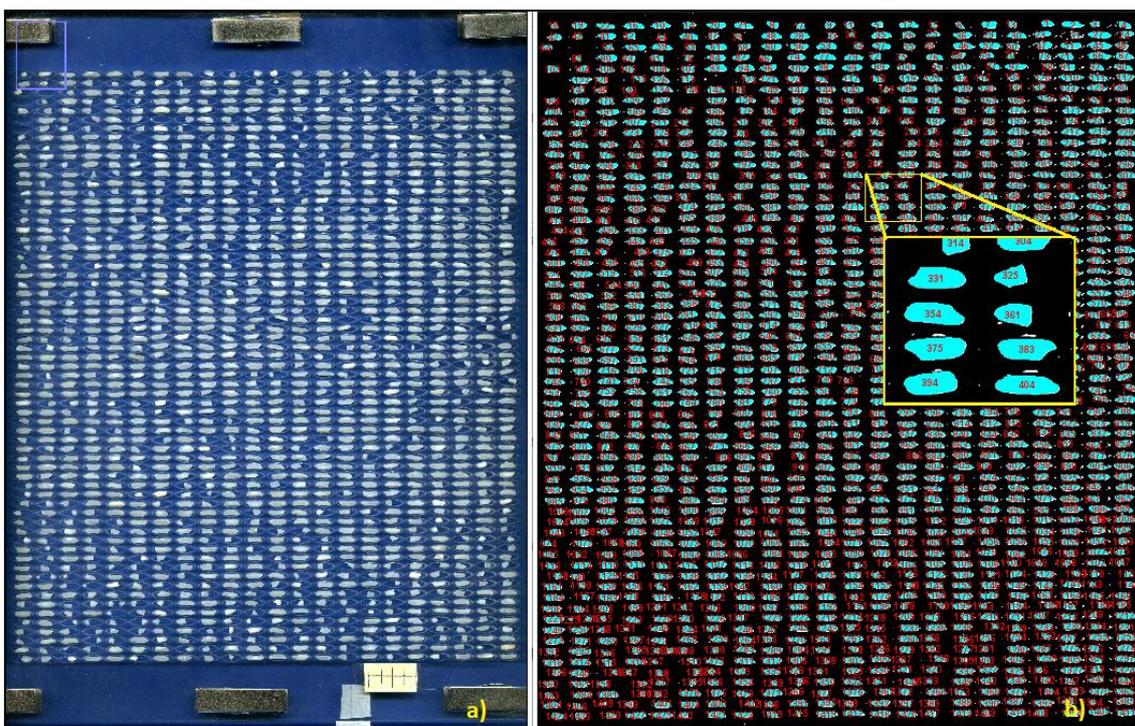


Figura 16. Ejemplo de la captura digital de una muestra de arroz pilado (a) y su imagen resultante del procesamiento dimensional (b).

Se resalta la importancia de aplicación obtenida por el sistema de placa muestral en los procesos de captura para todas las propiedades analizadas en el presente trabajo. Esta permitió analizar de forma precisa y homogénea muestras con alta densidad de objetos, como es el caso de las muestras de 100 g, mediante una metodología de aplicación lineal y de fácil seguimiento. De igual manera, permitió proporcionar mediciones objetivas y estadísticamente comparables en menores periodos de tiempo de análisis, en comparación con los métodos tradicionales, con intervalos iguales a: 20 min hasta 1 hr para el análisis tradicional y de 7 a 23 min para el análisis digital, estos según el porcentaje de calidad comercial de la muestra analizada.

3.2 Resultados del análisis para puntilla.

Un elemento bajo la categoría de puntilla puede ser cualquier subfracción del grano entero que logre ser retenido en el proceso de cribado bajo su respectivo calibre de alveolo. Lo define el RTCR 202:1998 como aquel grano de arroz pilado que pueda ser separado por una criba con alvéolos circulares de 2,38 mm, criba N°6 1998 (Decreto N° 26901, 1998). Se observó una alta heterogeneidad de formas, en los elementos bajo la categoría de puntilla, dónde la única

característica que comparten es su reducida longitud máxima entre dos puntos, sobre la superficie de los de granos o fragmentos de estos (Figura 17).

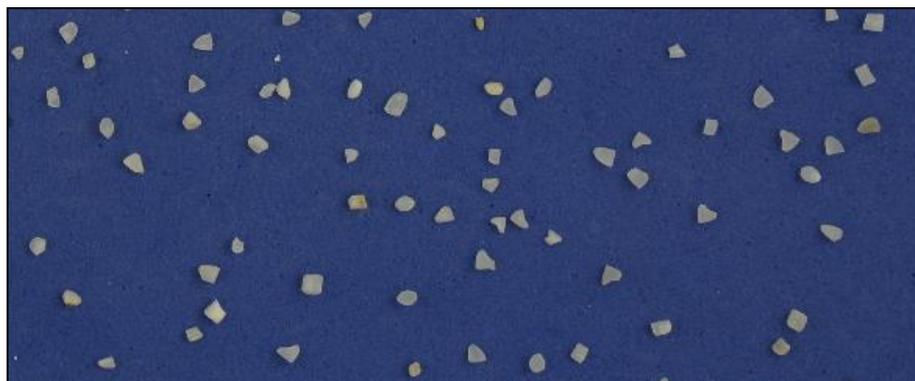


Figura 17. Ilustración de la forma de los granos de arroz pilado clasificados como puntilla.

3.2.1 Resultados del método tradicional para puntilla.

Se muestra en el Cuadro 1 los porcentajes de puntilla obtenidos mediante el método de análisis tradicional en cada una de las tres repeticiones, por unidad muestral, la cual es demarcada con su respectivo código. Estos a su vez, están ordenados por el porcentaje de calidad comercial de mayor a menor (99%, 95%, 91% y 80%). Estos valores, fueron utilizados como valores reales margen para comparar y contrastar los resultados obtenidos por los diferentes métodos.

Cuadro 1. Porcentajes de puntilla obtenidos en las muestras de arroz pilado analizadas por el método tradicional.

Rep.	Calidad comercial (%)	Código de muestra	Puntilla (%)	Promedio (%)	D.E (pp) ±	Calidad comercial (%)	Código de muestra	Puntilla (%)	Promedio (%)	D.E (pp) ±
R1	99	259	0.054	0,036	0.02	91	256	0.163	0,192	0.03
R2			0.020					0.212		
R3			0.033					0.202		
R1	99	252	0.034	0,031	0.01	91	261	0.745	0,753	0.01
R2			0.040					0.762		
R3			0.020					0.752		
R1	99	258	0.067	0,060	0.02	80	255	1.970	1,916	0.10
R2			0.040					1.798		
R3			0.072					1.980		
R1	95	257	0.244	0,217	0.06	80	260	0.733	0,791	0.14
R2			0.152					0.955		
R3			0.256					0.684		
R1	95	254	0.122	0,151	0.03	80	253	1.914	2,205	0.48
R2			0.177					2.762		
R3			0.154					1.940		

Nota: D.E = Desviación estándar.

Se evidencia que las unidades muestrales con porcentajes de calidad comercial más altos (99% y 95%) presentaron porcentajes de puntilla menores, con promedios iguales a $0,040 \pm 0,01$ pp y $0,042 \pm 0,04$ pp, respectivamente. En general, se mostró similitud entre los valores de muestras con un mismo porcentaje de calidad comercial. A excepción de las unidades muestrales 256 y 260, que presentaron porcentajes de puntilla considerablemente distintos a los presentados por sus semejantes en porcentaje de calidad (muestras de 95% y 80%, respectivamente).

3.2.2 Resultados del método digital por área para puntilla.

Para el primer método de análisis de puntilla, el digital por área, se obtuvieron los resultados indicados en el Cuadro 2, la totalidad de sus resultados están reflejados en el Anexo A. Estos resultados muestran los porcentajes de puntilla obtenidos del área binarizada por el método digital programado (Figura 16b). Los valores por unidad muestral fueron más semejantes en cada una de las tres repeticiones, en aquellas unidades de mayor porcentaje de calidad.

Cuadro 2. Porcentajes de puntilla obtenidos en las muestras de arroz pilado analizadas por el método digital por área.

Rep.	Calidad comercial (%)	Código de muestra	Puntilla (%)	Promedio (%)	D.E (pp) ±	Calidad comercial (%)	Código de muestra	Puntilla (%)	Promedio (%)	D.E (pp) ±
R1	99	259	0,043	0,043	0,02	91	256	0,465	0,506	0,11
R2			0,063					0,423		
R3			0,022					0,631		
R1	99	252	0,052	0,067	0,04	91	261	0,581	0,561	0,08
R2			0,109					0,475		
R3			0,039					0,627		
R1	99	258	0,062	0,069	0,04	80	255	1,907	1,765	0,20
R2			0,035					1,543		
R3			0,110					1,845		
R1	95	257	0,232	0,225	0,04	80	260	0,636	0,557	0,07
R2			0,184					0,522		
R3			0,260					0,512		
R1	95	254	0,105	0,126	0,02	80	253	1,623	1,812	0,38
R2			0,151					2,251		
R3			0,121					1,563		

Nota: D.E = Desviación estándar.

3.2.3 Resultados del método digital por peso para puntilla.

Para la segunda modalidad de análisis se asignó un peso a cada grano detectado mediante el uso de la Ecuación 3. Los resultados totales que fueron obtenidos por la ecuación pueden observarse en el Anexo B. Posteriormente, estos valores de peso fueron transformados mediante la aplicación del modelo de regresión polinomial indicado en el Cuadro 3, haciendo uso de las Ecuaciones 4, 5 y 9, con la finalidad de mejorar su ajuste y reducir la diferencia entre los resultados experimentales y los obtenidos mediante el método tradicional, se obtuvieron así, los valores finales para la comparación estadística (Cuadro 4).

Cuadro 3. Modelo de regresión polinomial aplicado a los resultados obtenidos mediante el método digital por peso para el factor puntilla.

$y=0,0350x^2 + 0,7116x - 0,0237$	
$R^2 = 0,9559$	Error estand residual = 0,1712. con 27 g,l p -value = 0,6841 p -value = 0,000 p -value = 0,4545
$R^2_{ajust} = 0,9544$	
$\beta_0 = - 0,0237$	
$\beta_1 = 0,7116$	
$\beta_2 = 0,035$	

En este modelo de regresión la variable dependiente es y , y la variable independiente predictora es x . El valor del coeficiente de determinación (R^2) que se obtuvo en el modelo de regresión polinomial de grado 2, hace referencia a una alta capacidad predictora entre las dos variables estudiadas. La variable independiente explica un 95,6 % de los valores que conforman la variable dependiente a predecir. Mostrando así, un característico comportamiento curvilíneo o no lineal en la variable de respuesta (Astorga, 2014). Considerando un error estándar residual igual a 0,171 pp y el p -value de los coeficientes de regresión, donde solo el coeficiente de grado 1 (β_1) fue estadísticamente significativo para la prueba, se puede afirmar que el modelo es moderadamente bueno en el proceso predictivo y solo este último coeficiente aporta de forma considerable en la predicción.

Cuadro 4. Porcentajes de puntilla obtenidos en las muestras de arroz pilado analizadas por el método digital de peso.

Rep.	Calidad comercial (%)	Código de muestra	Puntilla (%)	Promedio (%)	D.E (pp) \pm	Calidad comercial (%)	Código de muestra	Puntilla (%)	Promedio (%)	D.E (pp) \pm
R1	99	259	0,023	0,037	0,04	91	256	0,550	0,605	0,14
R2			0,077					0,502		
R3			0,010					0,763		
R1	99	252	0,065	0,072	0,04	91	261	0,664	0,655	0,05
R2			0,116					0,601		
R3			0,034					0,701		
R1	99	258	0,042	0,050	0,04	80	255	2,444	2,267	0,24
R2			0,017					2,000		
R3			0,090					2,356		
R1	95	257	0,279	0,286	0,06	80	260	0,688	0,617	0,07
R2			0,230					0,605		
R3			0,349					0,559		
R1	95	254	0,100	0,139	0,04	80	253	1,978	2,445	0,59
R2			0,181					3,106		
R3			0,135					2,253		

Nota: D.E = Desviación estándar.

Los datos obtenidos en el Cuadro 4 muestran un mayor porcentaje de puntilla presente en las muestras analizadas con un bajo porcentaje de calidad, las calidades de 91% y 80% mostraron promedios iguales a: $0,630 \pm 0,10$ pp y $1,776 \pm 0,30$ pp, respectivamente. Se obtuvo un porcentaje menor para aquellas con alto grado de calidad, las presentaciones de 99% y 95%, con promedios iguales a: $0,053 \pm 0,04$ y $0,212 \pm 0,05$ pp, respectivamente. Por consiguiente, los valores de las repeticiones (R_n) por código de unidad muestral, fueron más variados en las presentaciones de menor calidad, en comparación con aquellas con un mayor porcentaje de calidad, considerando la magnitud numérica de estas diferencias.

3.2.4 Comparación estadística entre resultados de puntilla.

Se muestran en la Figura 18 y Figura 19 los resultados obtenidos, mediante el análisis tradicional, el digital por área y por peso. Las numeraciones del eje X corresponden al código muestral y estos están ordenados desde los porcentajes de mayor calidad: 259, 252 y 258 con 90% grano entero; 257 y 254 con 95%, hasta los de menor calidad: 256 y 261 con 91%; junto con 255, 260 y 253 con 80%. Para cada código muestral se indica un valor promedio para las repeticiones, acompañado de su respectivo valor de desviación estándar.

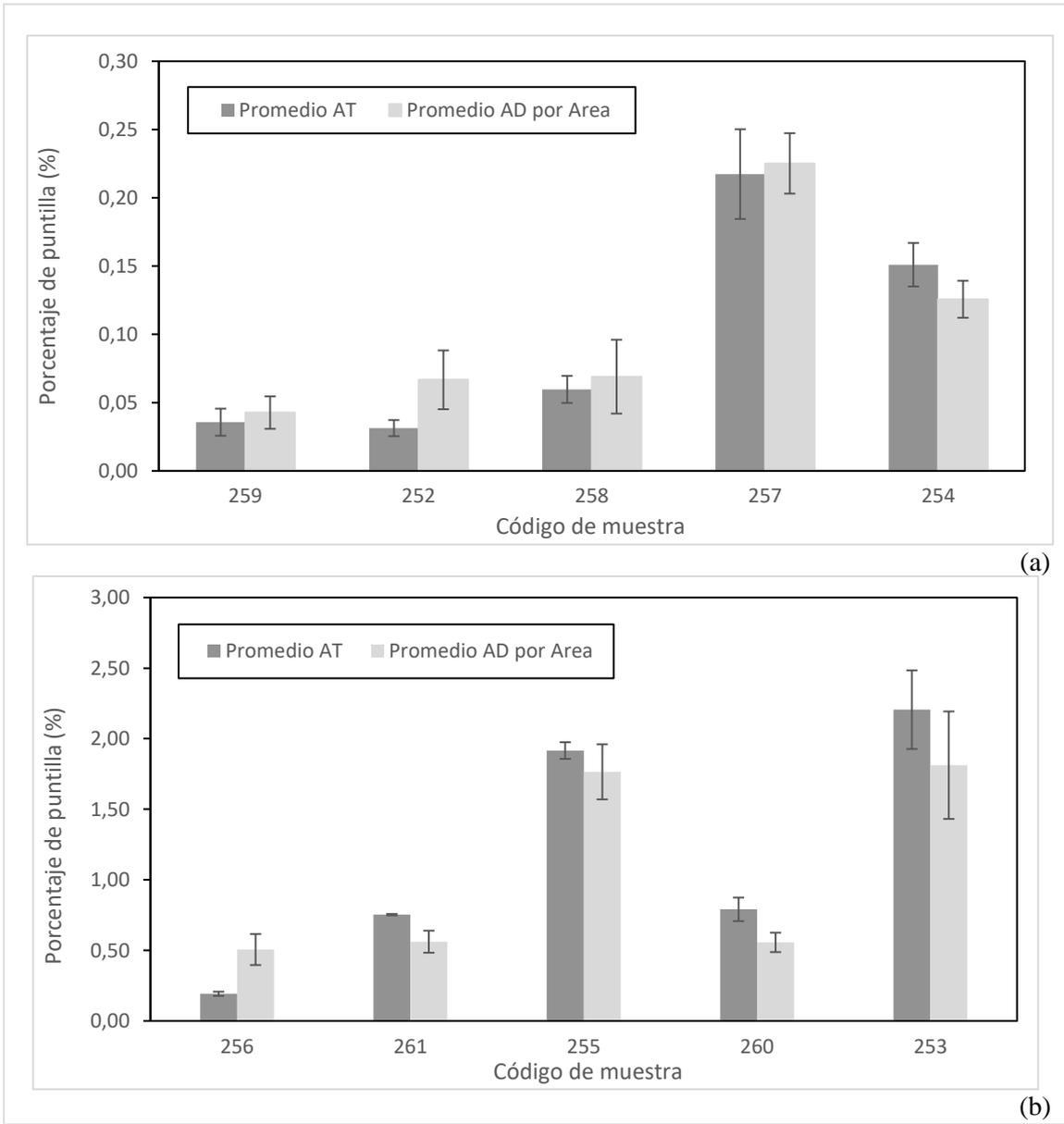


Figura 18. Porcentaje para puntilla obtenido en las muestras de arroz pilado de calidad: 99% - 95% (a) y 91% - 80% (b), mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD) por área. Las barras representan el error estándar de la media.

Se muestra el promedio y desviación estándar de los valores obtenidos del análisis digital por peso, en la siguiente Figura 19.

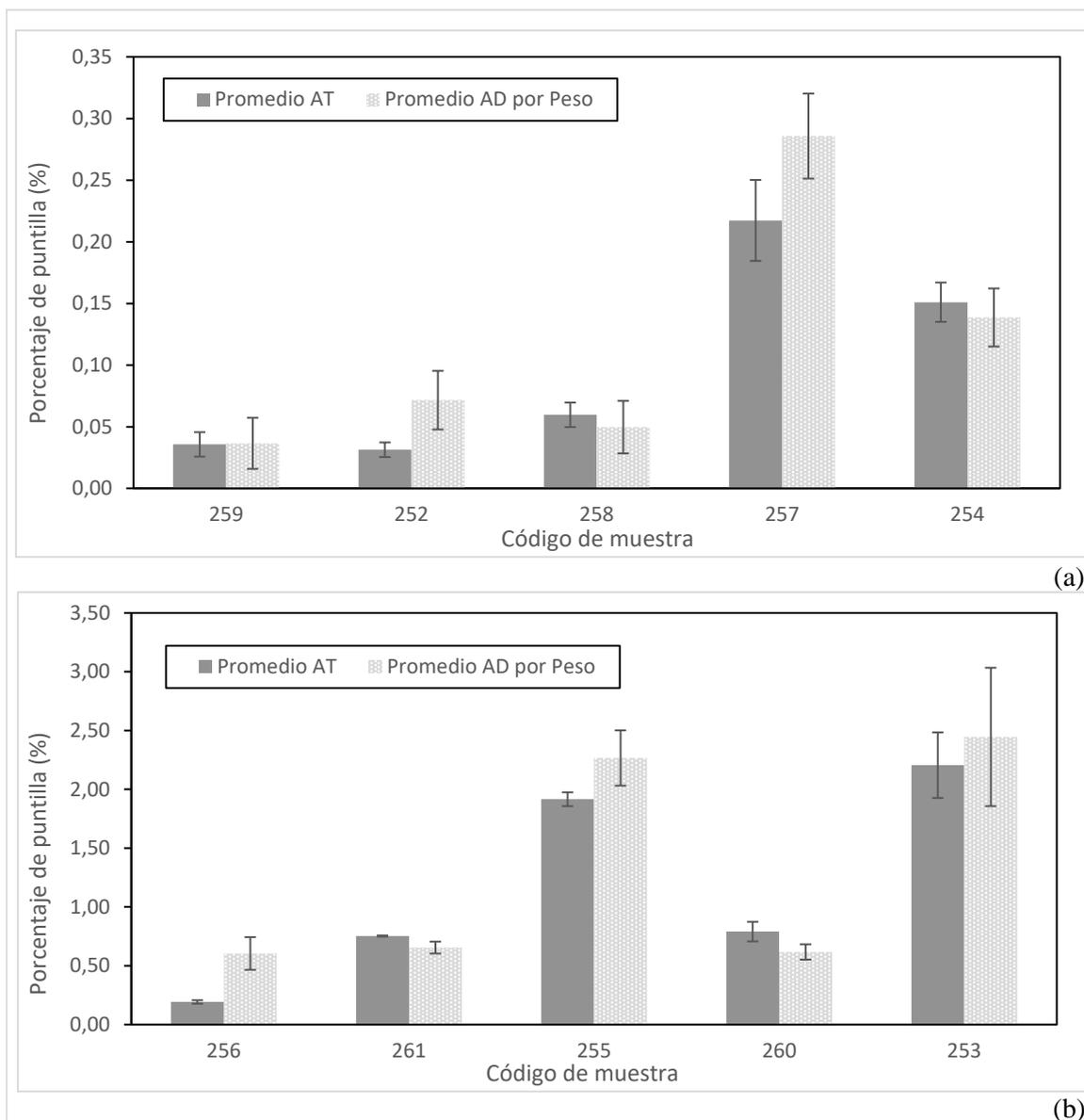


Figura 19. Porcentaje para puntilla obtenido en las muestras de arroz pilado de calidad: 99% - 95% (a) y 91% - 80% (b), mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD) por peso. Las barras representan el error estándar de la media.

Se observa en la Figura 18a y Figura 19a una irregularidad o variante, un valor muy inferior en el promedio de la unidad muestral 254, igual a: $0,151 \pm 0,02$ pp para el AT; $0,139 \pm 0,04$ pp para el AD por peso y $0,151 \pm 0,02$ pp para el AD por área, en relación con su homónima de calidad 257, con un promedio igual a: $0,217 \pm 0,06$ pp para el AT; $0,139 \pm 0,04$ pp para el AD por peso y $0,225 \pm 0,03$ pp para el AD por área. También se observa una diferencia en sus valores promedios, con respecto a la tendencia creciente de la cantidad de puntilla, al decrecer el porcentaje de calidad. Esto fue mostrado en todos los métodos de aplicados, haciendo referencia a una irregularidad propia de la unidad y no a un erróneo análisis. De igual manera, se observa una irregularidad o un valor muy bajo, de promedio para el AT en la unidad muestral 260, igual a: $0,790 \pm 0,14$ pp para el AT; $0,617 \pm 0,06$ pp para el AD por peso y $0,556 \pm 0,07$ pp para el AD por área), en comparación con sus semejantes de calidad, las unidades 255 y 253, que mostraron valores mayores de puntilla en sus repeticiones, con un promedio entre ambas medias, igual a: $2,061 \pm 0,30$ pp para el AT; $2,356 \pm 0,41$ pp para el AD por peso y $1,789 \pm 0,29$ pp para el AD por área. Esta irregularidad es también evidenciada en en los resultados obtenidos por el análisis

digital mediante peso y área (Figura 18b y Figura 19b). Confirmado así, por los tres métodos, una mejor calificación de calidad real, en comparación con la otorgada por el comerciante para esta específica unidad muestral.

Paralelamente, la irregularidad del promedio en la unidad muestral 256 para el AT, un muy bajo valor con respecto a sus homónimas de calidad, hace referencia a un posible error en la toma de la muestra. Esto es respaldado por los valores promedio de las unidades 256 obtenidos mediante el análisis digital (AD) por área y peso, los cuales arrojaron valores muy parecidos, con diferencia de 0,09 pp entre estos. Haciendo alusión, de que estas irregularidades se deben a las posibles variantes de error humano intrínsecas en el proceso de análisis tradicional. Todo proceso que implique una labor repetitiva requiere del evaluador calificado, encontrarse física y mentalmente alerta para disminuir las no conformidades, resultados adversos que suelen presentarse en este tipo de prácticas (Stallard et al, 2018). En los tres casos de análisis los valores promedio mostraron la tendencia creciente esperada en cantidad de puntilla en muestra, al disminuir el porcentaje de calidad de las muestras, a excepción de las unidades muestrales 254, 260 y 256. Por su parte, la unidad 257 mostró, de igual manera, una variación a la tendencia creciente, pero se encontró, de forma asertiva, en el intervalo esperado para una muestra de 95% de calidad comercial según parámetros definidos por el RTCR 202:1998 (Decreto N° 26901, 1998), para todos los métodos de análisis.

Para el estudio de correlación entre los métodos, se designó como variables de comparación pareadas: AT, AD por área y el AD por peso. Primeramente, se realizó un análisis de normalidad sobre estas, implementando la prueba de Shapiro-Wilk (Anexo E) y el método Q-Qplot (Figura 20). Los valores del p -value obtenidos para las tres variables cuantitativas en la prueba Shapiro-Wilk fueron menores a 0,05 en todos los casos, indicando un comportamiento no normal de los datos, con una significancia de análisis del 5%. Haciendo noción de un comportamiento no normal para la variable, al considerar la totalidad de los datos.

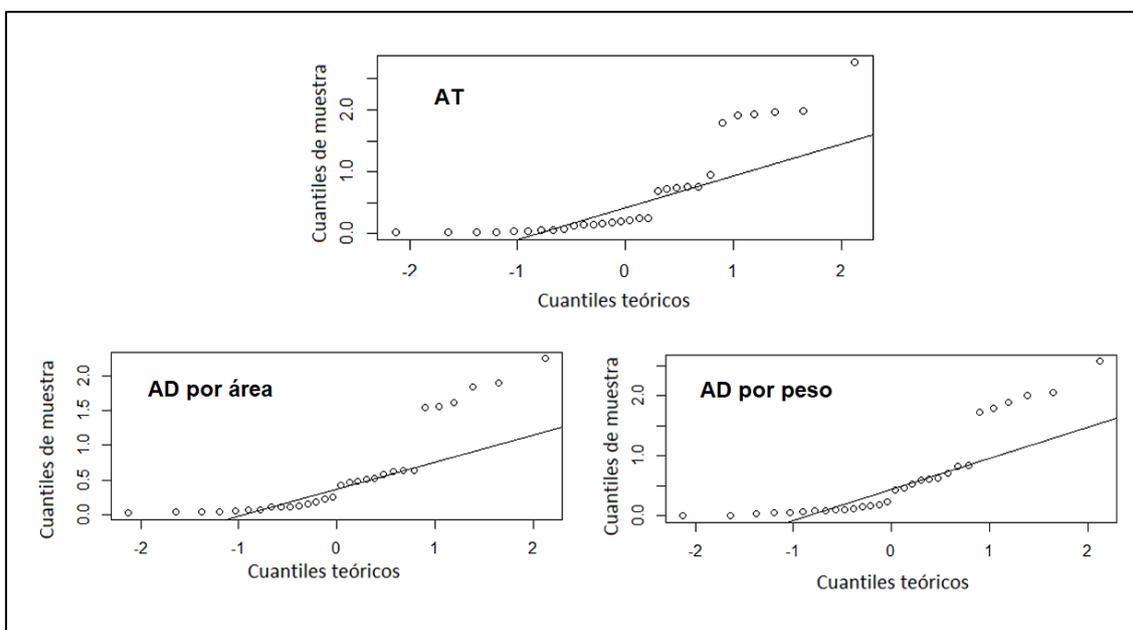


Figura 20. Análisis de normalidad Q-Qplot para para la variable de puntilla, obtenida por los métodos tradicional, digital por área y digital por peso.

Se puede observar en la Figura 20 los resultados de la probabilidad normal para las respectivas variables (AT, AD por área y AD por peso), los cuales a través de los cuantiles de la

normal estándar, permiten plantear la hipótesis de normalidad sobre estas. Se observa, que en los tres casos varios cuantiles se alejan del comportamiento rectilíneo de la distribución teórica normal. Estos valores extremos permiten rechazar la hipótesis de normalidad para los datos analizados en las variables (Castillo & Lozano, 2007). La totalidad de los resultados numéricos de estas pruebas se observan en el Anexo F y Anexo G.

Los estadísticos de las pruebas de correlación entre el análisis tradicional, el AT y el análisis digital (AD) por área, fueron mayores a 0,9 para ambas pruebas, demostrando una correlación fuerte entre los resultados obtenidos mediante el análisis tradicional y el análisis digital por área. Conjuntamente, se aprecia en la Figura 21, de variables correlacionadas, como la mayoría de los datos de dispersión para el AD por área se encontraron muy cerca de los valores del AT, presentando ambos una tendencia creciente.

La mayoría de los elementos en dispersión de la Figura 21, mostraron un comportamiento creciente y cierto nivel de cercanía a la línea de tendencia esperada. Pero no se evidenció de forma clara, una simetría entre los valores obtenidos mediante el método tradicional y el método digital por peso, para la característica específica de puntilla.

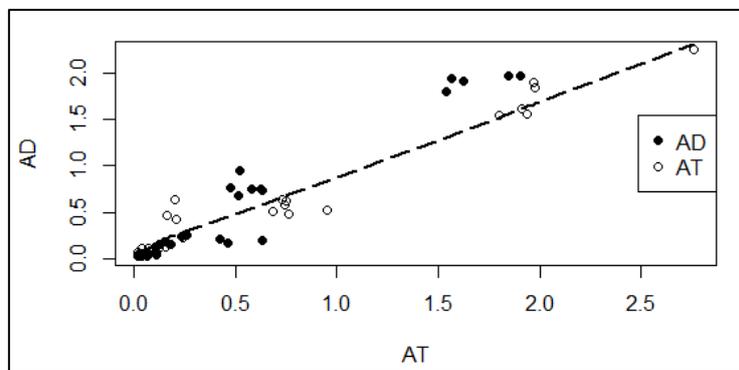


Figura 21. Correlación entre los resultados obtenidos para la variable de puntilla mediante el método tradicional y el método digital por área.

De forma similar a la comparación anterior, los valores resultantes de los estadísticos de prueba de correlaciones, para los resultados obtenidos por el AT y AD por peso (Anexo G), fueron mayores a 0,9, evidenciando a una fuerte correlación lineal positiva entre las variables pareadas (Mendenhall et al, 2010). Se observa en la Figura 22 los resultados para la prueba de correlación grafica entre los valores de dispersión para ambos métodos de análisis (AT y AD por peso).

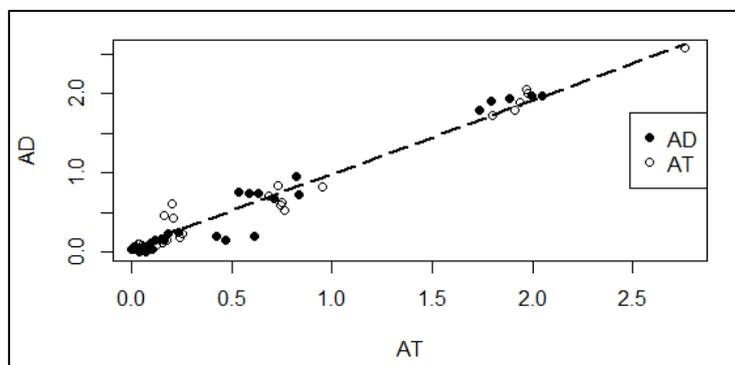


Figura 22. Correlación entre los resultados obtenidos para la variable de puntilla mediante el método tradicional y el método digital por peso.

Se observó en la Figura 22 el alto nivel de correlación entre los datos de las variables, e inclusive, se mostró una mejor aproximación lineal para este caso específico. Razón por la cual, con la prueba de correlación de Pearson (para distribuciones normales) se logró obtener un mayor valor de correlación para el análisis digital por peso.

Por su parte, en la prueba ANOVA de comparación de medias, obtenidas del conjunto de datos de las tres variables, arrojó un valor Pr igual a 0,927, el cual es mayor al valor parámetro estadístico $\alpha = 0.05$ (Anexo H); por lo tanto, hay suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis nula, y afirmar que las medias de las variables son significativamente iguales. Esto se puede apreciar en la Figura 23, donde las tres variables tienen un valor de la mediana similar (en el rango de: 0,2 – 0,3 pp).

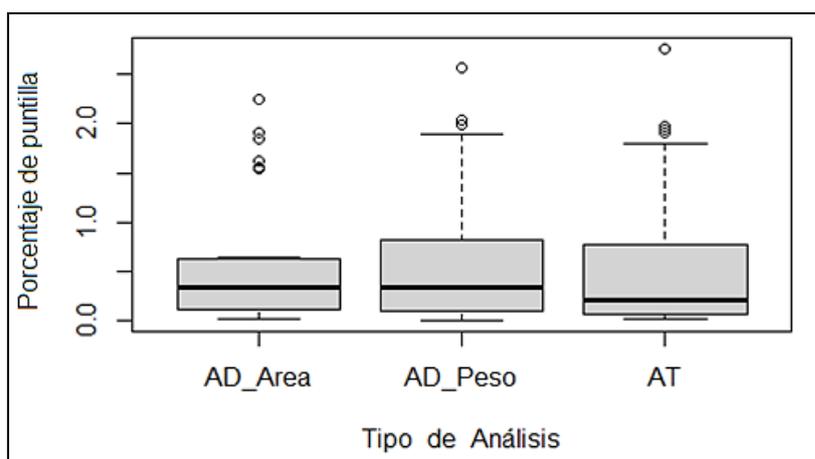


Figura 23. Bloxplot comparativo entre los métodos de análisis utilizados para para determinar la variable de puntilla.

Se mostró en la Figura 23 una diferencia baja entre los resultados obtenidos mediante el análisis por área y el análisis por peso (0,066 pp), ambos métodos muestran distribuciones relativamente simétricas, pero con valores de distribución más cercanos (parecidos entre ellos) para el caso del AD por área. Para este último método, el software no consideró los valores extremos superiores, como parte del cuartil máximo de la distribución de datos, como resultado de su cercanía (Mendenhall et al, 2010), pero es evidenciado que los tres métodos mostraron valores extremos particularmente similares. El conjunto de resultados cuantitativos y aquellos obtenidos de las pruebas estadísticas aplicadas, permiten caracterizar a ambos métodos de análisis digital (por peso y por área), como altamente viables en la identificación de puntilla, para arroz pulido.

3.3 Resultados del análisis para grano quebrado.

El grano quebrado grueso es definido por el RTCR 202:1998, como aquel elemento en la muestra de arroz pilado, “cuya longitud sea menor a 3/4 de la longitud promedio de los granos, sin quebraduras predominantes en la muestra” (Figura 24). Establece para efectos de la práctica de análisis de calidad, la utilización de una criba con alvéolos circulares de 4,76 mm de diámetro, (calibre No. 12/64), para la contención y separación de estos (Decreto N° 26901, 1998).

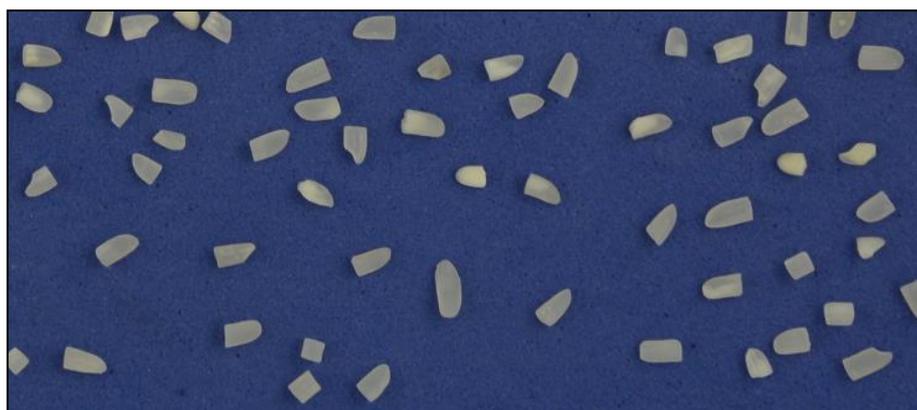


Figura 24. Ilustración de la forma de los granos de arroz pilado clasificados como grano quebrado.

3.3.1 Resultados del método tradicional para grano quebrado.

De la misma forma que en la característica de puntilla analizada anteriormente, se obtuvo los porcentajes promedio de grano quebrado para cada repetición que compuso las unidades muestrales. Los resultados para el análisis tradicional, el análisis digital por área y el análisis digital por peso están reflejados en el Cuadro 5, Cuadro 6 y Cuadro 8, respectivamente.

Cuadro 5. Porcentajes de grano quebrado obtenidos en las muestras de arroz pilado analizadas por el método manual.

Rep.	Calidad comercial (%)	Código de muestra	Grano quebrado (%)	Promed. (%)	D.E (pp) ±	Calidad comercial (%)	Código de muestra	Grano quebrado (%)	Promed. (%)	D.E (pp) ±
R1	99	259	1,010	0,937	0,10	91	256	6,216	6,273	0,08
R2			0,980					6,242		
R3			0,822					6,362		
R1	99	252	1,226	1,045	0,22	91	261	6,790	6,784	0,33
R2			0,796					6,448		
R3			1,114					7,114		
R1	99	258	0,782	0,696	0,24	80	255	15,056	14,808	0,56
R2			0,420					14,169		
R3			0,885					15,199		
R1	95	257	3,138	2,979	0,52	80	260	14,333	14,623	0,53
R2			2,401					15,233		
R3			3,397					14,302		
R1	95	254	3,065	3,135	0,25	80	253	17,112	16,820	3,21
R2			2,928					19,872		
R3			3,413					13,476		

Nota: D.E = Desviación estándar.

Se mostró en el Cuadro 5 como el porcentaje de grano quebrado en las muestras incrementó al reducir el porcentaje de calidad asignado por la casa comercial. Todos los valores obtenidos fueron acordes a su calidad asignada, según el RTCR 202:1998 (Decreto N° 26901, 1998). Solo en pocas repeticiones de 99% se presentaron porcentajes mínimamente superiores a su valor aceptado.

3.3.2 Resultados del método digital por área para grano quebrado.

Los resultados obtenidos mediante el análisis digital por área, para la determinación de grano quebrado grueso, se muestran en el Cuadro 6. Sus valores porcentuales de grano quebrado en muestra mostraron la misma tendencia inversamente proporcional al grado de calidad, como en resultados anteriores. Todas las unidades muestrales presentaron valores concordantes con los rangos definidos por el RTCR 202:1998 (1998), en su categorización referencia, para la designación del porcentaje de calidad comercial (porcentaje de grano entero).

Cuadro 6. Porcentajes de grano quebrado obtenidos en las muestras de arroz pilado analizadas por el método digital por área.

Rep.	Calidad comercial (%)	Código de muestra	Grano quebrado Área (%)	Promed. (%)	D.E (pp) ±	Calidad comercial (%)	Código de muestra	Grano quebrado Área (%)	Promed. (%)	D.E (pp) ±
R1	99	259	0,974	0,982	0,02	91	256	5,656	5,468	0,11
R2			1,068					5,494		
R3			0,903					5,253		
R1	99	252	0,978	0,921	0,04	91	261	6,160	6,241	0,08
R2			0,787					5,903		
R3			0,998					6,660		
R1	99	258	0,813	0,735	0,04	80	255	14,297	14,029	0,20
R2			0,386					13,349		
R3			1,007					14,440		
R1	95	257	2,923	2,625	0,04	80	260	15,059	14,965	0,07
R2			1,943					15,925		
R3			3,009					13,910		
R1	95	254	2,768	2,885	0,02	80	253	16,319	15,989	0,38
R2			2,866					18,386		
R3			3,021					13,261		

Nota: D.E = Desviación estándar.

Los porcentajes de grano quebrado mostrados en el Cuadro 6 presentan diferencias mínimas entre los valores por repetición, para una misma unidad muestral. La mayor diferencia entre estos valores, así como también, el mayor error estándar, se presentó en las unidades de calidad igual 80% grano entero. El mayor valor de error estándar fue igual a 1,48 pp, para su caso más crítico, presentado en la unidad 253. Comprobando de esta manera, el aseguramiento de calidad máxima en propiedades dimensionales, para las presentaciones premium (99%) por parte de las casas comerciales. Al incorporar estas productoras una calidad premium en su oferta de productos, garantizan que el factor de calidad no sea un impedimento para la adaptación de una mayor cantidad volumétrica a producir, en su esquema general de trabajo, conservando en todo momento la seguridad alimentaria e inocuidad al consumidor (Champagne et al, 2010).

3.3.3 Resultados del método digital por peso para grano quebrado.

Mediante la Ecuación 3, se obtuvo los resultados por peso con base a las áreas detectadas por el análisis digital para grano quebrado. Posteriormente, estos resultados fueron ajustados mediante el modelo de regresión cúbica de una variable (Cuadro 7) y utilizando en su proceso las Ecuaciones 4, 5, 9. De esta forma se obtuvieron los resultados finales, los cuales fueron utilizados en la comparación estadística entre el AD por peso y el AT para grano quebrado (Cuadro 8).

Cuadro 7. Modelo de regresión polinomial aplicado a los resultados obtenidos mediante el método digital por peso para el factor grano quebrado.

$y=0,0011x^3 - 0,0344x^2 + 1,2474x - 0,2313$	
$R^2 = 0,9977$	Error estand residual = 0,3146. con 26 g,l
$R^2_{ajust} = 0,9975$	Error relativo prom = 6,284 %
$\beta_0 = -0,2313$	p -value = 0,133
$\beta_1 = 1,2474$	p -value = 0
$\beta_2 = -0,0344$	p -value = 0,002
$\beta_3 = 0,011$	p -value = 0,0043

Se obtuvo un modelo de regresión de tercer grado, de una sola variable independiente (Cuadro 7). Este presentó un coeficiente de determinación muy alto (R^2), denotando así, una capacidad de explicación de más del 99% de los valores de la variable a predecir. Lo cual, en conjunto con un error relativo promedio menor a 7%, permitió categorizar al modelo como altamente predictivo para los valores del análisis digital por peso en grano quebrado. Se obtuvo p -values menores a 0,05 para los coeficientes de regresión β_1 , β_2 y β_3 , denotando así, como estadísticamente significativos los complementos polinomiales de grado 1, 2 y 3 de la ecuación predictora en el modelo. Se muestra en el Cuadro 8 los porcentajes de puntilla obtenidos, estos se muestran ya ajustados por el modelo de regresión lineal cúbico independiente (Cuadro 7), categorizados por su repetición y respectivo código muestral.

Cuadro 8. Porcentajes de grano quebrado obtenidos en las muestras de arroz pilado analizadas por el método digital por peso.

Rep.	Calidad comercial (%)	Código de muestra	Grano quebrado Área (%)	Promed. (%)	D.E (pp) \pm	Calidad comercial (%)	Código de muestra	Grano quebrado Área (%)	Promed. (%)	D.E (pp) \pm
R1	99	259	1,024	1,016	0,10	91	256	6,115	5,971	0,20
R2			1,116					6,059		
R3			0,909					5,738		
R1	99	252	0,989	0,931	0,11	91	261	6,921	7,006	0,38
R2			0,805					6,679		
R3			1,001					7,416		
R1	99	258	0,802	0,713	0,40	80	255	14,962	14,698	0,67
R2			0,275					13,938		
R3			1,062					15,196		
R1	95	257	3,332	2,961	0,68	80	260	14,643	14,730	1,23
R2			2,179					16,006		
R3			3,372					13,541		
R1	95	254	3,142	3,291	0,18	80	253	16,828	15,862	2,93
R2			3,243					19,811		
R3			3,487					13,947		

Nota: D.E = Desviación estándar.

Los porcentajes de grano quebrado mostrados en el Cuadro 8, evidencian el mismo comportamiento creciente de los resultados digitales por área, al disminuir el porcentaje de calidad comercial. Cabe destacar, que todos sus valores se encontraron en los rangos esperados para sus respectivos porcentajes de calidad, según el RTCR 202:1998 (Decreto N° 26901, 1998). En estos resultados no se evidenció valores de repetición extremos para ninguna de las cuatro categorías de calidad comercial.

3.3.4 Comparación estadística entre resultados de grano quebrado.

Se muestra en la Figura 25 los valores promedio obtenidos mediante el método tradicional para cada unidad muestral, tanto aquellos obtenidos por el método tradicional como por el método digital por área.

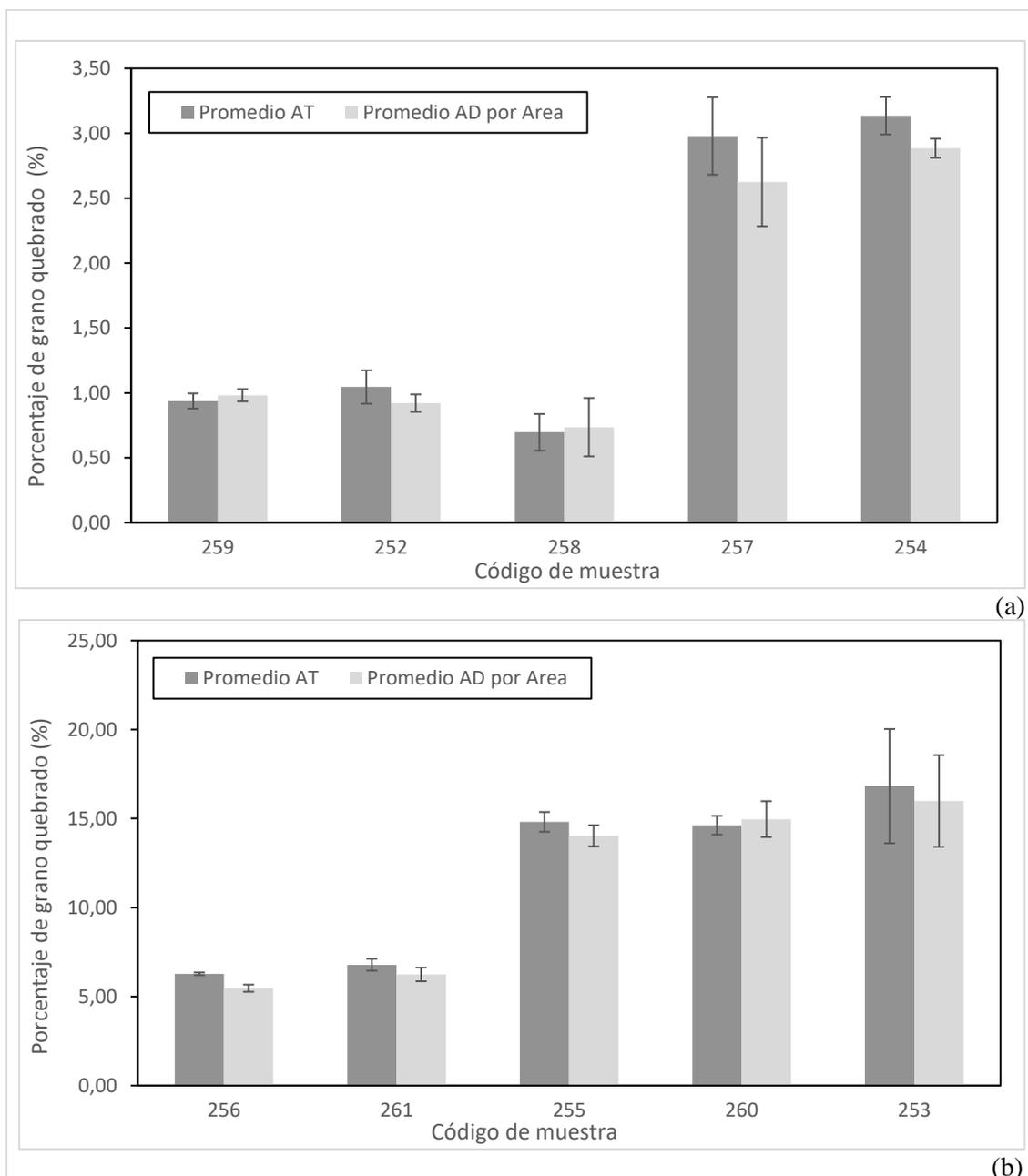


Figura 25. Porcentaje para grano quebrado obtenido en las muestras de arroz pilado de calidad: 99% - 95% (a) y 91% - 80% (b), mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD) por área. Las barras representan el error estándar de la media.

Los valores promedio presentados en la Figura 25 reflejan una alta similitud entre los porcentajes encontrados mediante el análisis tradicional y el análisis digital por áreas. Las diferencias entre ambas variables son menores a 1,5 pp para los casos más críticos, como lo son aquellas unidades muestrales con presentaciones de 91% grano entero (257 y 254), las cuales presentaron mayor diferencia entre los métodos de análisis. Al igual que obtuvieron Kongsawat et al (2018), el análisis digital por área aplicado en granos de arroz, permitió obtener

aproximaciones muy cercanas en valores promedio de longitud y contorno elíptico, al realizar comparaciones entre mediciones por instrumentos manuales y procesamiento digital de capturas

Paralelamente, se muestran en la Figura 26 los valores promedio obtenidos por el análisis digital (AD) por peso y aquellos obtenidos mediante el análisis tradicional (AT).

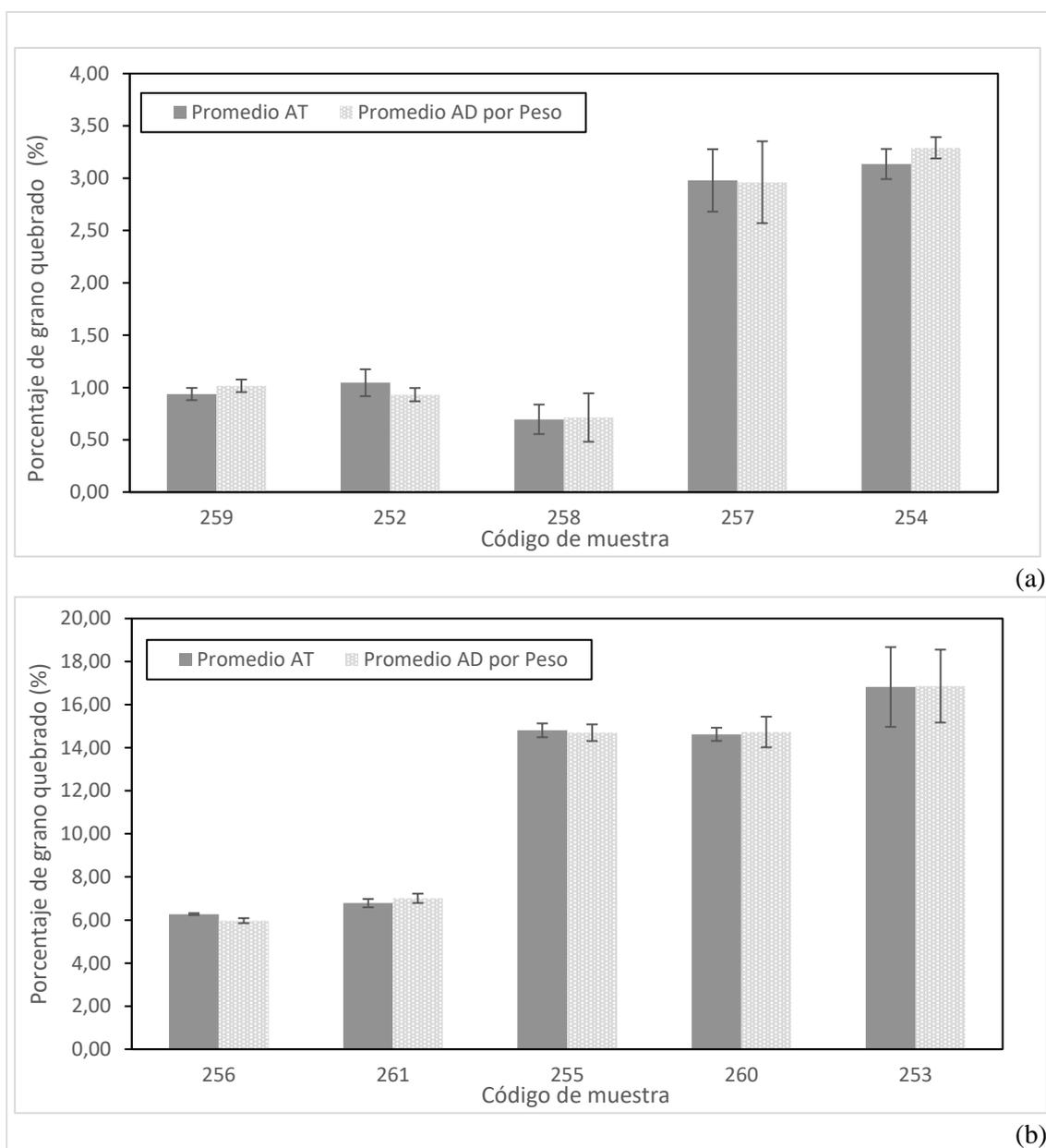


Figura 26. Porcentaje para grano quebrado obtenido en las muestras de arroz pilado de calidad: 99% - 95% (a) y 91% - 80% (b), mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD) por peso. Las barras representan el error estándar de la media.

Los valores promedio de grano quebrado obtenidos mediante el AT y el AD por peso muestran una alta similitud, para ambos métodos de análisis, inclusive mayor a la obtenida en el análisis digital por área. Los errores estándar obtenidos para cada unidad muestral, tanto para el análisis digital por peso como el tradicional, presentan casi el mismo rango o magnitud, la mayor diferencia de promedios entre los dos métodos de análisis, fue igual a 0,30 pp y se presentó en la unidad muestral 256 (Figura 26).

El análisis de normalidad Shapiro-Wilk para las tres variables de grano quebrado, arrojó *p-values* menores a 0,05 (Anexo I), por lo cual, se puede afirmar que hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de normalidad en sus respectivas distribuciones de datos. Esto se puede ver reflejado en la Figura 27, en donde la dispersión de los datos obtenidos, según el método de análisis, no muestra un ajuste de normalidad a la línea de tendencia denotada, en ninguno de los casos.

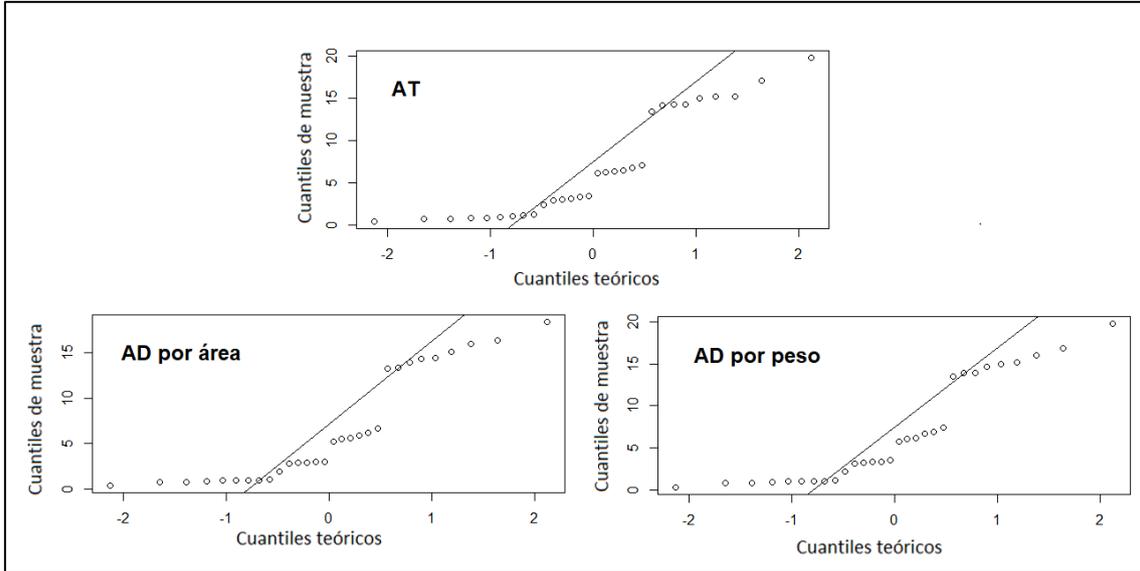


Figura 27. Análisis de normalidad Q-Qplot para para la variable de grano quebrado, obtenida por los métodos tradicional, digital por área y digital por peso.

Los resultados de las pruebas estadísticas de correlación para el AT y AD por área; junto con el AT y el AD por peso, arrojaron coeficientes de correlación mayores a 0,98 para ambas pruebas en cada respectiva comparación (Anexo J y Anexo K). Tal y como se muestra en la Figura 28 y Figura 29, la dispersión de valores es muy parecida para ambas variables y hace referencia a que existe una fuerte correlación entre sus datos, para ambos métodos de análisis.

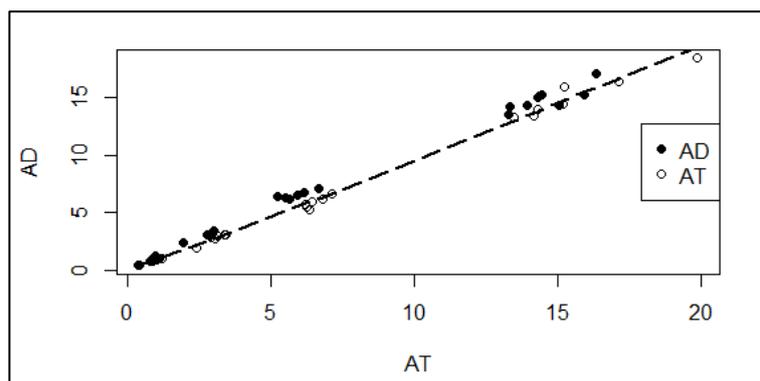


Figura 28. Correlación entre los resultados obtenidos para la variable de grano quebrado mediante el método tradicional y el método digital por área.

Se resalta el hecho de que, los resultados entre el AT y el AD por peso muestran la más alta con relación lineal entre sus variables (Figura 29), los valores de dispersión son altamente similares y presentan una mayor simetría en comparación con el método digital anterior. Esta característica graficas hacen referencia a que, si se intercambian las posiciones del X y Y en el

gráfico, el resultado del coeficiente será el mismo. Al igual que en el estudio realizado por Hernández et (2018), con ejemplificaciones bajo similares características de dispersión, no se asumió en el análisis de correlación ninguna de las características de interés como explicativa de la otra.

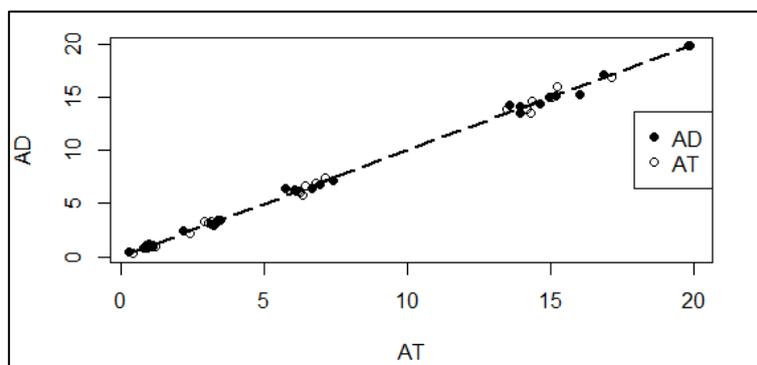


Figura 29. Correlación entre los resultados obtenidos para la variable de grano quebrado mediante el método tradicional y el método digital por peso.

Por su parte, se obtuvo del análisis de medias ANOVA, entre los resultados de los tres métodos aplicados para la detección de grano quebrado (Anexo L), un valor Pr igual a 0,971 (mayor al $\alpha = 0,05$). Por lo tanto, hay suficiente evidencia estadística para aceptar la hipótesis nula de que las medias son significativamente iguales en las tres variables estudiadas. Se muestra en la Figura 30 la significativa similitud gráfica entre las medias de los conjuntos de datos, sus varianzas y errores estándar, donde el AD por peso mostró una mayor similitud al AT y una diferencia de 0,33 pp, con respecto al método de AD por área.

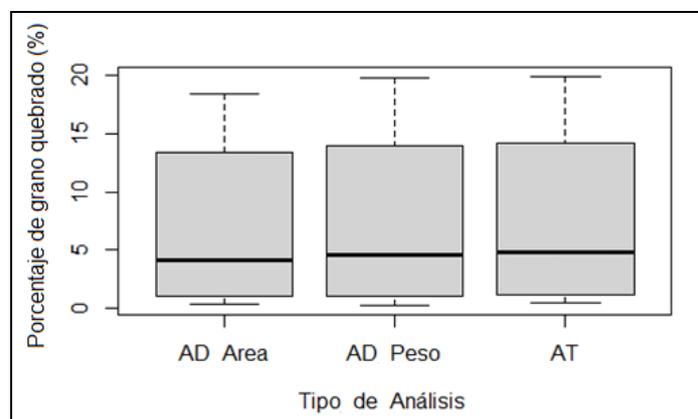


Figura 30. Bloxplot comparativo entre los métodos de análisis utilizados para grano quebrado.

La homogeneidad de las medias en los grupos de resultados que obtenidos por los tres métodos de análisis (Figura 30), junto con los altos coeficientes de correlación (R^2) obtenidos a partir de las pruebas estadísticas, comprueban la muy alta viabilidad de las técnicas de estudio digital, en la comprobación de calidad, aplicada el arroz comercial pulido. Al igual que en la investigación realizada por Singh et al (2019), estas técnicas presentaron predicciones precisas de tamaño, masa, longitud media y máxima longitud entre dos puntos, al igual que, altos coeficientes de confianza o correlación.

La diferencia entre las medias obtenidas por ambos métodos de análisis digital, tanto para puntilla, como para grano quebrado, pudo deberse a la utilización de un modelo de corrección

(regresión lineal) en uno de los métodos (AD por peso). Considerando el hecho que ambos tuvieron diferencias mínimas entre ellos y aproximaciones muy cercanas a los resultados obtenidos por sus metodologías tradicionales, un ajuste por regresión permitió garantizar una mejor aproximación para la variable respuesta deseada (Mendenhall et al, 2010). Al igual que en el estudio realizado por Verbeek (2017), se consideró la regresión lineal como el mejor predictor (método de mínimos cuadrados) para una determinada muestra.

3.4 Resultados para propiedades de mesa.

Para la obtención de los resultados referentes a las propiedades de mesa, fueron utilizadas las capturas correspondientes a las muestras de 25 g. Estas se procesaron en Image J (Anexo S) mediante el método de área, y en cada una, los elementos detectados en el análisis digital fueron identificadas mediante la herramienta ROI (region of interest), (Figura 31). Se continuó con el proceso de cuantificación, aplicado por el software RStudio, introduciendo en esta fase de la metodología de análisis, un nivel de supervisión y corrección humano a la Red Neuronal Artificial, eliminando los elementos indeseados como parte de la interfaz de que se le permite al usuario, a través el algoritmo de cuantificación (Anexo W).

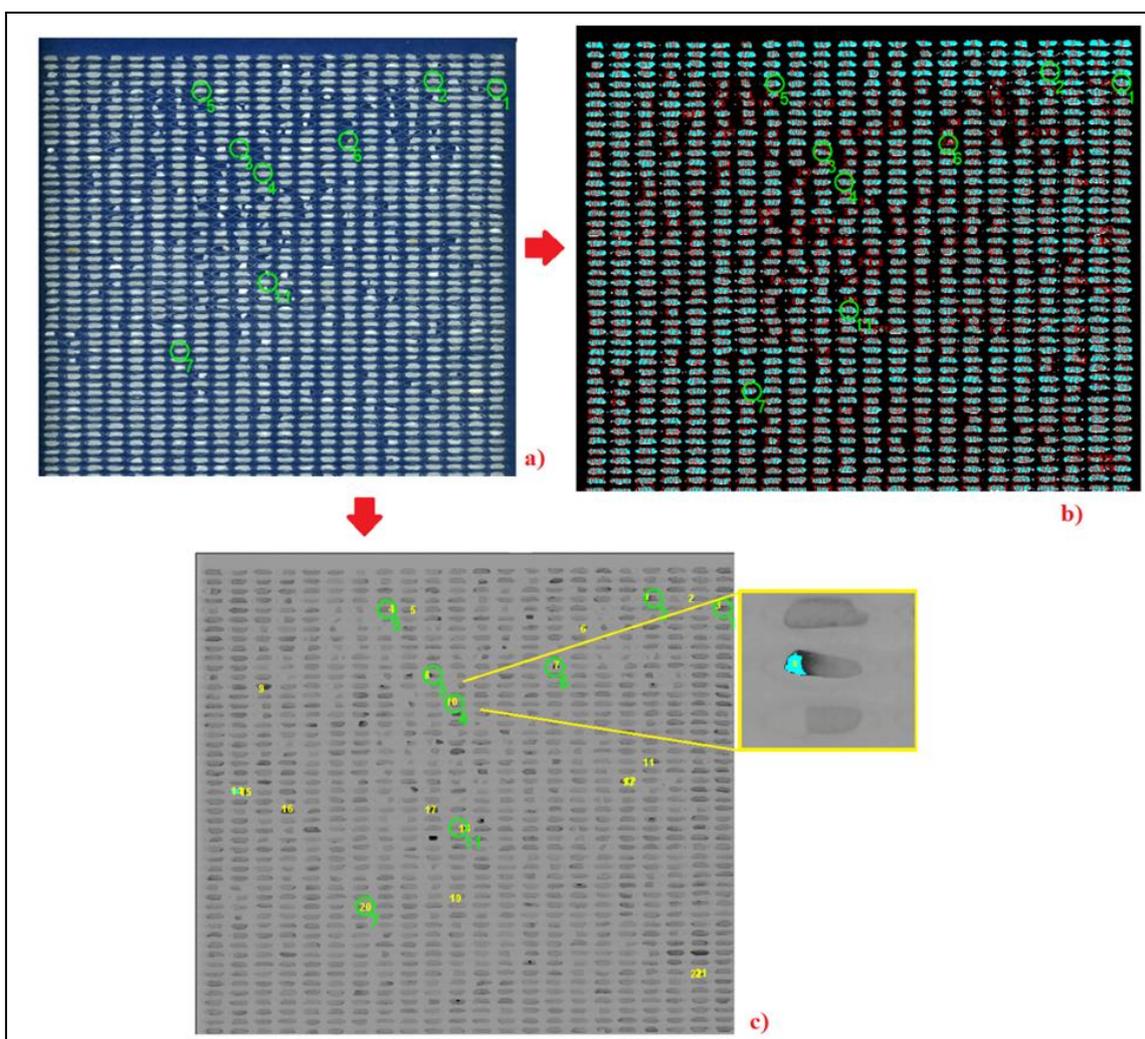


Figura 31. Ejemplo de captura digital (a), imagen procesada para propiedades dimensionales (b) e imagen procesa para propiedad de mesa específica (c), en los granos de arroz pilado, todas bajo la herramienta de identificación ROI (Fuente: Elaboración propia).

El proceso de identificación mediante la herramienta ROI, permitió seleccionar un único elemento, de la totalidad de arroces identificados por el procesamiento dimensional por área (Figura 31b) y corroborar el resultado del análisis para una propiedad de mesa específica (Figura 31c), utilizando en el proceso, la imagen real con correcciones de brillo y contraste (Figura 31a).

3.4.1 Grano dañado.

Según el RTCR 202:1998, se considera un elemento bajo la característica de dañado, a aquel “grano de arroz pilado, entero o quebrado, que esté evidentemente deteriorado por la acción de insectos, microorganismos o materialmente dañado por otras causas, se excluye de esta definición, al grano manchado y al grano dañado por calor” (Decreto N° 26901, 1998). Esto involucra cambios evidentes en el color, olor y/o estructura del grano (Rojas, 2012). La característica del grano dañado es un factor de calidad relacionado con el proceso de conversión del arroz en granza a arroz blanco (pulido), la solidez del grano entero, la calidad comercial y la presentación final del arroz blanco producido (Ortiz F, 2005).

Se muestra en la Figura 32 una serie de granos bajo la propiedad de dañados, sobre una fila de granos comunes, sin ninguna característica o propiedad de mesa indeseada. Se observa un característico deterioro en la superficie del grano y en algunos casos, hasta en el interior de este, penetrando la capa exterior y dañando parte del endospermo del mismo. Este daño se ve reflejado como una coloración oscura y ennegrecida, con tonalidades amarillas y negras, en algunas porciones más dañadas.

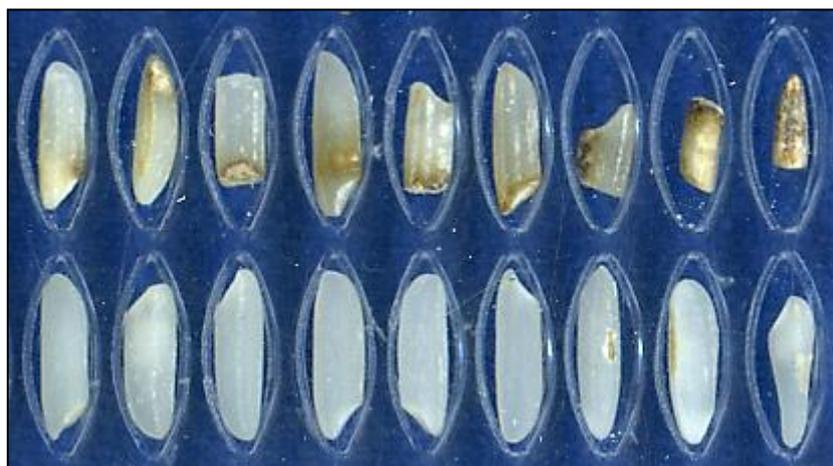


Figura 32. Ilustración de los granos de arroz pilado clasificados como granos dañados (sup) contra granos estándar (inf).

Se muestra en el Cuadro 9 los resultados de porcentajes obtenidos para grano dañado, mediante el análisis de inspección tradicional y el método de análisis digital por área. Estos datos no muestran una tendencia concisa en relación al porcentaje de calidad, como en el caso del grano entero, quebrado y puntilla. Pero se resalta el hecho, de que en las muestras de 80% grano entero, fueron en donde se presentaron de una manera más uniforme, los mayores porcentajes de presencia para esta característica, esto, para ambos métodos de análisis aplicados.

Cuadro 9. Porcentajes de grano dañado obtenidos en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el análisis digital (AD).

Rep.	Calidad comerc. (%)	Código de muestra	Grano dañado AT (%)	Grano dañado AD (%)	Dif. entre métodos. (pp)	Calidad comerc. (%)	Código de muestra	Grano dañado AT (%)	Grano dañado AD (%)	Dif. entre métodos. (pp)
R1	99	259	0,128	0,432	0,304	91	256	1,612	0,823	0,789
R2			0,240	0,610	0,370			1,152	0,153	0,999
R3			0,152	0,919	0,767			1,496	0,22	1,276
R1	99	252	0,528	0,281	0,247	91	261	0,088	0,593	0,505
R2			0,408	0,398	0,010			0,14	0,483	0,343
R3			0,356	0,146	0,210			0,516	0,81	0,294
R1	99	258	0,312	0,000	0,312	80	255	0,688	0,501	0,187
R2			0,304	0,000	0,304			1,100	0,559	0,541
R3			0,536	0,075	0,461			0,508	0,53	0,022
R1	95	257	0,636	0,137	0,499	80	260	0,82	0,875	0,055
R2			0,660	0,487	0,173			1,192	0,983	0,209
R3			0,636	0,451	0,185			1,052	0,547	0,505
R1	95	254	0,536	0,747	0,211	80	253	0,664	0,675	0,011
R2			1,000	0,918	0,082			1,588	1,098	0,490
R3			0,712	0,496	0,216			0,784	0,866	0,082

Se muestra en la mayoría de los valores porcentuales por repetición, que fueron obtenidos por el AT, una mayor cantidad de elementos detectados, bajo la propiedad de grano dañado, en comparación con los obtenidos por el AD (Cuadro 9). Al igual que en la investigación de análisis digital en granos realizada por Wang et al (2002), la característica tonalidad y decoloración, detectadas en los granos dañados, se presentó en todo el grano, una parte de éste o como una decoloración lineal negra, permitiendo así, invisibilizar su detección desde un punto de observación opuesto a donde esta se presenta en el grano. Los métodos de medición para propiedad de calidad en granos que son basados en imágenes 2D, presentan la desventaja de no poder reflejar la caracterización cúbica del elemento. A diferencia de sistemas de captura 3D, estos no son capaces de visualizar la estructura interna, realizar el cálculo de volumen y determinar la localización específica de la propiedad de interés en la estructura volumétrica del grano, tal y como lo comprueban Su & Xiao (2020) en los resultados de su estudio tridimensional en granos.

3.4.2 Grano rojo.

Es identificado el grano rojo, como el grano entero o pedazo de este, que conserve un área de salvado rojizo, después del proceso de pulido, mayor a la cuarta parte de la superficie original del grano completo (Rojas, 2012). Esta característica es comúnmente conocida como granos defectuosos colorados o granos con estrías rojas y se relaciona con procesos menos eficientes de pulido (Ortiz & Ojeda, 2006, Acosta et al, 2017). Caracteriza el RTCR 202:1998 al grano rojo, como aquel “arroz pilado, entero o quebrado que conserve una o más estrías de pericarpio rojo, cuya longitud, ya sea individual o sumadas, sea igual o mayor a la mitad de la longitud original del grano” (Decreto N° 26901, 1998). Se muestra en la Figura 33 un ejemplo representativo de granos que fueron identificados bajo esta característica.

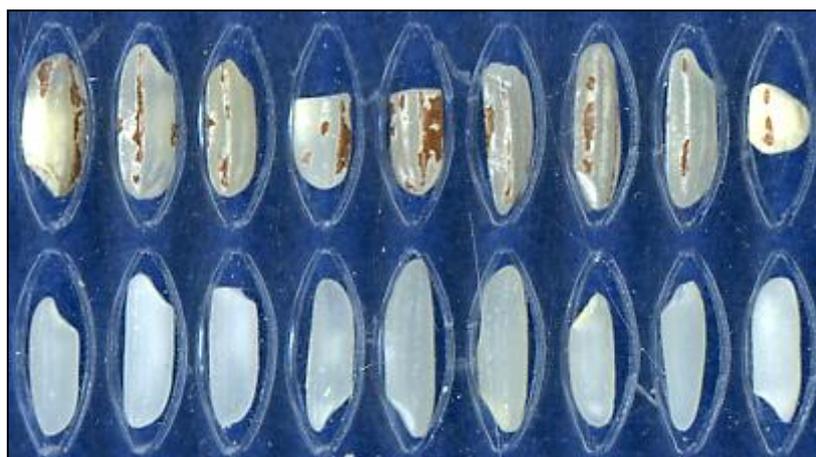


Figura 33. Ilustración de los granos de arroz pilado clasificados como granos rojos (sup) contra granos estándar (inf).

En el Cuadro 10 se muestran los valores obtenidos para la propiedad de grano rojo, mediante el método digital y tradicional. Nuevamente, la característica de interés no muestra una tendencia definida con relación al porcentaje de calidad comercial, el mayor porcentaje promedio de granos bajo esta condición se mostró en la unidad 254, con un porcentaje de calidad del 95%.

Cuadro 10. Porcentajes de grano rojo obtenidos en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el análisis digital (AD).

Rep.	Calidad comerc. (%)	Código de muestra	Grano rojo AT (%)	Grano rojo AD (%)	Dif. entre método (pp)	Calidad comerc. (%)	Código de muestra	Grano rojo AT (%)	Grano rojo AD (%)	Dif. entre método (pp)
R1	99	259	0,000	0,212	0,212	91	256	0,228	0,083	0,145
R2			0,000	0,000	0,000			0,108	0,066	0,042
R3			0,000	0,000	0,000			0,076	0,000	0,076
R1	99	252	0,080	0,071	0,009	91	261	0,076	0,081	0,005
R2			0,084	0,000	0,084			0,068	0,079	0,011
R3			0,072	0,000	0,072			0,000	0,050	0,050
R1	99	258	0,000	0,000	0,000	80	255	0,032	0,031	0,001
R2			0,000	0,000	0,000			0,044	0,038	0,006
R3			0,000	0,000	0,000			0,000	0,000	0,000
R1	95	257	0,072	0,000	0,072	80	260	0,236	0,069	0,167
R2			0,080	0,000	0,080			0,228	0,095	0,133
R3			0,104	0,000	0,104			0,068	0,000	0,068
R1	95	254	0,352	0,225	0,127	80	253	0,176	0,159	0,017
R2			0,356	0,234	0,122			0,176	0,025	0,151
R3			0,728	0,000	0,728			0,084	0,122	0,038

Se obtuvo importantes discrepancias entre los resultados obtenidos mediante los dos métodos de análisis (AT y AD), en la mayoría de las unidades muestrales. Se resaltan los valores obtenidos para la unidad 254, donde en ambos métodos, se obtuvo los porcentajes promedio más altos, 0,48% para el AT y 0,15% para el AD, una diferencia igual a 0,33 pp entre estos métodos de análisis.

3.4.3 Grano manchado.

Define el RTCR 202:1998 al grano manchado, como aquel “grano pilado, entero o quebrado que tenga una coloración amarillenta evidentemente diferente al color natural del arroz en el análisis, se incluye en esta definición a los granos precocidos” (Decreto N° 26901, 1998). Esta condición presenta granos con manchas perfectamente visibles, en tonalidades claras u oscuras que penetran en el endospermo (Rojas, 2012) y está relacionada con parámetros y estándares de calidad en el mercado, es por esta razón que son establecidos niveles máximos y mínimos para su comercialización (Ortiz F, 2005). En la Figura 34 se muestra un ejemplo de granos bajo esta categoría

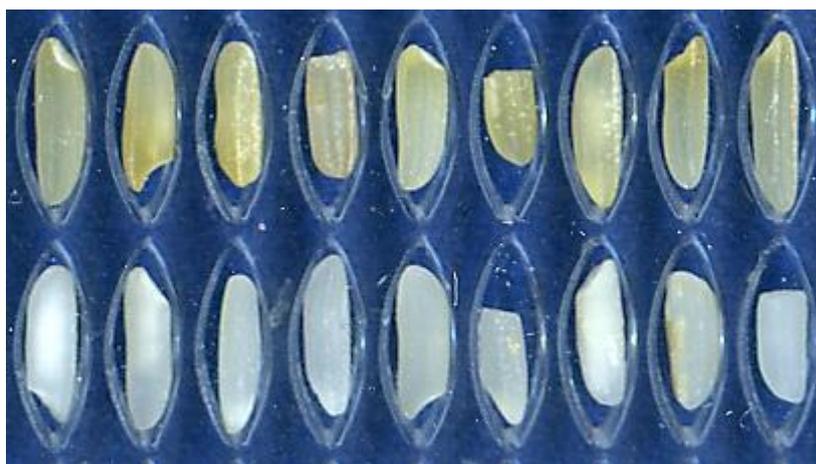


Figura 34. Ilustración de los granos de arroz pilado clasificados como granos manchados (sup) contra granos estándar (inf).

En el Cuadro 11 se muestra los porcentajes de grano manchado obtenidos tanto para el método de análisis tradicional como el método digital. Para siete de diez unidades muestrales analizadas para la propiedad de grano manchado, se obtuvo porcentajes promedio mayores para el AD. Ambos métodos muestran una clara tendencia creciente, de la presencia de granos, en las unidades muestrales con menor porcentaje de calidad comercial.

Cuadro 11. Porcentajes de grano manchado obtenidos en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el análisis digital (AD).

Rep.	Calidad comerc. (%)	Código de muestra	Grano mancha. AT (%)	Grano mancha. AD (%)	Dif. entre método (pp)	Calidad comerc. (%)	Código de muestra	Grano mancha. AT (%)	Grano mancha. AD (%)	Dif. entre método (pp)
R1	99	259	0,000	0,000	0,000	91	256	0,000	0,000	0,000
R2			0,000	0,000	0,000			0,280	0,238	0,042
R3			0,000	0,076	0,076			0,208	0,105	0,103
R1	99	252	0,000	0,000	0,000	91	261	0,080	0,170	0,090
R2			0,000	0,000	0,000			0,000	0,180	0,180
R3			0,000	0,000	0,000			0,140	0,464	0,324
R1	99	258	0,060	0,064	0,004	80	255	0,076	0,190	0,114
R2			0,084	0,074	0,010			0,052	0,081	0,029
R3			0,044	0,051	0,007			0,020	0,000	0,020
R1	95	257	0,204	0,340	0,136	80	260	0,084	0,290	0,206
R2			0,096	0,292	0,196			0,232	0,716	0,484
R3			0,116	0,000	0,116			0,168	0,411	0,243
R1	95	254	0,000	0,000	0,000	80	253	0,128	0,601	0,473
R2			0,028	0,000	0,028			0,160	0,201	0,041
R3			0,112	0,000	0,112			0,344	0,448	0,104

Los porcentajes obtenidos en las repeticiones de análisis para el grano manchado no superaron el 0,3%, para el análisis tradicional y el 0,75% para el análisis digital (Cuadro 11). Esta característica se presentó principalmente en las unidades muestrales de menores calidades (91% y 80% grano entero), con intervalos para los valores porcentuales, iguales a: 0,05% – 0,21% para el caso del AT y 0,09% – 0,47% para el AD.

3.4.4 Grano yesoso.

Se relaciona a la característica yesosa con granos inmaduros que no han alcanzado su pleno desarrollo (Rojas, 2012). Definen Sampallo et al (2013) al grano “panza blanca” (forma de grano yesoso) como aquel que presente una mancha opaca blanca en la zona ventral y menos frecuentemente, en la parte dorsal de este. Se relaciona con el aumento en el porcentaje de granos quebrados y es resultado de la inhibición de los genes encargados de la síntesis de almidón (Siebenmorgen et al, 2011, Xie et al, 2021). Lo caracteriza el RTCR 202:1998, como aquel “grano de arroz pilado, entero o quebrado, que presenta al menos la mitad de su volumen total una apariencia física y color similar al yeso” (Decreto N° 26901, 1998) (Figura 35).



Figura 35. Ilustración de los granos de arroz pilado clasificados como granos yesosos (sup) contra granos estándar (inf).

El Cuadro 12 se muestra los resultados por repetición, del análisis de grano yesoso, obtenidos tanto por el método tradicional como por el digital. Se obtuvo un mayor porcentaje en aquellas muestras de menor calidad (91% y 80%), pero de igual forma, en aquellas muestras de más alta calidad (90%) también se presentaron porcentajes considerables, con un intervalo de entre 0,3% a 1,7%.

Cuadro 12. Porcentajes de grano yesoso obtenidos en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el análisis digital (AD).

Rep.	Calidad comerc. (%)	Código de muestra	Grano yesoso AT (%)	Grano yesoso AD (%)	Dif. entre métodos (pp)	Calidad comerc. (%)	Código de muestra	Grano yesoso AT (%)	Grano yesoso AD (%)	Dif. entre métodos (pp)
R1	99	259	2,680	1,344	1,336	91	256	0,776	2,943	2,167
R2			1,584	4,355	2,771			0,364	2,747	2,383
R3			1,708	3,068	1,360			0,828	2,301	1,473
R1	99	252	1,888	3,910	2,022	91	261	5,14	3,321	1,819
R2			1,672	3,215	1,543			4,88	3,147	1,733
R3			1,660	3,081	1,421			4,5	2,864	1,636
R1	99	258	0,080	1,977	1,897	80	255	3,532	3,088	0,444
R2			0,488	1,749	1,261			2,504	6,259	3,755
R3			0,336	1,599	1,263			2,74	6,317	3,577
R1	95	257	1,132	4,951	3,819	80	260	1,932	2,308	0,376
R2			2,976	6,807	3,831			2,388	1,904	0,484
R3			0,964	4,010	3,046			2,016	2,66	0,644
R1	95	254	1,040	1,856	0,816	80	253	3,216	8,649	5,433
R2			0,704	5,868	5,164			5,636	9,485	3,849
R3			0,852	5,157	4,305			0,632	9,823	9,191

Los valores promedios para blancura resultantes de proceso digital (Cuadro 12), fueron considerablemente mayores que aquellos obtenidos por el método tradicional, esto para nueve de las diez unidades muestrales evaluadas. Lo cual sugiere que el AD tiende a detectar una mayor cantidad de elementos en esta condición, ya sea de forma acertada o bajo una errónea clasificación en la fase correctiva del algoritmo, como resultado de las limitaciones sensoriales del método.

3.4.5 Comparación estadística para resultados obtenidos de propiedades de mesa.

La comparación gráfica entre los porcentajes obtenidos mediante el método tradicional (AT) y el método digital por área (AD), referentes a las características de mesa analizadas, son mostrados en la Figura 36, Figura 37, Figura 38 y Figura 39. En ellas, fueron comparados los valores promedio obtenidos de cada una de las tres repeticiones por unidad muestral. En la Figura 36 se pueden observar los promedios obtenidos para la característica de grano dañado, con el método de análisis tradicional y con el método digital. En cinco de las diez unidades analizadas, los valores promedio obtenidos mediante el método tradicional fueron mayores a los obtenidos mediante el AD (considerando sus intervalos de error), haciendo referencia a una incapacidad del sistema digital en la detección total de elementos bajo esta característica.

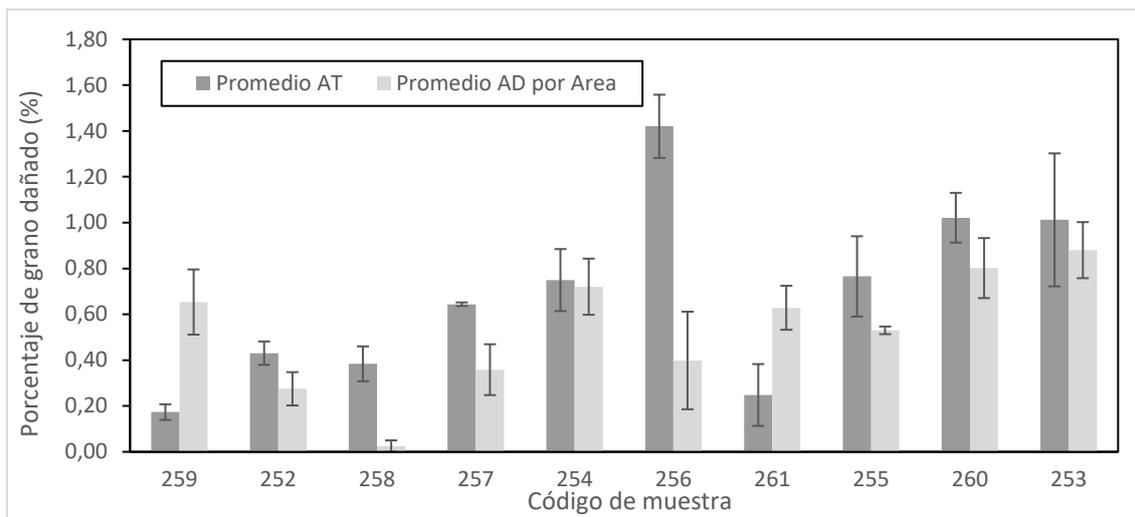


Figura 36. Porcentaje para grano dañado obtenido en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD). Las barras representan el error estándar de la media.

Existe diferencia significativa entre ambos métodos de análisis para la determinación de grano dañado, esta pudo deberse a las distintas tonalidades de color que se presentan en un grano bajo esta característica. Al respecto, Acosta et al. (2017) obtuvieron mejores porcentajes de grano dañado detectado, en su estudio de comparación entre un método de análisis oficial, con una metodología de categorización tradicional, llevada a cabo mediante inspección visual, y un sistema de detección digital. Estos autores utilizaron como metodología de análisis, el mismo proceso de identificación de características aplicado en este trabajo. Fue realizado mediante un umbral o valor de capa límite (thresholding), con la variante en su caso, de aplicar dos comandos continuos thresholding, para la misma característica. Identificando de esta forma, claras diferencias en su coloración bajo un mismo parámetro o propiedad de análisis.

Por su parte, se muestra en la Figura 37 los valores promedios obtenidos para la característica de grano rojo, mediante AT y AD. Al igual que con la característica de mesa anterior, se mostraron considerables discrepancias entre los resultados obtenidos por ambos métodos. En la unidad 254 se detectó la mayor cantidad de grano rojo, tanto para el AT como para el AD, aunque este último, presentó una diferencia de más de 0,3 pp. El sistema digital detectó un falso negativo para la unidad 257 (error tipo II) en las 3 repeticiones y la presencia de grano rojo en la repetición 1 del análisis digital, lo cual difiere con la no detección total por parte del método tradicional (error tipo I) en esta unidad muestral, ambos métodos concordaron en la no detección de granos rojos para la unidad 258.

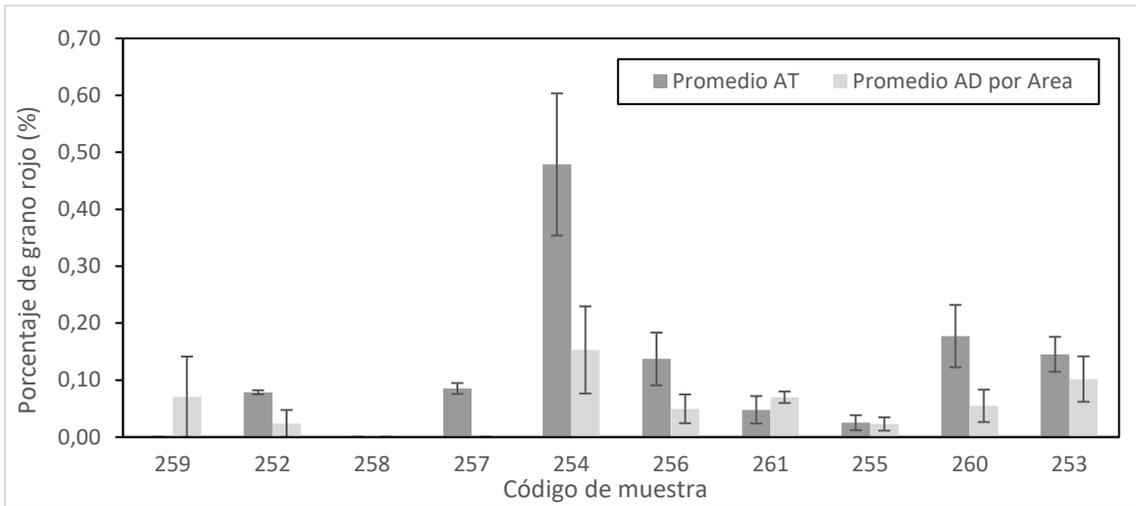


Figura 37. Porcentaje para grano rojo obtenido en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD). Las barras representan el error estándar de la media.

El número de elementos que fueron detectados en la mayoría de las unidades muestrales mediante el análisis tradicional (AT), en comparación con los obtenidos mediante la utilización del análisis digital (AD), para la propiedad de grano rojo (Figura 37), pudo deberse a las limitaciones del área capturable, por un sistema digital. Esto como resultado de que estos sistemas digitales involucran una única imagen bidimensional para intentar estudiar toda la superficie de los granos muestrales (Zheleznyak & Sidorov, 2015).

En cuanto a la propiedad de grano manchado, en la Figura 38 se muestran los valores promedio obtenidos con el método de análisis tradicional y con el método digital. Estos valores evidenciaron una tendencia creciente al disminuir el porcentaje de calidad en las unidades muestrales, tanto para el método tradicional, como el método digital. Se presentó un error tipo I en la unidad 259, para la repetición 3 del análisis digital, y un error tipo II en la unidad 254, para todas las repeticiones analizadas digitalmente.

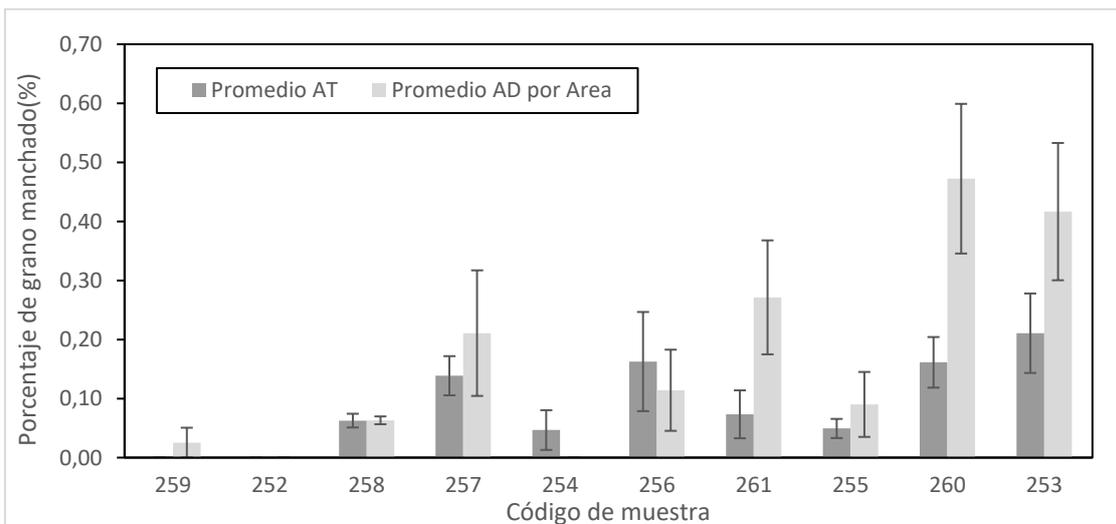


Figura 38. Porcentaje para grano manchado obtenido en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD). Las barras representan el error estándar de la media.

Se obtuvieron discrepancias importantes entre ambos métodos, a partir de las unidades muestrales con porcentajes de calidad inferiores al 99%. El análisis digital mostró una mayor detección de la característica estudiada, en la mayoría de los casos (Figura 38). Es importante considerar que, en los análisis de calidad para granos de arroz que presentan diversas características de apariencia y que son llevamos a cabo por inspectores, reiteradamente se presentan dificultades para designar una respectiva condición o característica de calidad, ya que esta diferencia puede no ser obvia para el ojo humano, lo cual si puede ocurrir para el sistema de análisis digital (Wan et al, 2002, Brosnan & Sun, 2004). La mayor diferencia se presentó en la unidad 260 y fue igual a 0,31 pp, con un porcentaje de calidad igual al 80%. En general, ambas técnicas de análisis mostraron un error estándar alto en los promedios, especialmente para aquellos obtenidos por el AD. Los valores de grano manchado en las muestras con menores porcentajes de calidad presentaron la mayor discrepancia entre ambos métodos.

Los resultados obtenidos por el AT y el AD para la propiedad de grano yesoso se muestran en la Figura 39. No evidenció ninguna tendencia clara entre la presencia del grano yesoso y el porcentaje de calidad comercial. De igual manera, la diferencia de los resultados obtenidos entre los dos métodos es amplia para cada unidad muestral. Una parte importante en el proceso de detección mediante el método tradicional para esta característica es la comprobación manual del grano (Su & Xiao, 2020, Ortiz, 2005). Este proceso pudo involucrar la partición del grano en una o más partes de menor tamaño, por lo cual, al utilizar exactamente la misma unidad muestral en el proceso de análisis digital, se esperaría un aumento del área detectada bajo esta característica, como resultado del aumento en el área superficial expuesta a la captura digital.

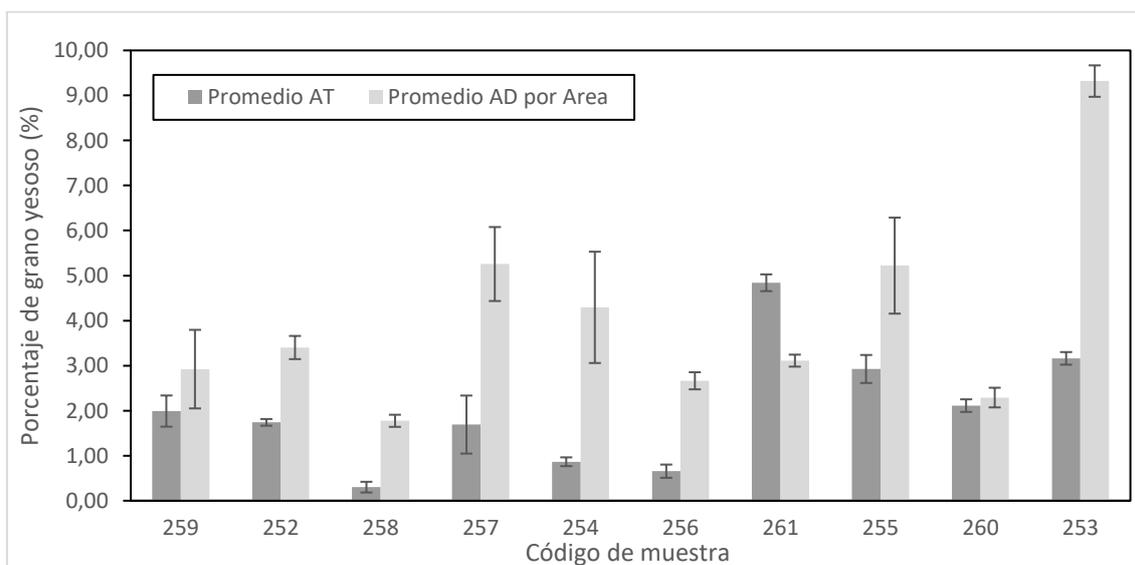


Figura 39. Porcentaje para grano yesoso obtenido en las muestras de arroz pilado mediante el método tradicional (AT) y el método digital (AD). Las barras representan el error estándar de la media.

Los valores de promedio en la Figura 39 que fueron obtenidos mediante el AD, mostraron un mayor error muestral en la mayoría de las unidades analizadas, siendo así, más conciso el AT. Fasabi (2019) menciona la importancia de complementar los métodos de análisis de calidad para arroz pulido, con sistemas de identificación profunda, como por ejemplo los equipos por sensor U.V, con la finalidad de obtener clasificaciones certeras, mejorar la eficiencia y el servicio operacional. Sobrepasando de esta forma, la limitación que implican las metodologías de análisis

bidimensional, para la determinación de manchas, coloraciones negras y tamaño mínimo de yeso aceptable (panza blanca) en los granos.

Se debe considerar que, ciertas características de interés en los granos pudieron presentarse únicamente en un lado de estos, por lo cual es posible que hayan sido omitidas del análisis digital bidimensional y no del análisis tradicional, como es el caso de los errores tipo II detectados en ciertas unidades muestrales de grano rojo y manchado. Ante esto, es importante considerar el ángulo de observación, la iluminación y la forma de la característica a analizar digitalmente, en la generación de pseudo-resultados y su alta inevitabilidad en la práctica de análisis digital, aplicado a la determinación de características morfológicas (Zhang, et al., 2021).

Los resultados obtenidos a partir del análisis de normalidad Q-Q, para las propiedades de mesa, se muestran en la Figura 40, para el caso del grano dañado y grano rojo; y en la Figura 41, para la propiedad de grano manchado y grano yesoso.

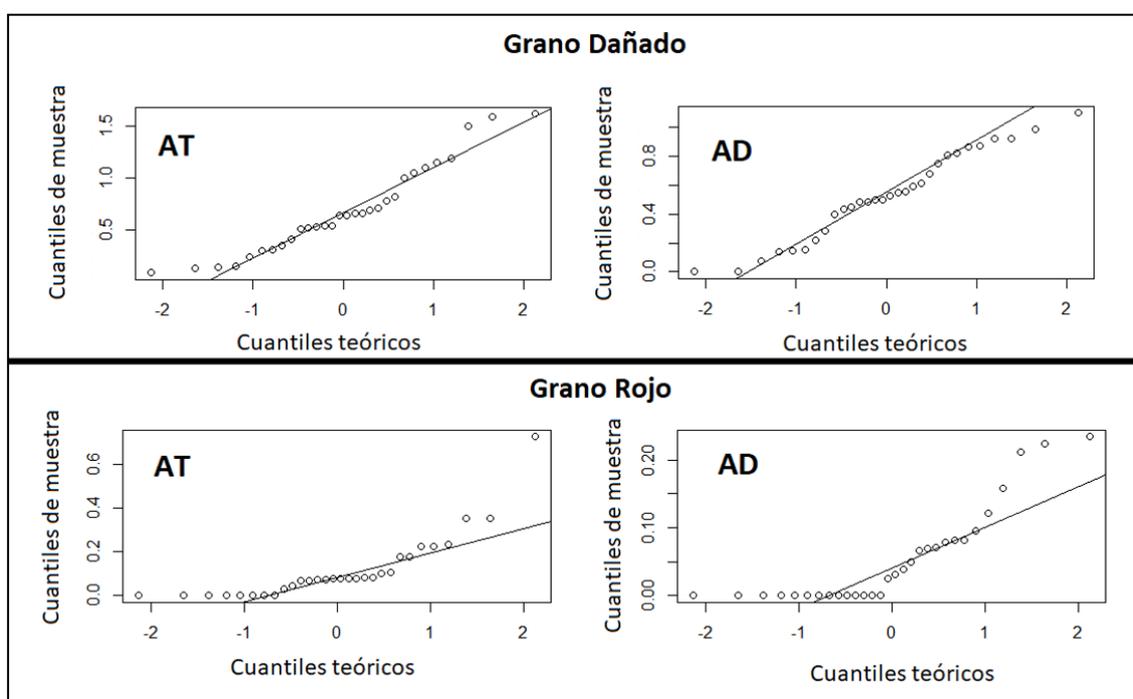


Figura 40. Análisis de normalidad Q-Qplot para variables de grano dañado y grano rojo, obtenidas por los métodos tradicional, digital por área y digital por peso.

Las pruebas de normalidad gráfica realizadas en los valores obtenidos para las características de grano dañado y rojo mostraron elementos de dispersión extremos y con una posición gráfica, no adyacente a la línea de tendencia de normalidad (en menor medida para el grano dañado), en ambos métodos de análisis (Figura 40). Esto se presentó de la misma forma, en los valores gráficos de las propiedades: grano manchado y grano yesoso (Figura 41). El análisis gráfico para comprobar normalidad en las propiedades de mesa mostró que, para ninguna de estas, se obtuvo una tendencia concisa de que sus datos provinieran de una distribución normal.

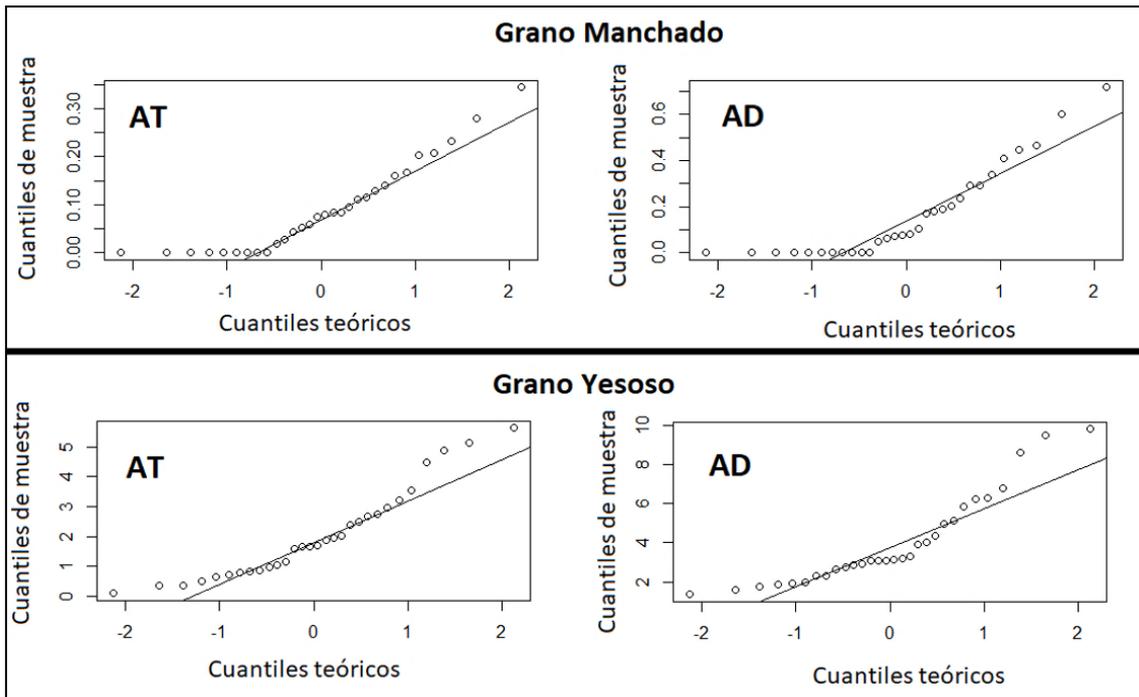


Figura 41. Análisis de normalidad Q-Qplot para variables de grano manchado y grano yesoso, obtenidas por los métodos tradicional, digital por área y digital por peso.

Estas representaciones gráficas de normalidad concuerdan con los resultados obtenidos en la prueba Shapiro–Wilk para estas características (Anexo M), donde todas arrojaron p -values menores a 0,05, para ambas técnicas de análisis. En el caso de grano dañado, se obtuvo p -values mayores a 0,05, con lo cual no existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de normalidad en sus datos específico. No obstante, tomando en cuenta la dispersión de estos en su gráfico de normalidad, para ambos métodos (AD y AT), tampoco se debería considerar una procedencia de distribución normal, en los valores de esta característica de mesa, como resultado de la presencia de elementos extremos y no adyacentes a la línea de tendencia (Figura 40).

Con la comparación estadística entre los resultados, efectuada por las pruebas de correlación de Pearson y Spearman, se obtuvieron coeficientes de correlación positivos y con una magnitud baja, en todas las propiedades de mesa estudiadas, denotando un nivel de correlación débil entre las variables AD y AT. Solo en el caso de la propiedad grano manchado, se obtuvieron valores de correlación mayores a 0,5, denotando una correlación moderadamente fuerte entre ambos métodos de análisis (Anexo N).

Se muestra en la Figura 42 el análisis de correlación para las variables AT y AD de cada una de las características de mesa estudiadas. Los valores de dispersión no mostraron una tendencia lineal ni definida, confirmando de esta forma, la poca correlación entre los resultados obtenidos mediante los dos métodos, para las características de grano dañado, rojo y yesoso. Con respecto a la característica de grano manchado, se observa una pequeña agrupación de datos al inicio de la línea de tendencia, al igual que gran cantidad de sin valores, lo que equivale a que esta característica no fue detectada, lo cual podría explicar parte de los resultados obtenidos en las pruebas de Pearson y Spearman.

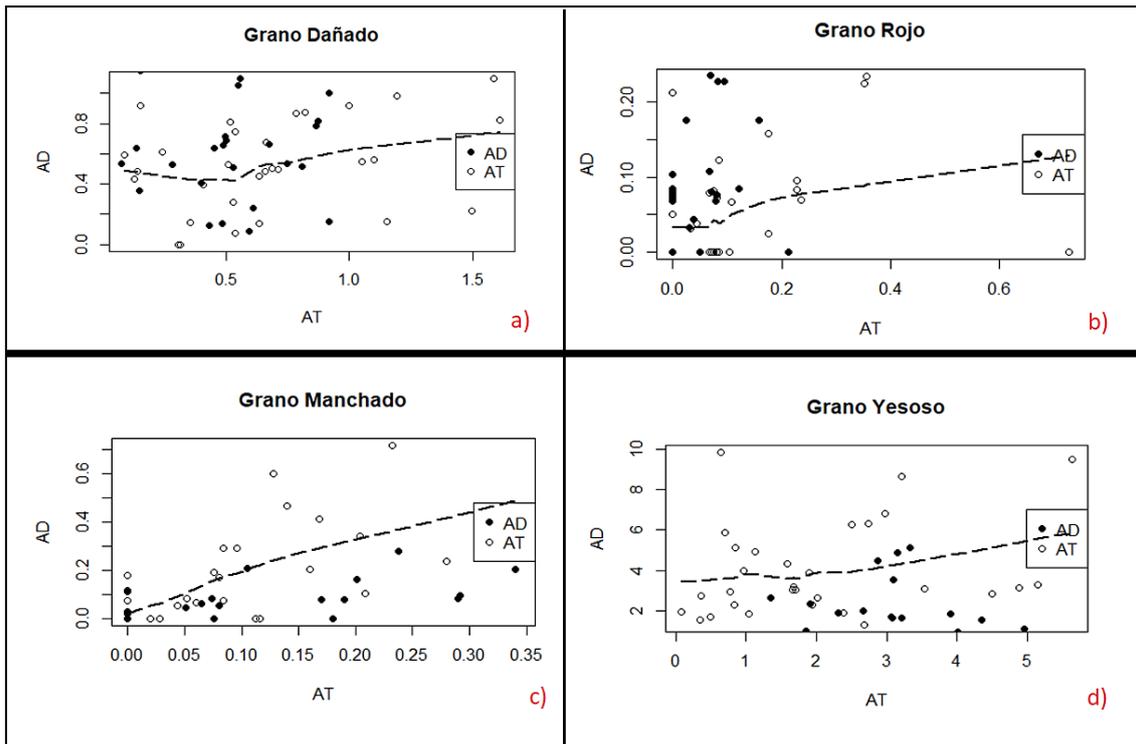


Figura 42. Correlaciones entre los resultados obtenidos mediante AT y AD para las propiedades de grano dañado (a), rojo (b), manchado (c) y yesoso (d).

Considerando los resultados de las pruebas de correlación y las representaciones gráficas de las variables que conformaron las respectivas características de interés, se puede afirmar que el método digital no fue contundente en la detección de las propiedades de dañado, rojo, yesoso y en menor medida, grano manchado, considerando la apariencia superficial de los granos. Esto como posible resultado de la alta dependencia de estos métodos a los valores empíricos, en los modelos de predicción, es tu videncia que es requerida una base de datos altamente robusta y con gran variedad de ejemplares. Y de la misma forma que Acosta et (2017), respaldar la metodología con un sistema de inteligencia artificial con aprendizaje continuo, con el fin de obtener lecturas de alta precisión en la identificación de defectos en granos de arroz. La detección de propiedades de coloración (mesa), mostró una mayor magnitud de error, en comparación con las características dimensionales (GEQP). Al igual que lo obtenido como resultados por Vera et al (2017) y Huérfano et al (2015) en sus investigaciones, se evidencia en una mayor efectividad en el análisis digital, para la segmentación en identificación precisa de elementos, utilizando la herramienta ROI, para el correcto aislamiento del objeto con respecto a su fondo en la imagen.

Las diferencias encontradas en los resultados obtenidos para las propiedades de mesa, al utilizar los métodos de análisis digital y tradicional, se debieron a las dificultades encontradas por el modelo de análisis digital para cada característica en particular. Las propiedades detectadas de grano dañado y rojo, solo pudieron ser detectados de forma parcial y no en la totalidad del área exterior de los granos. De igual manera, la detección de la propiedad de grano yesoso también se mostró afectada por esto y al mismo tiempo, por el aumento del área superficial, producto de la acción destructiva del AT sobre algunos granos que requirieron ser partidos en el proceso de inspección. Únicamente, la propiedad de grano manchado pudo ser detectada de forma medianamente precisa, como resultado de su homogeneidad de coloración y presencia, sobre la

superficie e interior de los granos analizados. Por consiguiente, se caracteriza al método de análisis digital, aplicado en este estudio, como poco viable para la obtención de las propiedades de mesa.

3.5 Resultados de las propiedades de blancura en los granos.

Con la utilización del equipo para detectar la blancura, transparencia y calcular el grado de pulido de los granos de arroz (MMID SATAKE), se obtuvo los primeros valores para las propiedades de blancura (Anexo D) y se designaron como AT. Para la obtención de los datos digitales (AD), se hizo uso de la herramienta de deconvolución, esta fue aplicada con la intención de obtener valores específicos de área detectada en la imagen digital, al descomponer está en sus tres capas fundamentales de color (Figura 43).

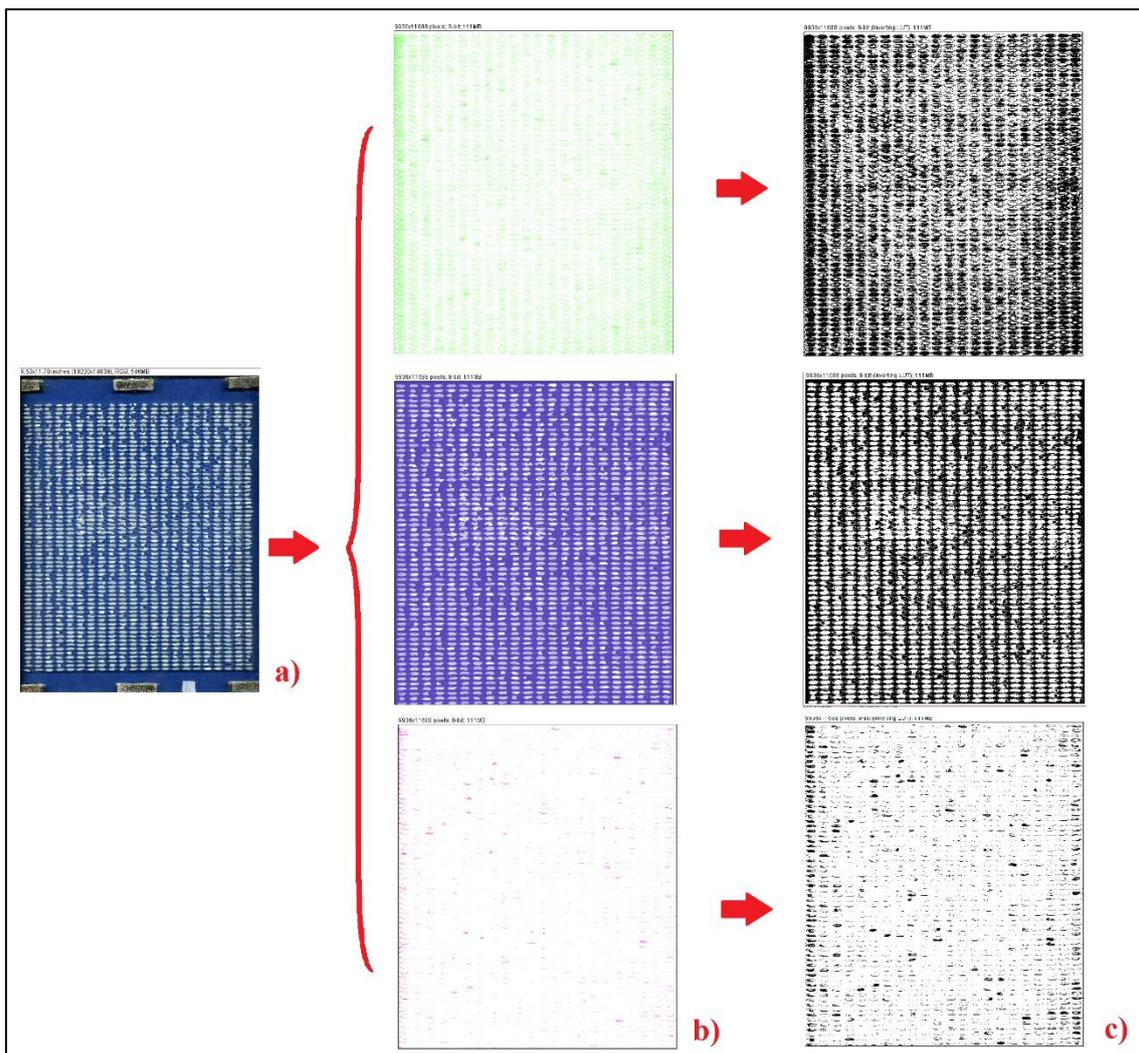


Figura 43. Ejemplificación del proceso de análisis para propiedades de blancura y transparencia, imagen original (a), imagen resultante del proceso deconvolution (b), imagen resultante del proceso thresholding (c) (Fuente: Elaboración propia).

El proceso de obtención de los valores digitales, específicamente, para las características de blancura y transparencia, se llevó a cabo mediante el proceso de deconvolución, mostrado en el Anexo T. Este fue aplicado a 30 capturas digitales obtenidas por el escáner. Así se obtuvieron un total de 180 imágenes procesadas, 90 de estas, como resultado del proceso de deconvolución por capas (Figura 43b) y las otras 90, fueron resultantes del proceso de separación por límites

margen (thresholding) (Figura 43c), para de esta manera, determinar el área capturarle y analizable en cada una de ellas, mediante el procesamiento por filtros o funciones lineales (Campa, 2017, Chen et al, 2017).

Los valores finales asignados para cada capa fueron los resultantes de la diferencia entre los valores iniciales del proceso de deconvolución y los valores obtenidos de este mismo proceso para la placa vacía. Garantizando de esta forma la detección de únicamente el área referente al grano en la imagen digital. El grado de pulido mediante el método digital, fue el resultado de la aplicación del modelo de regresión lineal multivariable (MR) del Cuadro 17, el cual utilizó como variables explicativas los valores de blancura y transparencia; y como variable a predecir, el grado de pulido, obtenidos del equipo MM1D.

3.5.1 Resultados para propiedad de blancura.

Los valores de RGB de área para cada capa componente (azul, rojo y verde) fueron usados como variables predictoras en el modelo de regresión lineal multivariable (x_1 , x_2 y x_3 , respectivamente) (Ecuación 6, 7 y 9), que fue aplicado para la obtención de la propiedad blancura (Cuadro 13). Los porcentajes ajustados, resultantes del modelo, fueron los asignados como los valores finales por repetición y unidad muestral, en el análisis de blancura, estos en conjuntos con los obtenidos por el equipo automático se muestran en el Cuadro 14. La totalidad de los resultados se muestra en el Anexo C.

Cuadro 13. Modelo de regresión lineal multivariable aplicado a los resultados obtenidos para la propiedad de blancura.

$y = -1,47 + 1,637x_1 - 0,231x_2 + 0,151x_3$	
$R^2 = 0,404$	Error estand residual = 1,073. con 26 g.l
$R^2_{ajust} = 0,335$	
$\beta_0 = -1,47$	<i>p-value</i> = 0,955
$\beta_1 = 1,637$	<i>p-value</i> = 0,192
$\beta_2 = -0,231$	<i>p-value</i> = 0,285
$\beta_3 = 0,151$	<i>p-value</i> = 0,012

En el Cuadro 13 se muestra el coeficiente de determinación R^2 obtenido del modelo de regresión, el cual, sugiere una explicación de poco más del 40% de la variable dependiente y de un poco más del 30% para el coeficiente de regresión ajustado, haciendo referencia al bajo aporte estadístico al modelo por parte de los coeficientes de predicción (β_n). La diferencia entre R^2 y R^2_{ajust} sugiere el hecho de que agregar más variables predictoras induciría a un error de sobrestimación en el modelo. Ambos fueron porcentajes muy bajos, que en conjunto con el único coeficiente estadísticamente significativo β_3 (*p-value* inferior a 0,05), caracterizan al modelo como poco predictivo. Esto se reflejada en la diferencia de los resultados categorizados por repetición y código muestral, que fueron obtenidos por el método de deconvolución y el equipo automático SATAKE (Cuadro 14).

Cuadro 14. Resultados para propiedad de blancura obtenidos con el equipo SATAKE MM1D y análisis digital por área.

Rep.	Calidad comerc. (%)	Código de muestra	Blancura equipo SATAKE (%)	Blancura AD (%)	Dif. entre método (pp)	Calidad comerc. (%)	Código de muestra	Blancura equipo SATAKE (%)	Blancura AD (%)	Dif. entre método (pp)
R1	99	259	36,77	38,22	1,45	91	256	36,33	36,69	0,36
R2			37,23	37,86	0,63			36,73	36,93	0,20
R3			36,67	36,73	0,06			36,53	37,39	0,86
R1	99	252	37,53	37,89	0,36	91	261	36,67	37,81	1,14
R2			37,03	39,07	2,04			33,77	37,84	4,07
R3			37,23	39,11	1,88			37,03	36,95	0,08
R1	99	258	37,17	36,41	0,76	80	255	39,90	38,95	0,95
R2			37,23	36,73	0,50			39,53	38,26	1,27
R3			37,13	36,40	0,73			39,47	38,44	1,03
R1	95	257	38,93	37,80	1,13	80	260	37,97	38,32	0,35
R2			40,77	38,50	2,27			39,37	39,07	0,30
R3			39,30	36,95	2,35			38,50	37,73	0,77
R1	95	254	39,40	38,92	0,48	80	253	39,53	39,19	0,34
R2			39,40	39,34	0,06			38,97	38,98	0,01
R3			39,70	38,85	0,85			39,33	39,17	0,16

En el conjunto de resultados obtenidos para la propiedad de blancura (Cuadro 14) no se identificó ninguna tendencia específica entre los porcentajes de blancura y el nivel comercial de calidad, para ninguno de los dos métodos de análisis. Se resalta la homogeneidad de los resultados obtenidos por el equipo SATAKE, según el porcentaje de calidad comercial, en donde la mayor diferencia entre unidades muestrales con mismo grado de calidad, fue igual a 1,02 pp y se presentó en las muestras de 80% grano entero. Por su parte, los resultados obtenidos mediante el AD fueron considerablemente distintos para las unidades muestrales que compartían el mismo porcentaje de calidad. Los valores promedio más bajos se mostraron en las unidades con porcentajes de calidad iguales a 99% y 91%, sin mostrar una tendencia concisa (creciente y decreciente) en la totalidad de los datos, para ambos métodos de análisis.

3.5.2 Resultados para propiedad de transparencia.

De igual forma que en la propiedad anterior de blancura, se empleó un modelo de regresión lineal multivariable para la obtención de transparencia (Cuadro 15). Usando como variable explicativa, el valor final (real) por componente de color, obtenido de la diferencia determinada entre el valor por capa para la imagen y el valor por capa de la placa muestral vacía (Ecuación 6, 7 y 9), ambos resultantes del proceso de deconvolución (denotados en el modelo como x_n) aplicado en ImageJ, la totalidad de los resultados se muestra en el Anexo C.

Cuadro 15. Modelo de regresión lineal multivariable aplicado a los resultados obtenidos de las capas para la propiedad de transparencia.

$y = 7,475 - 0,197x_1 - 0,116x_2 - 0,006x_3$	
$R^2 = 0,725$	Error estand residual = 0,185. con 26 g,l
$R^2_{ajust} = 0,693$	
$\beta_0 = 7,475$	$p\text{-value} = 0,107$
$\beta_1 = -0,197$	$p\text{-value} = 0,359$
$\beta_2 = -0,116$	$p\text{-value} = 0,004$
$\beta_3 = -0,006$	$p\text{-value} = 0,562$

El modelo de regresión lineal del Cuadro 15 mostró un coeficiente de determinación múltiple R^2 , de aproximadamente 0,7 para el resultado general y el resultado ajustado, explicando de esta forma un 70% de la variable dependiente (transparencia). De forma paralela, solamente el coeficiente de regresión β_2 fue estadísticamente significativo ($<0,05$), lo cual sugiere, que únicamente la información obtenida de la capa componente roja aporta significativamente al modelo de predicción. Los resultados finales, obtenidos para la propiedad de transparencia están reflejados en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Resultados para propiedad de transparencia obtenidos con el equipo SATAKE MM1D y análisis digital por área.

Rep.	Calidad comerc. (%)	Código de muestra	Transp. equipo SATAKE (%)	Transp. AD (%)	Dif. entre métodos (pp)	Calidad comerc. (%)	Código de muestra	Transp. equipo SATAKE (%)	Transp. AD (%)	Dif. entre métodos (pp)
R1	99	259	2,81	2,68	0,13	91	256	2,93	2,84	0,09
R2			2,81	2,74	0,07			2,68	2,81	0,13
R3			2,80	2,85	0,05			2,80	2,78	0,02
R1	99	252	2,90	2,76	0,14	91	261	2,64	2,72	0,08
R2			2,93	2,53	0,40			2,76	2,72	0,04
R3			2,85	2,43	0,42			2,72	2,77	0,05
R1	99	258	3,00	2,91	0,09	80	255	2,51	2,54	0,03
R2			3,04	2,86	0,18			2,38	2,62	0,24
R3			2,99	2,90	0,09			2,53	2,60	0,07
R1	95	257	2,95	2,78	0,17	80	260	2,36	2,58	0,22
R2			2,73	2,61	0,12			2,09	2,32	0,23
R3			2,91	2,90	0,01			2,30	2,66	0,36
R1	95	254	2,55	2,56	0,01	80	253	2,04	2,21	0,17
R2			2,31	2,44	0,13			1,81	1,80	0,01
R3			2,51	2,49	0,02			1,95	1,73	0,22

Los resultados del Cuadro 16 muestran una gran semejanza para cada unidad muestral entre ambos métodos de análisis. Estos valores por repetición revelan una tendencia proporcional al porcentaje de calidad, al ser mayor el porcentaje de calidad, mayor el valor de transparencia, para la mayoría de las unidades analizadas por ambos métodos. El modelo obtenido se categorizó como bueno, en su función predictora de la variable transparencia, respaldando lo concluido por Lapcharoensuk et al (2015), el hecho de que los valores o magnitudes de color triestímulo, obtenidos a partir de una imagen digital de arroz pulido, pueden ser sustituidos en las ecuaciones de un modelo de regresión, como variables predictoras, con la intención de determinar la propiedad de transparencia en grano pulido.

3.5.2 Resultados para la propiedad grado de pulido.

De la misma forma que en las propiedades de blancura y transparencia ya analizadas, se realizó un modelo de regresión lineal multivariable (MR) para poder explicar la característica grado de pulido, pero en este caso se utilizaron como variables independientes predictoras, los valores obtenidos de blancura y transparencia (x_1 y x_2) y como variable dependiente a explicar, los valores del grado de pulido brindados por el equipo SATAKE (Cuadro 17) para cada repetición de cada respectiva unidad muestral (Cuadro 17 y Cuadro 18).

Cuadro 17. Modelo de regresión lineal multivariable aplicado a los resultados de las capas obtenidos para la propiedad grado de pulido.

$y = -51,214 + 3,304x_1 + 4,317x_2$	
$R^2 = 0,803$	Error estand residual = 2,285. con 27 g.l
$R^2_{ajust} = 0,789$	
$\beta_0 = -51,214$	$p\text{-value} = 0,002$
$\beta_1 = 3,304$	$p\text{-value} = 0$
$\beta_2 = 4,317$	$p\text{-value} = 0,007$

En el Cuadro 17 se indican los parámetros estadísticos del modelo de regresión multivariable, usado en la determinación del grado de pulido bajo la metodología digital. Se obtuvo un coeficiente de determinación alto, capaz de explicar aproximadamente un 80% de la variable dependiente. Los p -values obtenidos por el modelo ($>0,05$) sugieren, de forma similar que en los resultados obtenidos por Lapcharoensuk et al (2015) en su trabajo de investigación, que ambas variables predictoras aportan significativamente al modelo, permitiendo así, obtener un modelo alternativo de evaluación para el grado de pulido,

Cuadro 18. Resultados para propiedad grado de pulido obtenidos con el equipo SATAKE MM1D y modelo de regresión (MR).

Rep.	Calidad comerc. (%)	Código de muestra	Grado de pulido equipo SATAKE (%)	Grado de pulido AD (%)	Dif. entre método (pp)	Calidad comerc. (%)	Código de muestra	Grado de pulido equipo SATAKE (%)	Grado de pulido AD (%)	Dif. entre método (pp)
R1	99	259	84,33	86,90	2,57	91	256	81,00	83,29	2,29
R2			82,00	85,94	3,94			80,00	83,89	3,89
R3			82,67	83,61	0,94			82,00	84,65	2,65
R1	99	252	83,33	86,14	2,81	91	261	78,00	85,91	7,91
R2			83,67	88,71	5,04			80,33	85,89	5,56
R3			82,67	88,83	6,16			79,33	83,83	4,50
R1	99	258	82,33	82,84	0,51	80	255	93,00	88,37	4,63
R2			84,33	83,38	0,95			90,33	86,92	3,41
R3			82,00	82,68	0,68			91,00	87,19	3,81
R1	95	257	91,67	85,88	5,79	80	260	83,00	86,86	3,86
R2			98,33	87,65	10,68			87,67	87,78	0,11
R3			93,00	84,13	8,87			85,00	85,68	0,68
R1	95	254	91,00	88,40	2,60	80	253	88,00	87,76	0,24
R2			89,00	89,24	0,24			85,00	85,48	0,48
R3			92,00	88,13	3,87			86,67	86,06	0,61

Los resultados por repetición, que fueron obtenidos para la propiedad grado de pulido (Cuadro 18), se encontraron en el rango de 79 hasta 94, para aquellos obtenidos mediante el MR y 83 hasta 88 para los obtenidos mediante el equipo automático SATAKE. Para ninguno de los

dos métodos de análisis, se obtuvo una tendencia clara en relación al porcentaje de calidad comercial, pero se destaca la homogeneidad de los resultados obtenidos por el equipo automático, entre aquellas unidades muestrales que comparten porcentaje de calidad comercial, con especial énfasis en aquellas de calidad 99%.

3.5.3 Comparación estadística para resultados obtenidos para las propiedades de blancura.

Los porcentajes promedio obtenidos por los dos métodos de análisis, en la propiedad de blancura, están representados en la Figura 44. El rango para el valor promedio de blancura fue desde el 36% hasta el 39%, independientemente del método utilizado y el porcentaje de calidad comercial. Guadamuz (2019) asocia a esta independencia entre las variables, como el resultado de la poca diferencia en los valores de luminosidad asociado al color blanco, que pueden llegar a mostrarse en diferentes presentaciones comerciales nacionales del arroz pulido.

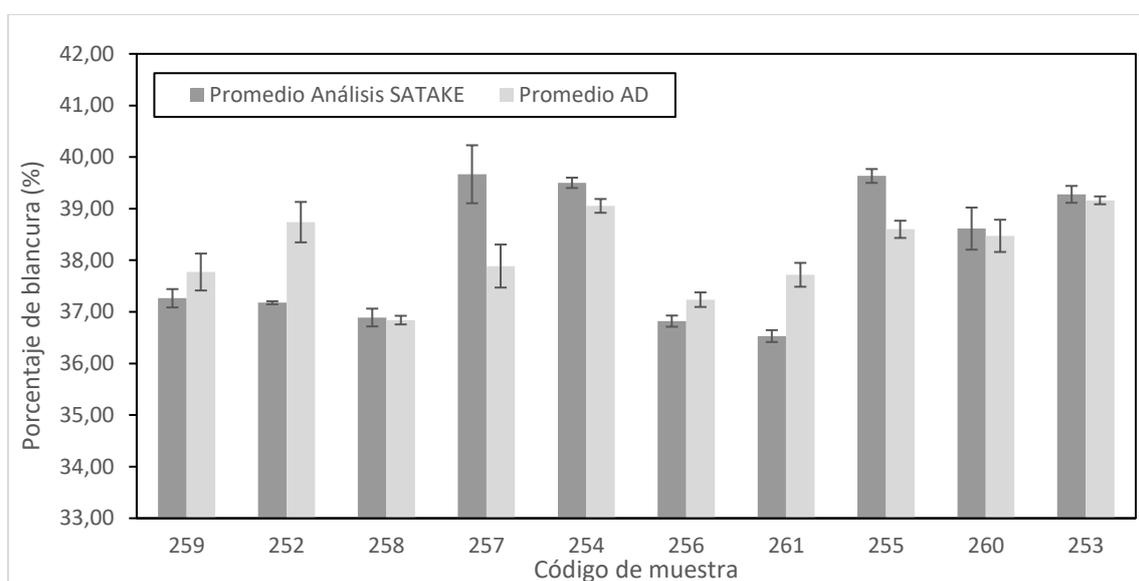


Figura 44. Porcentaje de blancura en grano obtenido en las muestras de arroz pilado por medio del análisis digital y el equipo automático SATAKE. Las barras representan el error estándar de la media.

Omitiendo la poca variación que se obtuvo en el rango de los valores para la característica de blancura, para ambos métodos de análisis, se mostraron en la Figura 44 diferencias significativas entre los promedios de estos, de más de 1,7 pp, en el caso más extremo (unidad 257). Denotando de esta forma, el bajo porcentaje explicativo del modelo de regresión aplicado (Cuadro 13).

Los resultados promedio, obtenidos para la propiedad de transparencia fueron contantes en la mayoría de las unidades muestrales, estos se encontraron en un rango de entre 1,9 y 3% (Figura 45). No obstante, no demostraron tendencia concisa, aunque, la mayoría de los valores promedio más bajos, fueron los obtenidos en las unidades muestrales con calidad comercial de 80% grano entero, en ambos métodos de análisis. Li et al (2018) señalan la ausencia de una correlación directa entre la transparencia y la calidad del grano, en análisis de correlación aplicados a capturas digitales bidimensionales.

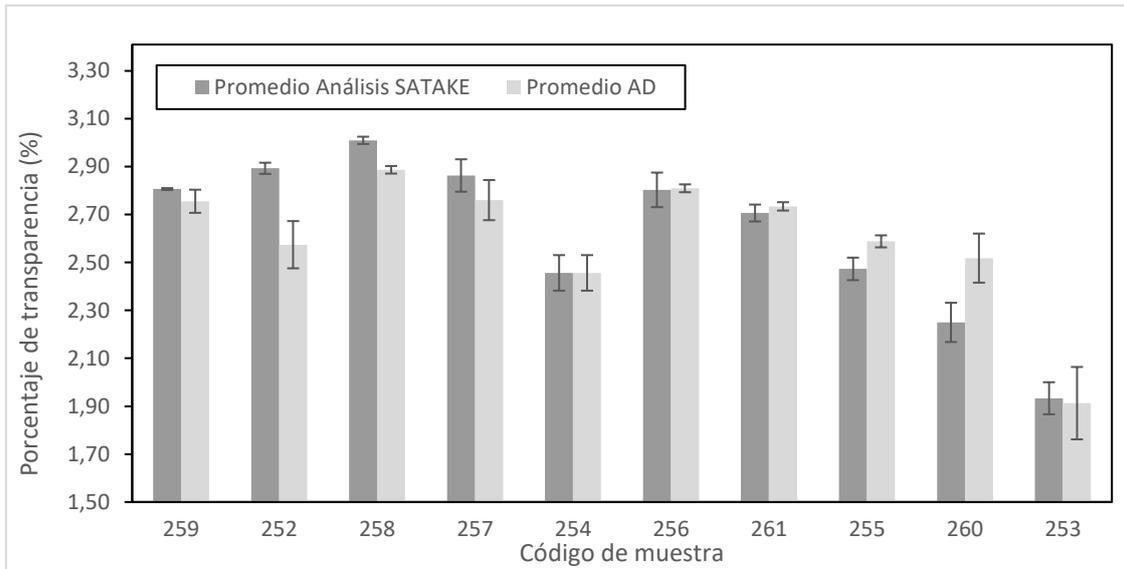


Figura 45. Porcentaje de transparencia en grano obtenido en las muestras de arroz pilado por medio del análisis digital y el equipo automático SATAKE. Las barras representan el error estándar de la media.

A pesar del alto coeficiente de determinación resultante del modelo bivariable, previamente aplicado (0,79 – 0,83), los promedios obtenidos por unidad muestral mostraron diferencias importantes en la mayoría de estas, con hasta 8,5 grados de pulido, para el caso más contrastante entre ambos métodos, la unidad de estudio 257. Caso contrario a lo determinado por Rexi & Devi (2017), en su estudio para cuantificar el grado de pulido en arroz pilado, utilizando el procesamiento de imágenes digitales thresholding, en vez de deconvoluciones por capas componentes. Se muestra en la Figura 46 los valores promedio de grado de pulido, obtenidos a partir del MR (Cuadro 17) y el equipo automático SATAKE MM1D.

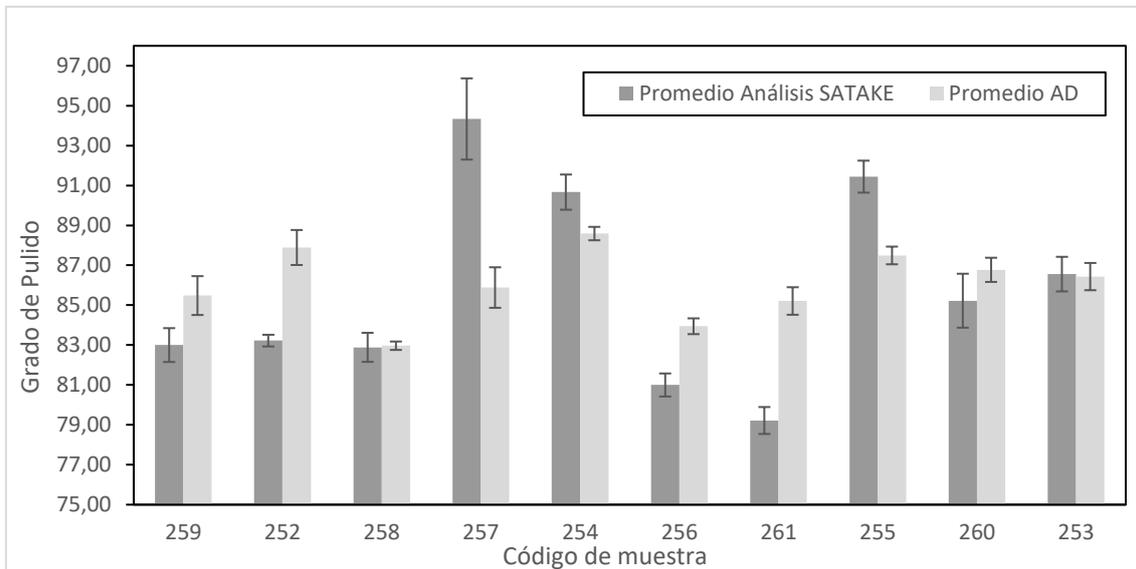


Figura 46. Grado de pulido en grano obtenido en las muestras de arroz pilado por medio del modelo de regresión y el equipo automático SATAKE. Las barras representan el error estándar de la media

Como se pudo observar en la Figura 46, no se mostró una tendencia continua y definida en relación con el porcentaje de calidad, para aquellos valores promedio del grado de pulido que

fueron brindados por el equipo, y los obtenidos del modelo de regresión. Siebenmorgen et al, (2011) y Yadav et al (2001) relacionan la blancura de los granos de arroz con su grado de pulido, al verse ambas propiedades incrementados con el avanzar del proceso industrial de pulido y limpieza. Se observó una gran similitud en la tendencia de los datos gráficos de la Figura 44 y la Figura 46, evidenciando la relación entre ambas propiedades y denotando bajo este modelo de un estudio, la gran influencia de los valores de blancura en el MR aplicado, así como también, la transferencia de su error relacionado.

Los resultados de las pruebas de normalidad Q-Q, aplicados en las variables correspondientes a los dos métodos de análisis (digital y equipo SATAKE) en propiedades de blancura y el modelo de regresión (MR) para el grado de pulido, son mostrados en la Figura 47.

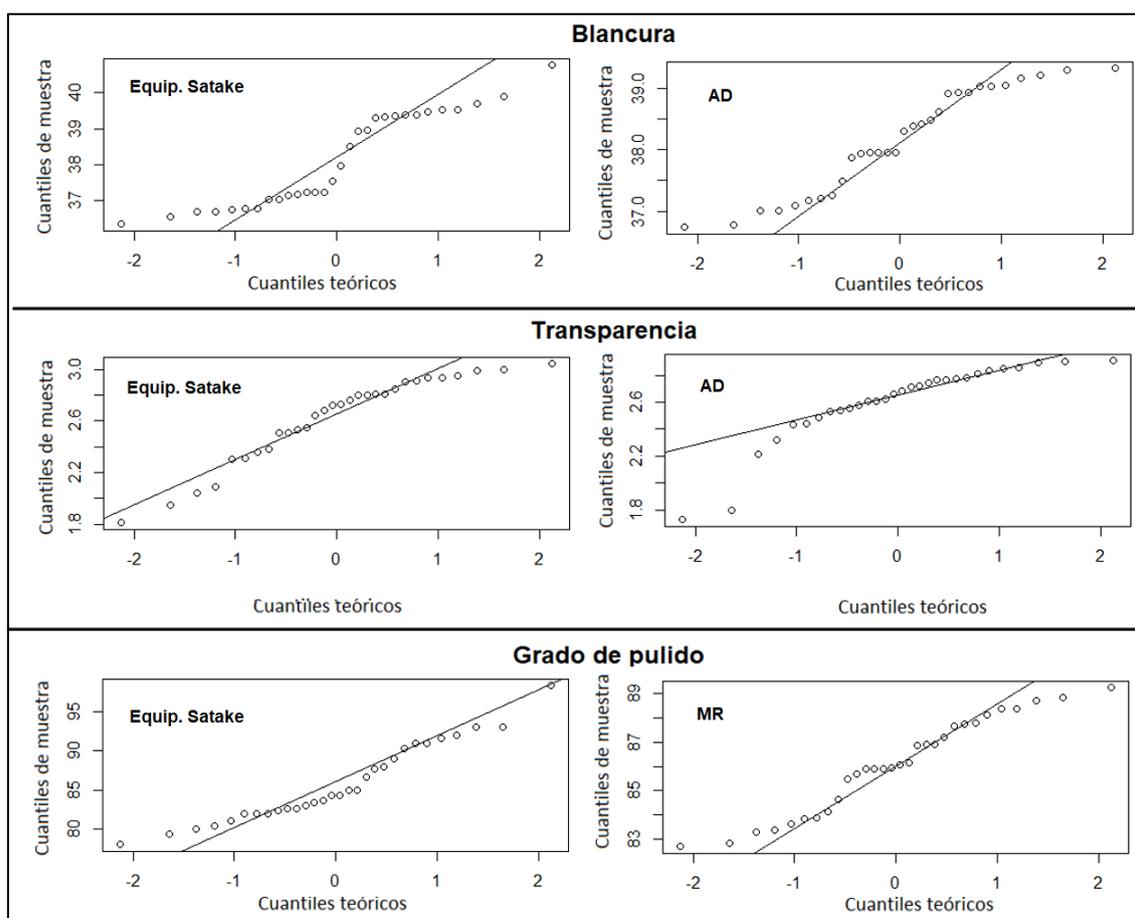


Figura 47. Análisis de normalidad Q-Qplot aplicados en las variables de blancura, para el método digital y el equipo SATAKE.

Para todas las propiedades se obtuvo valores de dispersión extremos, al igual que valores no ajustados a la línea de tendencia. Por su parte, los valores para la propiedad grado de pulido, fueron los que mostraron un mejor ajuste lineal, junto con aquellos obtenidos para la propiedad de transparencia evaluada mediante el equipo SATAKE. Las pruebas de hipótesis Shapiro-Wilk arrojaron p -valores menores a 0,05, en el análisis de la distribución de datos para ambos métodos, correspondiente a las propiedades: blancura y transparencia. Para la propiedad grado de pulido se obtuvieron p -valores mayores 0,05, en ambos métodos de análisis, (Anexo O). Lo cual, indica que no existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis de normalidad en la distribución de datos correspondiente a la propiedad grado de pulido.

Por su parte, las pruebas de correlación entre los resultados obtenidos por los dos métodos de análisis (AD y equipo SATAKE), correspondientes a las propiedades de blancura y transparencia, mostraron coeficientes de correlación relativamente altos. Estos fueron iguales a 0,63 para ambas pruebas de correlación aplicadas en la variable blancura y entre 0,70 a 0,80 para la variable transparencia, en las pruebas de Spearman y Pearson, respectivamente (Anexo P). La distribución de datos obtenidas de las gráficas de correlación para estas variables (Figura 48), muestran una clara dispersión aleatoria y sin una tendencia definida, para las variables de la propiedad blancura. Mientras que, aquellos correspondientes a las variables de la propiedad transparencia, mostraron una clara tendencia creciente y una dispersión cercana a la línea de tendencia, a partir de las repeticiones con porcentaje mayor a 2,5% de transparencia en grano, para ambos métodos de análisis.

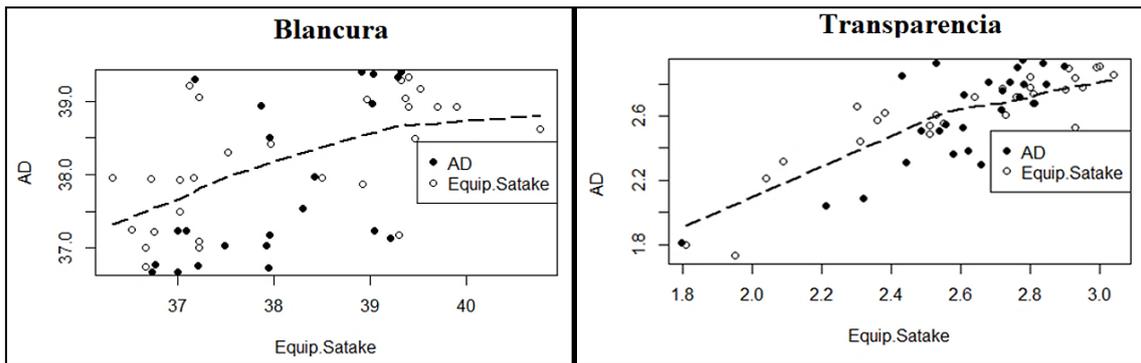


Figura 48. Correlación entre los resultados obtenidos para las variables de blancura y transparencia.

Se muestra en la Figura 49 la correlación entre los datos obtenidos por el equipo automático SATAKE y el modelo de regresión lineal, para el grado de pulido. Ninguna variable mostró un ajuste significativo a la línea de tendencia y su dispersión de valores, tampoco mostró un comportamiento definible, como resultado de una correlación no fuerte entre las variables. El coeficiente para las pruebas de correlación aplicadas a esta propiedad fue de aproximadamente 0,5, denotando una correlación media entre ambos métodos (Anexo Q).

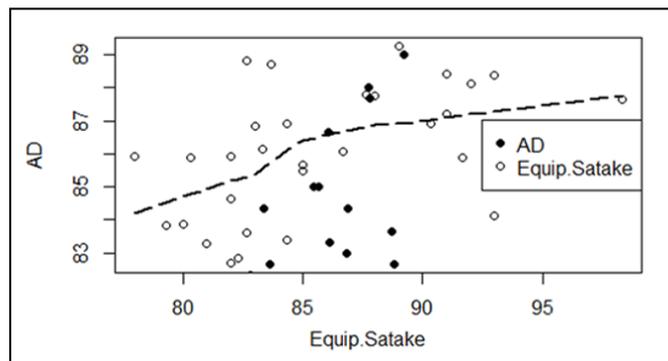


Figura 49. Correlación entre los resultados obtenidos para las variables grado de pulido.

La dispersión irregular de los datos en el análisis de correlación para el grado de pulido (Figura 49), pudo deberse a la baja correlación resultante para las propiedades de transparencia y especialmente para blancura (Figura 48). Al presentarse un amplio grosor en la nube de puntos o diagrama de dispersión, mayor es el margen de variación en el eje Y para los valores en el eje X,

en consecuencia, es menor la correlación entre las variables (Camacho, 2007, Santabárbara, 2019). Al tomarse en este análisis, el grado de pulido como función de los resultados obtenidos en transparencia y blancura, los valores resultantes para esta característica se mostraron estrechamente influenciados por la baja correlación y error acarreado en estas propiedades de interés, especialmente blancura, al comparar los dos métodos de análisis (AD y Equipo SATAKE).

Los resultados de las pruebas de correlación y los análisis gráficos aplicados en la metodología de este trabajo indican una viabilidad positiva para el método digital, haciendo uso de la herramienta deconvolución, para la estimación de transparencia en muestra. Para la propiedad de blancura y posteriormente, el grado de pulido obtenido por el modelo de regresión, el método digital no fue preciso, ni viable, como sistema de detección de calidad, aplicado en las propiedades de blancura en granos de arroz pulido. Esto como consecuencia directa de los bajos porcentajes explicativos, obtenidos en los modelos de regresión desarrollados y aplicados. El proceso de calificación para la calidad del arroz pulido implica la medición de múltiples características de apariencia, lo que involucra un proceso de reconocimiento complicado. Wan et al sugieren en su estudio de análisis digital para la calidad de arroz, el uso de descripciones cuantificables para cada una de las categorías analizadas por el método artificial, con la intención de gestionar la imparcial discrepancia entre los resultados obtenidos por un equipo o sistema y métodos subjetivos de inspección humana.

CONCLUSIONES.

Los métodos de análisis digital que fueron aplicados en el presente trabajo permitieron determinar y cuantificar propiedades dimensionales y de mesa mediante capturas digitales. Utilizando una metodología homogénea y un sistema de placa muestral, se logró analizar muestras conformadas por cientos de granos, en un periodo de tiempo menor al requerido por el análisis tradicional.

Los resultados del trabajo sugieren que los métodos digitales para análisis de calidad pueden cuantificar de forma precisa características en arroz pilado, de grano quebrado, puntilla y en consecuente, grano entero. Estos mostraron una alta viabilidad, con coeficientes de correlación (R^2) en las pruebas estadísticas (Pearson y Spearman) mayores a 0,90 en puntilla y grano quebrado, para el método de análisis por área y peso, destacando este último como el más preciso para ambas propiedades.

Los porcentajes de grano dañado, rojo, yesosos; y contrastante (por omisión) obtenidos digitalmente, no mostraron una alta viabilidad predictora en la metodología de análisis digital, a excepción de la propiedad de grano manchado (con una viabilidad media). Sus coeficientes de correlación resultantes para las pruebas de Spearman (prueba más rigurosa) fueron iguales a 0,340 para grano dañado, 0,446 para grano rojo, 0,741 para grano machado y 0,304 para grano yesoso.

Para el caso de las propiedades de blancura se determinó viabilidad baja para la determinación de la blancura y grado de pulido, con coeficientes de correlación (R^2) para ambas pruebas (Pearson y Spearman), de aproximadamente 0,5 y 0,6, respectivamente. Solo en el caso de la transparencia se obtuvieron coeficiente R^2 relativamente altos (0,75 y 0,85), denotando una viabilidad media al aplicar la metodología digital por deconvolución en la determinación de propiedades de blancura para imágenes digitales de arroz pulido.

RECOMENDACIONES.

Se recomienda realizar la captura digital, para una respectiva unidad muestral, por ambos lados de una placa de análisis, ya que de esta forma es posible abarcar mayor área superficial que podría o no, contener una condición de interés en el estudio y evaluación de calidad aplicado al grano.

Con la finalidad de obtener una interfaz 100% automatizada, es requerido desarrollar una Red Neuronal Artificial, capaz de lograr autocorregir sus resultados. Valiéndose en el proceso, de parámetros dimensionales (área, circunferencia, longitud máxima, entre otros) con muy alta viabilidad de detección y precisión entre los valores resultantes de la aplicación de métodos digitales.

Es preferible realizar los análisis digitales para la propiedad de grano yesoso antes que un análisis manual, si se espera realizar una comprobación entre resultados. Esto con la intención de evitar un aumento en el área detectada, producto del proceso destructivo involucrados en la metodología de análisis manual.

Como sistema ideal para el análisis de calidad automatizado en granos, se recomienda a nivel técnico, una combinación entre métodos de captura digitales en 2D y sistemas de análisis tridimensionales, cómo lo son, los sistemas Micro-CT. Capturadores de alta tecnología, que permiten comprender el volumen de los objetos e irregularidades en estos.

Asimismo, se recomienda realizar pruebas para la obtención de propiedades de blancura utilizando como técnica principal la herramienta thresholding, junto con propiedades dimensionales como el área, circularidad, longitud máxima del gran (feret), entre otras.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta, C., Sampallo, G., Cleva, L., Cleva, D., & Liska, M. (2017). Detección e identificación de defectos en granos de arroz empleando visión artificial. *IX Congreso Argentino de AgroInformática* (págs. 98-111). Córdoba: Sociedad Argentina de Informática e Investigación Operativa.

Alfaro, L., García, M., & Puras, A. (2001). Obtención de Imágenes Digitales. En *Manual de Telepatología* (págs. 17-33). Pamplona: Sociedad Española de Anatomía Patológica.

Antonucci, F., Pallottino, C., Costa, C., Gazza, S., Bellato, S., & Menesatti, P. (2014). A flexible laboratory scale and image analysis-based equipment to assess rice quality classes. *La Rivista di Scienza dell'Alimentazione*, 43(1), 37-47.

Arroyo, N., Lücke, R., & Rivera, L. (2013). Análisis sobre el mecanismo actual para la estimación y determinación de los precios del arroz bajo el contexto de la cadena de comercialización. Informe Final. (I. d. Económicas, Ed.) San José: Universidad de Costa Rica.

Astorga, J. (2014). Aplicación de modelos de regresión lineal para determinar las armónicas de tensión y corriente. *Ingeniería Energética*, 35(3), 234-241. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012014000300008&lng=es&tlng=es

Avila, M., Graterol, E., Alezones, J., Criollo, B., Castillo, D., Kuri, V., Oviedo, N., Moquete, C., Romero, M., Margie, Z., Taylor, M. (2012). Concordancia entre analistas de laboratorios de Latinoamérica para la determinación de la apariencia de grano de arroz pulido mediante el uso de imágenes digitales. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 62(2), 179-184. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/236274949_Concordancia_entre_analistas_de_laboratorios_de_latinoamerica_para_la_determinacion_de_la_apariencia_de_grano_de_arroz_pulido_mediante_el_uso_de_imagenes_digitales

Bäcker, V., & Travo, P. (2006). MRI Cell Image Analyzer—A visual scripting interface for ImageJ and its usage at the microscopy facility Montpellier RIO Imaging. *ImageJ User and Developer Conference*, (págs. 105-110). France. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/237674701_MRI_Cell_Image_Analyzer--A_visual_scripting_interface_for_ImageJ_and_its_usage_at_the_microscopy_facility_Montpellier RIO Imaging

Barbin, D., Mastelini, S., Barbon, S., Campos, G., Barbon, A., & Shimokomaki, M. (2016). Digital image analyses as an alternative tool for chicken quality assessment. *Biosystems Engineering*, 144(16), 85-93. doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.01.015.

Brosnan, T., & Sun, D. (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. *Journal of Food Engineering*, 61(1), 3-16. doi:10.1016/s0260-8774(03)00183-3

Camacho, C. (2007). Análisis de Datos en Psicología. *Correlación lineal de Pearson*. España: Universidad de Sevilla. Obtenido de <https://personal.us.es/vararey/master/>

Campa, V. (2017). Analisis de imagenes de microscopia con imagej. Santander: Createspace independiente. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/313768335_Analisis_de_Imagenes_de_Microscopia_con_ImageJ

Campos, A. (2011). Transferencia de información hidrológica mediante regresión lineal múltiple, con selección óptima de regresores. *Agrociencia*, 45(8), 863-880. Obtenido de [https://revistaselectronicas.ujaen.es/index.php/ininv/article/view/259](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?Castillo, S., & Lozano, E. (2007). Q-Q Plot Normal. Los puntos de posición gráfica. Iniciación a La Investigación, N°2. Obtenido de <a href=)

Cerdas, D. (2018). Informe: Verificación de mercado calidad del arroz pilado (DCAL-DVM-INF-029-18). MEIC, Verificación de Mercado. San José: Gobierno de Costa Rica.
CGIAR Research program on rice. (2017). Importance of rice. Recuperado el junio de 2020, de <https://ricecrp.org/importance-of-rice/>

Champagne, E. T., Bett-Garber, K. L., Fitzgerald, M. A., Grimm, C. C., Lea, J., Ohtsubo, K., Jongdee, S., Xie, L., Bassinello, P. Z., Resurreccion, A., Ahmad, R., Habibi, F., & Reinke, R. (2010). Important Sensory Properties Differentiating Premium Rice Varieties. *Rice*, 3, 270–281. doi: 10.1007/s12284-010-9057-4

Chen, Y., Yu, Q., & Xu, C. (2017). A convenient method for quantifying collagen fibers. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 10(10), 14904-14910.

CONARROZ. (2020). Informe anual estadístico 2019/2020. Centro Estadístico Arrocerero. Obtenido de https://www.conarroz.com/userfile/file/INFORME_ANUAL_ESTADISTICO_PERIODO_2019_2020.pdf

Decreto N° 26901, M. (1998). Arroz pilado. Especificaciones y métodos de análisis. *RTCR 202:1998. Arroz pilado. Especificaciones y métodos de análisis*, 1-10. San José.

Devi, G., Neelamegam, P., & Sudha, S. (2017). Machine Vision based Quality Analysis of Rice Grains. *International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering*. Chennai: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

FAO. (2015). Panorama de la Seguridad Alimentaria y Nutricional en Centroamérica y República Dominicana 2014. Obtenido de www.fao.org/publications: <http://www.fao.org/3/a-i4349s.pdf>

FAO. (2018a). Seguimiento del Mercado del Arroz de la FAO (SMA). Recuperado el junio de 2021, de <http://www.fao.org/economic/RMM/es>

FAO. (2018b). World Food and Agriculture Statistical Pocketbook 2018. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2021). FAOSTAT. Recuperado el junio de 2021, de <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>

FAO, PRESANCA, & PRESISAN. (2013). *Centroamérica en Cifras Datos de Seguridad Alimentaria Nutricional 2013*. FAO. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-at771s.pdf>

Fasabi, C. (2019). Agroindustrialización del arroz (*Oryza Sativa L.*) en la Empresa Agroindustrias San Hilarión S.A. (Trabajo para optar por el Titulo Profesional). Peru: Universidad Nacional de San Martin. 70

Ghatkamble, R., & Vishwanatha, K. (2017). Development of novel algorithm to Determine the rice varieties using digital image processing. *1ST International Conference Responsible Business and Sustainable Development*. Bangalore.

Gomez, I. (2018). Elaboración de un prototipo para la toma y análisis automático de imágenes para evaluar el proceso de germinación en semillas de frijol (*Phaseolus vulgaris*). (Trabajo Final de Graduación para Licenciatura). San José: Universidad de Costa Rica.

Guadamuz, C. (2019). Estudio de las principales propiedades físico-químicas y sensoriales que influyen sobre la calidad del grano cocido de diferentes variedades de arroz (*Oryza sativa*) utilizando un método de cocción determinado. (Proyecto de graduación para licenciatura). San José: Universidad de Costa Rica.

Gudipalli, A., Prabha, A., & Reddy, P. (2016). A review on analysis and grading of rice using image processing. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 11. 23. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(23).

Herath, K. (2016). Rice grains classification using image processing technics. Sri Lanka: The Open University of Sri Lanka. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/311373270_RICE_GRAINS_CLASSIFICATION_USING_IMAGE_PROCESSING_TECHNICS

Herath, K. (2017). Image processing analysis for the rice grain quality in Sri Lanka. *The Official E-Newsletter of the Institution of IESL*, 33.

Hernández, J., Espinosa, J., Peñaloza, E., Rodriguez, J., Chacón, J., Toloza, C., Arenas, M., Carrillo, S., Bermúdez, V. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5), 587-595.

Huérffano, Y., Vera, M., Del Mar, A., Vera, M., Salazar, W., Chacón, J., Wilches-Duran, S., Graterol-Rivas, M., Torres, M., Arias, V., Rojas, J., Prieto, C., Sigüencia, W., Angarita, L., Ortiz, R., Rojas-Gomez, D., Garicano, C., Chacín, M., Contreras-Velásquez, J., Bermúdez, V., Bravo, A. (2015). Segmentación computacional de la aurícula derecha en imágenes de tomografía cardíaca. *Revista Latinoamericana de Hipertensión*, 10(4), 79-84.

INEC. (2019). Agropecuario 06 Costa Rica: Área sembrada de arroz y producción según región y cantón, por período agrícola 2016/2017 - 2018/2019. Anuario Estadístico - Agropecuario, San José: INEC.CR. Obtenido de https://www.inec.cr/anuario-estadistico/anuario-estadistico-agropecuario?keys=arroz&shs_term_node_tid_depth=All&field_periodo_tid=All&field_anio_documento_value%5Bvalue%5D%5Bdate%5D=

Kongsawat, P., Chivapreecha, S., & Sato, T. (2018). Quality assessment of thai rice kernels using low cost digital image processing system. *2018 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT)* (págs. 1-4). Thailand: Institute of Electrical and Electronics Engineers. doi:10.1109/IWAIT.2018.8369806

Kumbharkar, P., Upale, P., Deepali, Saste, M., & Padwal, A. (2016). Application for Rice Quality Assessment and Classification Using Image Processing Technique. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 4(10), 19030-19037

- Lapcharoensuk, R., & Sirisomboon, P. (2015). Alternative method for measurement of whiteness and transparency of rice using mathematical model of color values. *The 8th TSAE International Conference(TSAE 2015) and The 16th TSAE National Conference* (págs. 142-145). Bangkok : TSAE.
- Li, Q.-F., Huang, L.-C., Chu, R., Li, J., Jiang, M.-Y., Zhang, C.-Q., Fan, X.-L., Yu, H.-X., Gu, M.-H., & Liu, Q.-Q. (2018). Down-regulation of SSSII-2 gene expression results in novel low-amylose rice with soft, transparent grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(37), 9750–9760.
- Li, X., Yuan, J., Gu, T., & Liu, X. (2009). Level detection of raisins based on image analysis and neural network. In *The Sixth International Symposium on Neural Network. The Sixth International Symposium on Neural Networks*. Berlin: Springer.
- Mahale, B., & Korde, S. (2014). Rice Quality Analysis Using Image Processing Techniques. *International Conference for Convergence of Technology 2014* (págs. 1-5). Pune: IEEE.
- Mendenhall, W., Beaver, R., & Beaver, B. (2010). *Introducción a la probabilidad* (13a ed.). Australia: Cengage Learning.
- Mishra, P., Singh, U., Pandey, C., Mishra, P., & Pandey, G. (2019). Application of student's t-test. analysis of variance. and covariance. *Annals of Cardiac Anaesthesia.*, 22(4), 407-411. doi:10.4103/aca.ACA_94_19
- Mohd Ali, M., Hashim, N., Abd Aziz, S., & Lasekan, O. (2020). Principles and recent advances in electronic nose for quality inspection of agricultural and food products. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 1-10. doi:10.1016/j.tifs.2020.02.028
- Morales, C. (2008). Clasificación de calidad sensorial de papas fritas tipo chips mediante visión computacional. (Trabajo de grado). Santiago, Chile: Universidad Chile.
- Morera, A. (2018). Introducción a los modelos de redes neuronales artificiales. El Perceptrón simple y multicapa. (Tesis de grado). Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Mousavirad, S., Akhlaghian, F., & Mollazade, K. (2012). Design of an Expert System for Rice Kernel. *International Journal of Applied Information Systems Identification using Optimal Morphological Features and Back Propagation Neural Network*, 3(2).
- Oconitrillo, Y. (2020). La comercialización a nivel nacional del café certificado: análisis del proceso y mercadeo de CoopeAtenas R.l en el periodo 2013-2018. (Trabajo Final de Graduación para Licenciatura). Heredia, Costa Rica: Universidad Nacional.
- Oladimeji, Y., Abdulsalam, Z., & Ayandotun, B. (2018). Profitability and energy gaps of semi-mechanised and traditional rice production technologies in north central and north western Nigeria. *Agricultural Engineering International*, 20(2), 116–125.
- Ortiz , A., & Ojeda, M. (2006). Evaluación de la calidad molinera y dimensiones de los granos de dos variedades de arroz y sus varietales de arroz maleza. *Agronomía Tropical*, 56(3), 345-368. Obtenido de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2006000300003&lng=es&tlng=es.
- Ortiz, F. (2005). Determinación de la calidad molinera de 4 variedades comerciales de arroz (*Oryza sativa L.*) en las zonas arroceras del país. (Trabajo Final de Graduación para Licenciatura). Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_2214.pdf

Parada, Á., & Chacón, W. (2005). Elementos teóricos y metodológicos para el análisis de la competitividad en empresa, *sectores productivos y países.*, 25, 34, 31-51. ABRA. Obtenido de <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/abra/article/view/4193/4034>
Petrou, M., & Petrou, C. (2010). *Image Processing The Fundamentals*, Second edition. United Kingdom: John Wiley & Sons.

Raji, A., & Alamutu, A. (2005). Prospects of Computer Vision Automated Sorting Systems in Agricultural Process Operations in Nigeria. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, 7, 1-12.

Rexce, J., & Devi, U. (2017). Classification of Milled Rice Using Image Processing. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(2), 10-14. Obtenido de <https://www.ijser.org/researchpaper/Classification-of-Milled-Rice-Using-Image-Processing.pdf>

Rojas, S. (2012). Evaluación de la calidad del arroz en granza (*Oryza sativa*) almacenado en silo de compañía arrocera industrial Planta Industrial Rio Claro (Trabajo Final de Graduación para Licenciatura). San José: Universidad de Costa Rica.

Sadeghi, M., Nasrnia, E., Masoumi, A., & Hemmat, A. (2013). Head rice yield response to low and high drying and tempering conditions. *International Agrophysics*, 27(2), 219–223. doi: 10.2478/v10247-012-0088-5

Saha, D., & Manickavasagan, A. (2021). Machine learning techniques for analysis of hyperspectral images to. *Current Research in Food Science*, 4, 28-44. doi: 10.1016/j.crfs.2021.01.002

Salas, K., Madriz, C., Sánchez, O., Sánchez, M., & Hernández, J. (2017). Modelos de Cuantificación de Error Humano aplicados en la Industria de Manufactura Moderna. *Revista Tecnología en Marcha*, 30, 58-66.

Sampallo, G., Acosta, C., Cleva, M., & Gonzales, T. (2013). Determinación de las características de aspecto de granos de arroz pulidos empleando procesamiento de imágenes. *V Congreso Argentino de AgrolInformática (CAI) - JAIIO 42* (págs. 172-186). Chaco: Sociedad Argentina de Informática e Investigación Operativa. Obtenido de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/93579>

Santabárbara, J. (2019). Cálculo del intervalo de confianza para los coeficientes de correlación mediante sintaxis en SPSS. *Revista d'innovació i recerca en educació*, 12(2), 1-14. doi: 10.1344/reire2019.12.228245

SATAKE. (2019). *Satake Group*. Obtenido de <https://satake-group.com/>. Obtenido de https://satake-group.com/products/analytical_equipment/test_milling_equipment/000208.html

Siddagangappa, M., & Kulkarni, A. (2014). Classification and Quality Analysis of Food Grains. *IOSR Journal of Computer Engineering*, 16(4), 01-10.

Siebenmorgen, T., Counce, P., & Charles, W. (2011). *Factors affecting rice milling quality*. Arkansas, USA: University of Arkansas Cooperative Extension Service Printing Services.

- Silva, C., & Sonnadara, U. (2013). Classification of Rice Grains Using Neural Networks. *Proceedings of Technical Sessions* (págs. 9-14). Sri Lanka: Institute of Physics.
- Silwal, A., Gongal, A., & Karkee, M. (2014). Identification of red apples in field environment with over the row machine vision system. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, 16(4), 66-75. Obtenido de <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/3006/1968>
- Singh, S., Vidyarthi, S., & Tiwari, R. (2019). Machine learnt image processing to predict weight and size of rice kernels. *bioRxiv*. doi:10.1101/743427
- Solano, P. (2018). Estimación de pesos a partir de fotografías digitales de preparaciones de alimentos ofrecidos por establecimientos comerciales en el distrito de San Pedro de Montes de Oca, 2016. (Trabajo Final de Graduación para Licenciatura). San José: Universidad de Costa Rica.
- Stallard (Voelker), M., MacKenzie, C., & Peters, F. (2018). A probabilistic model to estimate visual inspection error for metalcastings given different training and judgment types, environmental and human factors, and percent of defects. *Journal of Manufacturing Systems*, 97-106. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.07.002>
- Su, Y., & Xiao, L. (2020). 3D Visualization and Volume-Based Quantification of Rice Chalkiness In Vivo by Using High Resolution Micro-CT. *Rice*, 13(69), 1-12. doi: 0.1186/s12284-020-00429-w
- Tarlak, F., Ozdemir, M., & Melikoglu, M. (2016). Computer vision system approach in colour measurements of foods: Part I. development of methodology. *Food Science and Technology*, 36(2), 382–388. doi:10.1590/1678-457X.11615
- Vargas, R., & Gutiérrez, A. (2019). *Valuación de Costos de la Industrialización de Arroz Pilado*. Dirección de Investigaciones y de Mercado. San José: MEIC.
- Vera, M., Huérfano, Y., Contreras, J., Vera, M., Salazar, W., Vargas, S., Chacón, G., & Rodríguez, J. (2017). Desarrollo de una técnica computacional. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 36(6), 168-173. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=55954943007>
- Verbeek, M. (2017). Using linear regression to establish empirical relationships. *IZA world of labor: evidence-based policy making*(336). Bonn: Institute for the Study of Labor (IZA). doi: 10.15185/izawol.336
- Vicerrectoria de Investigación UCR. (2018). Manual para la determinación de costos de la Vicerrectoria de Investigación. Montes de Oca, Costa Rica: UCR.
- Wan, Y., Lin, C., & Chiou, J. (2002). Rice quality classification using an automatic grain quality inspection system. *Transactions of the ASAE*, 45(2), 379-387. doi: 10.13031/2013.8509
- Wang, D., Dowell, F., Lan, Y., Pasikatan, M., & Maghirang, E. (2002). Determining pecky rice kernels using visible and near-infrared spectroscopy. *International journal of food properties*, 5(3), 629–639. doi.org/10.1081/JFP-120015497
- Xie, Q., Xu, J., Huang, K., Su, Y., Tong, J., Huang, Z., Huang, C., Wei, M., Lin, W., & Xiao, L. (2021). Dynamic formation and transcriptional regulation mediated by phytohormones during chalkiness formation in rice. *BMC Plant Biology*, 21(1), 308. doi: 10.1186/s12870-021-03109-z

Yadav, B., & Jindal, V. (2001). Monitoring milling quality of rice by image analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 33, 19-33.

Zareiforous, H., Minaei, S., Reza, M., & Banakar, A. (2016). Qualitative classification of milled rice grains using computer vision and metaheuristic techniques. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 118-131.

Zhang, J., Tian, Y., Yan, L., Wang, B., Wang, L., Xu, J., & Wu, K. (2021). Diagnosing the symptoms of sheath blight disease. *Biosystems Engineering*, 209, 94-105.

Zheleznyak, A., & Sidorov, G. (2015). Flatbed scanner as an instrument for physical studies. *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*, 2(1), 134-141. doi: 10.1016/j.spjpm.2015.04.001

Zuluaga, A. (2014). Laboratorio de calidad de arroz del Fondo Latinoamericano para Arroz de Riego (FLAR). (práctica profesional). Colombia: Universidad San Buenaventura Cali. Obtenido de http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/4261/4/laboratorio_calidad_arroz_zuluaga_2014.pdf

ANEXOS

Anexo A. Resultados totales del análisis digital por área para grano entero, quebrado y puntilla.

Porcentaje de Calidad	Código de Muestra	Código Marca	Repetición	Área total (mm ²)	Área Entero (mm ²)	Grano entero (%)	Área Quebrado Grueso (mm ²)	Grano quebrado (%)	Puntilla (%)
99	259	A	R1	72691,760	71952,300	98,983	708,309	0,974	0,043
			R2	72784,900	71961,930	98,869	777,006	1,068	0,063
			R3	72930,450	72256,010	99,075	658,376	0,903	0,022
99	252	B	R1	71555,580	70818,290	98,970	699,769	0,978	0,052
			R2	72009,740	71364,500	99,104	566,784	0,787	0,109
			R3	72346,060	71595,910	98,963	722,176	0,998	0,039
99	258	C	R1	71600,660	70973,620	99,124	582,382	0,813	0,062
			R2	71303,040	70998,390	99,573	275,115	0,386	0,035
			R3	70629,590	69840,630	98,883	711,159	1,007	0,110
95	257	D	R1	71173,920	68928,440	96,845	2080,246	2,923	0,232
			R2	72521,450	70978,830	97,873	1409,302	1,943	0,184
			R3	70849,280	68533,730	96,732	2131,653	3,009	0,260
95	254	C	R1	71162,720	69113,660	97,121	1969,925	2,768	0,105
			R2	69563,840	67465,370	96,983	1993,367	2,866	0,151
			R3	71818,530	69557,840	96,852	2169,623	3,021	0,121
91	256	C	R1	71476,840	67102,030	93,879	4042,614	5,656	0,465
			R2	72184,760	67899,150	94,063	3965,837	5,494	0,423
			R3	72779,730	68488,320	94,104	3823,413	5,253	0,631
91	261	A	R1	72724,860	67813,100	93,246	4479,644	6,160	0,581
			R2	72855,000	68193,880	93,602	4300,705	5,903	0,475
			R3	72769,470	67466,140	92,712	4846,723	6,660	0,627
80	255	E	R1	72474,030	60716,940	83,778	10361,460	14,297	1,907
			R2	72269,090	61482,990	85,075	9647,261	13,349	1,543
			R3	72811,920	60924,650	83,674	10514,340	14,440	1,845
80	260	C	R1	71171,210	59985,590	84,284	10717,490	15,059	0,636
			R2	72692,450	60736,810	83,553	11576,530	15,925	0,522
			R3	72152,770	61735,910	85,563	10036,290	13,910	0,512
80	253	A	R1	74296,670	60957,350	82,046	12124,810	16,319	1,623
			R2	76388,390	60591,670	79,321	14044,970	18,386	2,251
			R3	75157,320	64015,630	85,176	9966,734	13,261	1,563

Anexo B. Resultados totales del análisis digital por peso para grano entero, quebrado y puntilla.

Código de Muestra	Porcentaje de Calidad	Código Marca	Repetición	Grano Entero (g)	Grano Quebrado Grueso (g)	Grano quebrado (%)	Grano quebrado Corrección Regresión Polinomial (%)	Puntilla (g)	Puntilla (%)	Puntilla Corrección Regresión Polinomial (%)
259	99	A	R1	111,688	1,168	1,03	1,02	0,065	0,06	0,02
	99		R2	111,220	1,254	1,11	1,12	0,141	0,13	0,08
	99		R3	112,183	1,062	0,94	0,91	0,047	0,04	0,01
252	99	B	R1	110,972	1,128	1,01	0,99	0,123	0,11	0,06
	99		R2	108,410	0,931	0,85	0,80	0,194	0,18	0,12
	99		R3	110,640	1,135	1,02	1,00	0,081	0,07	0,03
258	99	C	R1	108,560	0,928	0,85	0,80	0,092	0,08	0,04
	99		R2	110,506	0,456	0,41	0,28	0,057	0,05	0,02
	99		R3	108,201	1,169	1,07	1,06	0,158	0,14	0,09
257	95	D	R1	107,859	3,458	3,09	3,33	0,417	0,37	0,28
	95		R2	101,156	2,113	2,04	2,18	0,350	0,34	0,23
	95		R3	108,008	3,509	3,13	3,37	0,510	0,46	0,35
254	95	C	R1	98,258	2,958	2,92	3,14	0,172	0,17	0,10
	95		R2	98,410	3,064	3,01	3,24	0,284	0,28	0,18
	95		R3	100,314	3,367	3,24	3,49	0,220	0,21	0,13
256	91	C	R1	104,313	6,537	5,86	6,11	0,776	0,70	0,55
	91		R2	104,864	6,498	5,80	6,06	0,714	0,64	0,50
	91		R3	105,047	6,134	5,47	5,74	1,051	0,94	0,76
261	91	A	R1	101,247	7,347	6,71	6,92	0,924	0,84	0,66
	91		R2	101,580	7,062	6,45	6,68	0,842	0,77	0,60
	91		R3	100,649	7,935	7,24	7,42	0,972	0,89	0,70
255	80	E	R1	90,771	17,241	15,53	14,96	3,020	2,72	2,44
	80		R2	91,747	15,935	14,46	13,94	2,529	2,29	2,00
	80		R3	90,178	17,426	15,77	15,20	2,924	2,65	2,36
260	80	C	R1	92,460	16,742	15,20	14,64	0,955	0,87	0,69
	80		R2	87,850	17,627	16,58	16,01	0,848	0,80	0,61
	80		R3	92,936	15,301	14,03	13,54	0,789	0,72	0,56
253	80	A	R1	89,721	19,395	17,38	16,83	2,504	2,24	1,98
	80		R2	89,075	23,264	20,05	19,81	3,718	3,20	3,11
	80		R3	94,106	16,395	14,47	13,95	2,811	2,48	2,25

Anexo C. Resultados totales de las propiedades de blancura en grano pulido mediante el método digital.

Código de Muestra	Porc. de Calidad	Repetición	Componente Roja (%)	Componente Verde (%)	Componente Azul (%)	Componente Roja REAL (%)	Componente Verde REAL (%)	Componente Azul REAL (%)	Blancura (%)	Transp. (%)	Grado de Pulido
259	99	R1	3,385	38,605	49,899	3,278	38,245	21,231	38,30	2,68	86,90
	99	R2	2,881	33,889	49,759	2,774	33,529	21,371	37,93	2,74	85,94
	99	R3	2,823	33,775	50,274	2,716	33,415	20,856	37,09	2,85	83,61
252	99	R1	2,702	33,927	49,768	2,595	33,567	21,362	37,96	2,76	86,14
	99	R2	4,286	44,136	49,826	4,179	43,776	21,304	39,05	2,53	88,71
	99	R3	5,402	51,027	50,209	5,295	50,667	20,921	39,21	2,43	88,83
258	99	R1	2,355	30,087	50,190	2,248	29,727	20,940	36,78	2,91	82,84
	99	R2	2,512	29,969	50,015	2,405	29,609	21,115	37,01	2,86	83,38
	99	R3	2,327	28,772	50,095	2,220	28,412	21,035	36,74	2,90	82,68
257	95	R1	2,580	32,656	49,726	2,473	32,296	21,404	37,87	2,78	85,88
	95	R2	4,061	43,880	50,096	3,954	43,520	21,034	38,62	2,61	87,65
	95	R3	2,080	29,924	49,966	1,973	29,564	21,164	37,18	2,90	84,13
254	95	R1	4,150	43,449	49,861	4,043	43,089	21,269	38,92	2,56	88,40
	95	R2	5,001	48,191	49,933	4,894	47,831	21,197	39,32	2,44	89,24
	95	R3	4,869	46,460	50,035	4,762	46,100	21,095	38,92	2,49	88,13
256	91	R1	2,752	31,247	50,102	2,645	30,887	21,028	37,00	2,84	83,29
	91	R2	2,882	32,938	50,110	2,775	32,578	21,020	37,22	2,81	83,89
	91	R3	2,637	29,850	49,688	2,530	29,490	21,442	37,49	2,78	84,65
261	91	R1	3,285	36,884	49,965	3,178	36,524	21,165	37,95	2,72	85,91
	91	R2	3,139	35,332	49,847	3,032	34,972	21,283	37,94	2,72	85,89
	91	R3	3,265	34,284	50,157	3,158	33,924	20,973	37,25	2,77	83,83
255	80	R1	4,212	42,891	49,793	4,105	42,531	21,337	38,93	2,54	88,37
	80	R2	3,955	41,366	50,023	3,848	41,006	21,107	38,38	2,62	86,92
	80	R3	3,889	40,168	49,857	3,782	39,808	21,273	38,49	2,60	87,19
260	80	R1	4,257	41,620	49,980	4,150	41,260	21,150	38,42	2,58	86,86
	80	R2	5,885	45,602	49,742	5,778	45,242	21,388	39,04	2,32	87,78
	80	R3	3,937	40,159	50,175	3,830	39,799	20,955	37,96	2,66	85,68
253	80	R1	6,728	48,129	49,776	6,621	47,769	21,354	39,17	2,21	87,76
	80	R2	10,063	51,849	49,741	9,956	51,489	21,389	39,03	1,80	85,48
	80	R3	10,800	57,744	50,023	10,693	57,384	21,107	39,29	1,73	86,06
PLACA	-	R1	0.107	0.360	71.130						

Anexo D. Resultados totales de las propiedades de blancura obtenidas en grano pulido mediante el equipo Satake MM1D.

Código de Muestra	Porcentaje de Calidad	Código Marca	Repetición	Blancura (%)	Transparencia (%)	Grado de Pulido
259	99	A	R1	36,77	3,00	82,33
	99		R2	37,23	3,04	84,33
	99		R3	36,67	2,99	82,00
252	99	B	R1	37,53	2,81	84,33
	99		R2	37,03	2,81	82,00
	99		R3	37,23	2,80	82,67
258	99	C	R1	37,17	2,90	83,33
	99		R2	37,23	2,93	83,67
	99		R3	37,13	2,85	82,67
257	95	D	R1	38,93	2,95	91,67
	95		R2	40,77	2,73	98,33
	95		R3	39,30	2,91	93,00
254	95	C	R1	39,40	2,55	91,00
	95		R2	39,40	2,31	89,00
	95		R3	39,70	2,51	92,00
256	91	C	R1	36,33	2,64	78,00
	91		R2	36,73	2,76	80,33
	91		R3	36,53	2,72	79,33
261	91	A	R1	36,67	2,93	81,00
	91		R2	33,77	2,68	80,00
	91		R3	37,03	2,80	82,00
255	80	E	R1	39,90	2,51	93,00
	80		R2	39,53	2,38	90,33
	80		R3	39,47	2,53	91,00
260	80	C	R1	37,97	2,36	83,00
	80		R2	39,37	2,09	87,67
	80		R3	38,50	2,30	85,00
253	80	A	R1	39,53	2,04	88,00
	80		R2	38,97	1,81	85,00
	80		R3	39,33	1,95	86,67

Anexo E. Resultados del estadístico de prueba Shapiro-Wilk para las variables de puntilla.

Método de análisis	w	p-value
AT	0,757	1,172x10 ⁻⁵
AD por área	0,770	1,978x10 ⁻⁵
AD por peso	0,778	2,656x10 ⁻⁵

Anexo F. Análisis de correlación entre los resultados obtenidos para puntilla mediante análisis tradicional y análisis digital por área.

Correlación de Pearson	Correlación de Spearman
t = 24,508; 28 g.l	S = 248,06
p-value = 2,2x10 ⁻¹⁶	p-value = 4,238x10 ⁻¹⁵
cor = 0,977476	rho = 0,9448153

Anexo G. Análisis de correlación entre los resultados obtenidos para puntilla mediante análisis tradicional y análisis digital por peso.

Correlación de Pearson	Correlación de Spearman
t = 31,401; 28 g.l	S = 292,06
p-value = $2,2 \times 10^{-16}$	p-value = $3,924 \times 10^{-14}$
cor = 0,9860968	rho = 0,9350245

Anexo H. Resultados de la prueba ANOVA para la variable de puntilla.

	g.l	Suma Cuad	Cuad Medio	F-value	Pr(>F)
Tipo de análisis	2	0,08	0,0410	0,076	0,927
Residuales	87	46,85	0,5385		

Anexo I. Resultados del estadístico de prueba Shapiro-Wilk para las variables de grano quebrado.

Método de análisis	w	p-value
AT	0,844	$4,743 \times 10^{-4}$
AD por área	0,770	$2,028 \times 10^{-4}$
AD por peso	0,778	$5,694 \times 10^{-4}$

Anexo J. Análisis de correlación entre los resultados obtenidos para grano quebrado mediante análisis tradicional y análisis digital por área.

Correlación de Pearson	Correlación de Spearman
t = 72,154; 28 g.l	S = 50
p-value = $2,2 \times 10^{-16}$	p-value = $2,2 \times 10^{-16}$
cor = 0,9973217	rho = 0,9888765

Anexo K. Análisis de correlación entre los resultados obtenidos para grano quebrado mediante análisis tradicional y análisis digital por peso.

Correlación de Pearson	Correlación de Spearman
t = 109,13; 28 g.l	S = 56
p-value = $2,2 \times 10^{-16}$	p-value = $2,2 \times 10^{-16}$
cor = 0,9988265	rho = 0,9875417

Anexo L. Resultados de la prueba ANOVA para la variable de grano quebrado.

	g.l	Suma Cuad	Cuad Medio	F-value	Pr(>F)
Tipo de análisis	2	2	1,09	0,029	0,971
Residuales	87	3244	37,29		

Anexo M. Resultados del estadístico de prueba Shapiro-Wilk para las variables de grano dañado, rojo, manchado y yesoso.

Factor característico	Tipo de análisis	w	p-value
Grano Dañado	AT	0,934	$6,304 \times 10^{-2}$
	AD	0,964	0,395
Grano Rojo	AT	0,715	$2,574 \times 10^{-6}$
	AD	0,770	$1,882 \times 10^{-5}$
Grano Manchado	AT	0,879	$2,655 \times 10^{-3}$
	AD	0,824	$1,834 \times 10^{-4}$
Grano Yesoso	AT	0,908	$1,337 \times 10^{-2}$
	AD	0,862	$1,146 \times 10^{-3}$

Anexo N. Análisis de correlación entre los resultados obtenidos mediante el método tradicional y digital para grano dañado, rojo, manchado y yesoso.

Factor característico	Correlación de Pearson	Correlación de Spearman
Grano Dañado	t = 1,7932; 28 g,l	S = 2966,5
	p-value = 0,08375	p-value = 0,06597
	cor = 0,3209557	rho = 0,3400467
Grano Rojo	t = 1,6868; 28 g,l	S = 2488,4
	p-value = 0,1027	p-value = 0,0134
	cor = 0,3037223	rho = 0,4464121
Grano Manchado	t = 4,9668; 28 g,l	S = 1162,4
	p-value = $3,037 \times 10^{-5}$	p-value = $2,77 \times 10^{-6}$
	cor = 0,6843855	rho = 0,741406
Grano Yesoso	t = 1,4345; 28 g,l	S = 3128
	p-value = 0,1625	p-value = 0,1025
	cor = 0,261654	rho = 0,3041157

Anexo O. Resultados del estadístico de prueba Shapiro-Wilk para las variables de blancura, transparencia y grado de pulido.

Factor característico	Tipo de análisis	w	p-value
Blancura	Equipo SATAKE	0,882	$3,228 \times 10^{-3}$
	AD	0,922	$3,045 \times 10^{-2}$
Transparencia	Equipo SATAKE	0,911	$1,592 \times 10^{-2}$
	AD	0,822	$1,694 \times 10^{-4}$
Grado de pulido	Equipo SATAKE	0,942	0,103
	AD	0,949	0,163

Anexo P. Análisis de correlación entre los resultados obtenidos mediante el método digital y equipo automático SATAKE para las propiedades de blancura y transparencia.

Factor característico	Correlación de Pearson	Correlación de Spearman
Blancura	t = 4,3553; 28 g,l	S = 1642,5
	p-value = 0,0001611	p-value = 0,0001656
	cor = 0,635439	rho =0,6346028
Transparencia	t = 8,5754; 28 g,l	S = 1083,5
	p-value = 2,551x10 ⁻⁹	p-value = 1,167x10 ⁻⁶
	cor = 0,8510218	rho = 0,7589585

Anexo Q. Análisis de correlación entre los resultados obtenidos mediante el modelo de regresión (MR) y el equipo automático SATAKE para el grado de pulido.

Correlación de Pearson	Correlación de Spearman
t = 3,0445; 28 g,l	S = 2115,6
p-value = 0,005031	p-value = 0,002631
cor = 0,4986982	rho = 0,52934

Anexo R. Algoritmo utilizado para analizar propiedades de grano entero, quebrado y puntilla (GQEP) en ImageJ.

```

////EntQuebrPunt//
//setTool("line");
makeLine(1843, 3251, 1951, 3251);
run("Set Scale...", "distance=108 known=10 unit=mm");

//setTool("rectangle");
makeRectangle(24, 270, 2490, 2946);
//makeRectangle(24, 256, 2504, 2976);//Corregir por imagen*

run("Crop"); //Recorte de bordes

//Mediciones deseadas
run("Set Measurements...", "area standard min centroid center perimeter bounding fit shape
feret's integrated median skewness kurtosis area_fraction stack redirect=None decimal=3");

//run("Brightness/Contrast...");
run("Enhance Contrast", "saturated=0.006"); //0.006 manchados y dañado //0.01 GEQP
run("Smooth");

// Color Thresholder 2.1.0/1.53c
// Autogenerated macro, single images only!
min=newArray(3);
max=newArray(3);
filter=newArray(3);
a=getTitle();
run("HSB Stack");
run("Convert Stack to Images");
selectWindow("Hue");
rename("0");

```

```

selectWindow("Saturation");
rename("1");
selectWindow("Brightness");
rename("2");
min[0]=0;
max[0]=146;
filter[0]="pass";
min[1]=0;
max[1]=255;
filter[1]="pass";
min[2]=132;
max[2]=255;
filter[2]="pass";
for (i=0;i<3;i++){
  selectWindow(""+i);
  setThreshold(min[i], max[i]);
  run("Convert to Mask");
  if (filter[i]=="stop") run("Invert");
}
imageCalculator("AND create", "0","1");
imageCalculator("AND create", "Result of 0","2");
for (i=0;i<3;i++){
  selectWindow(""+i);
  close();
}
selectWindow("Result of 0");
close();
selectWindow("Result of Result of 0");
rename(a);
// Colour Thresholding-----

//Binarización para analisis de particulas
run("Make Binary", "method=Default background=Dark calculate black");

// Analisis de particulas

run("Analyze Particles...", "size=0.9-55 circularity=1-1 show=[Overlay Masks] display in_situ
slice");
run("Labels...", "color=red font=9 show bold");

```

Anexo S. Algoritmo utilizado para analizar propiedades de mesa en ImageJ.

```

////Grano Rojo//

//setTool("line");
makeLine(1843, 3251, 1951, 3251);
run("Set Scale...", "distance=108 known=10 unit=mm");

//setTool("rectangle");
makeRectangle(24, 270, 2490, 2946); //***//

```

```

run("Crop"); //Recorte de bordes

//Mediciones deseadas
run("Set Measurements...", "area standard min centroid center perimeter bounding fit shape
feret's integrated median skewness kurtosis area_fraction stack redirect=None decimal=3");
run("Enhance Contrast", "saturated=0.5");
run("Smooth");
run("HSB Stack");
setAutoThreshold("Huang");
//run("Threshold...");
setThreshold(1, 25);

run("Analyze Particles...", "size=0.038-1 circularity=0.05-1.00 show=[Overlay Masks] display
in_situ slice");
run("Labels...", "color=yellow font=11 show bold");

///Grano Manchado///
//Ingresar ubicación de imagenes
//setTool("line");
makeLine(1843, 3251, 1951, 3251);
run("Set Scale...", "distance=108 known=10 unit=mm");

//setTool("rectangle");
makeRectangle(24, 270, 2490, 2946); //***///
run("Crop"); //Recorte de bordes

//Mediciones deseadas
run("Set Measurements...", "area standard min centroid center perimeter bounding fit shape
feret's integrated median skewness kurtosis area_fraction stack redirect=None decimal=3");

//run("Brightness/Contrast...");
setMinAndMax(120, 193);
run("Apply LUT");

// Color Thresholder 2.1.0/1.53c
// Autogenerated macro, single images only!
min=newArray(3);
max=newArray(3);
filter=newArray(3);
a=getTitle();
run("HSB Stack");
run("Convert Stack to Images");
selectWindow("Hue");
rename("0");
selectWindow("Saturation");
rename("1");
selectWindow("Brightness");
rename("2");
min[0]=35;
max[0]=100;
filter[0]="pass";
min[1]=114;
max[1]=255;
filter[1]="pass";

```

```

min[2]=112;
max[2]=255;
filter[2]="pass";
for (i=0;i<3;i++){
  selectWindow(""+i);
  setThreshold(min[i], max[i]);
  run("Convert to Mask");
  if (filter[i]=="stop") run("Invert");
}
imageCalculator("AND create", "0", "1");
imageCalculator("AND create", "Result of 0", "2");
for (i=0;i<3;i++){
  selectWindow(""+i);
  close();
}
selectWindow("Result of 0");
close();
selectWindow("Result of Result of 0");
rename(a);
// Colour Thresholding-----

run("Analyze Particles...", "size=1-1001 circularity=1-1.00 show=[Overlay Masks] display in_situ
slice");
run("Labels...", "color=red font=11 show bold");

///Grano Yesoso///

//setTool("line");
makeLine(1843, 3251, 1951, 3251);
run("Set Scale...", "distance=108 known=10 unit=mm");

//Mediciones deseadas
run("Set Measurements...", "area standard min centroid center perimeter bounding fit shape
feret's integrated median skewness kurtosis area_fraction stack redirect=None decimal=3");

//setTool("rectangle");
makeRectangle(24, 270, 2490, 2946); ///***/
run("Crop"); //Recorte de bordes

run("RGB Stack");
setAutoThreshold("Li");
//run("Threshold...");
setThreshold(211, 255);

run("Analyze Particles...", "size=0.7-100 circularity=1-1.00 show=[Overlay Masks] display clear
in_situ slice");
run("Labels...", "color=yellow font=11 show bold")

///Grano Dañado///

//setTool("line");
makeLine(1843, 3251, 1951, 3251);
run("Set Scale...", "distance=108 known=10 unit=mm");
//setTool("rectangle");

```

```

makeRectangle(24, 270, 2490, 2946); ///***///
run("Crop"); //Recorte de bordes
run("Enhance Contrast", "saturated=0.05");
run("Smooth");

run("HSB Stack");
setAutoThreshold("Huang");
//run("Threshold...");
setThreshold(13, 45);
run("Analyze Particles...", "size=0.1-100 circularity=1-1.00 show=[Overlay Masks] display in_situ slice");
run("Labels...", "color=yellow font=11 show bold");

```

Anexo T. Algoritmo utilizado para analizar propiedades de blancura en ImageJ.

```

open("...tiff ");//

run("Set Measurements...", "area mean standard modal integrated area_fraction redirect=None decimal=3");

//setTool("line");
makeLine(6916, 12667, 7332, 12663);
run("Set Scale...", "distance=402.0448 known=9.72 unit=mm");
//setTool("line");

//setTool("rectangle");
makeRectangle(96, 1104, 9936, 11688);
run("Crop");

run("Enhance Contrast", "saturated=5");
run("Smooth");
run("Colour Deconvolution", "vectors=H&E");

selectWindow("Colour Deconvolution");
close();

selectWindow("256_R1.tif-(Colour_1)");
saveAs("Tiff", "C:/... /Result_256/R1/1.tif");//

selectWindow("256_R1.tif-(Colour_2)");
saveAs("Tiff", "C:/... /Result_256/R1/2.tif");//

selectWindow("256_R1.tif-(Colour_3)");
saveAs("Tiff", "C:/... /Result_256/R1/3.tif");//
run("Close All");

///1///
open("C:/.../Result_256/R1/1.tif");

setAutoThreshold("Percentile");
//run("Threshold...");
//setThreshold(0, 172);

```

```

run("Convert to Mask");

run("Measure");
saveAs("Tiff", "C:/.../Result_256/R1/1_A.tif");
saveAs("Results", "C:/.../Result_256/R1/Results_1.csv");
run("Clear Results");
run("Close All");

/////
open("C:/.../Result_256/R2/1.tif");
setAutoThreshold("Percentile");
//run("Threshold...");
//setThreshold(0, 238);
setOption("BlackBackground", false);
run("Convert to Mask");

run("Measure");
saveAs("Tiff", "C:/.../Result_256/R1/2_A.tif");
saveAs("Results", "C:/.../Result_256/R1/Results_2.csv");
run("Clear Results");
run("Close All");

///3///
open("C:/.../Result_256/R3/1.tif");

setAutoThreshold("Huang");
//setThreshold(0, 228);
run("Convert to Mask");
run("Measure");

saveAs("Tiff", "C:/.../Result_256/R1/3_A.tif");
saveAs("Results", "C:/.../Result_256/R1/Results_3.csv");

run("Clear Results");
run("Close All");

```

Anexo U. Algoritmo utilizado para cuantificar propiedades de GEQP por área en Rstudio.

```

library(readr)
Results_GEQP <- read_csv("C:/.../Results_GEQP_253_R3.csv")
Results_GEQP <- data.frame(Número=1:nrow(Results_GEQP), Longitud =
Results_GEQP$Ferret,Area=
Results_GEQP$Area,Perimetro=Results_GEQP$Perim.,Circunferencia=Results_GEQP$Circ.)

Results_GEQP <- Results_GEQP[-
c(4838,5574,4561,3472,3547,4128,4176,1868,2000,392,480,566),] ## Elementos a excluir

Area_Total <-data.frame(sum(Results_GEQP$Area)) ##Area total de captura en mm2
colnames(Area_Total)<-c("Area Total")
rownames(Area_Total)<-c("(mm2)")

##Separación por dimensioe
Puntilla <- Results_GEQP[which(Results_GEQP$Longitud<3.057),] ##2.38 mm

```

```

Quebrado <- Results_GEQP[which(Results_GEQP$Longitud>3.057 &
Results_GEQP$Longitud<5.152),] ##4.76
Entero <- Results_GEQP[which(Results_GEQP$Longitud>5.152),]

##Area de Puntilla
Area_Puntilla <-data.frame(sum(Puntilla$Area))
##Area de Quebrado
Area_Quebrado <-data.frame(sum(Quebrado$Area))

##Area de Enter
Area_Entero <-data.frame(sum(Entero$Area))
Resultado_Final <- data.frame(Area_Total,Area_Puntilla,Area_Quebrado,Area_Entero)
Resultado_Final
plot.default(Resultado_Final)

```

Anexo V. Algoritmo utilizado para cuantificar propiedades de GEQP por peso en Rstudio.

```

library(readr)
Results_GEQP <- read_csv("C:/.../Results_GEQP_254_R3.csv")
Función_EcuaciónPeso
ecuacion_conteo <- function(x){
  0.0027*x + 0.0007
}
#Grano_EntQuebPunt
Results_GEQP <- data.frame(Numero=1:nrow(Results_GEQP), Longitud = Results_GEQP$Ferret,
Area=
Results_GEQP$Area,Perimetro=Results_GEQP$Perim.,Circunferencia=Results_GEQP$Circ.)

Results_GEQP <- Results_GEQP[-c(481,503),] ## Elementos a excluir

hist(x = Results_GEQP$Longitud, main = "Longitudes máximas del grano",
  xlab = "Longitud (cm)", ylab = "Frecuencia",
  col = "ivory")
table(Results_GEQP$Longitud)
mean(Results_GEQP$Longitud)
sd(Results_GEQP$Longitud)

##Separación por dimensiones
Puntilla <- Results_GEQP[which(Results_GEQP$Longitud<2.93),]
Quebrado <- Results_GEQP[which(Results_GEQP$Longitud>2.93 &
Results_GEQP$Longitud<5.15),]
Entero <- Results_GEQP[which(Results_GEQP$Longitud>5.15),]

#Análisis de peso Puntilla
pesos<- c()
for(i in 1:nrow(Puntilla)) {
  pesos[i]<-ecuacion_conteo(Puntilla[i,2])
}

Puntilla$Pesos<-pesos

#Análisis de peso Quebrado
pesos<- c()

```

```

for(i in 1:nrow(Quebrado)) {
  pesos[i]<-ecuacion_conteo(Quebrado[i,2])
}
Quebrado$Pesos<-pesos

rm(pesos)
#Análisis de peso Entero
pesos<- c()

for(i in 1:nrow(Entero)) {
  pesos[i]<-ecuacion_conteo(Entero[i,2])
}
Entero$Pesos<-pesos
rm(pesos)

#Sumatoria
Peso_GEQP <-data.frame(sum(Entero$Pesos), sum(Quebrado$Pesos),sum(Puntilla$Pesos))
colnames(Peso_GEQP)<-c("Masa Grano Entero","Masa Grano Quebrado","Masa Grano Puntilla")
rownames(Peso_GEQP)<-c("(g)")
Peso_GEQP

```

Anexo W. Algoritmo utilizado para cuantificar propiedades de mesa en Rstudio

```

##Cargar ubicacion de unidad muestral

library(readr)
Results_Mesa <- read_csv("../Results_Mesa_253_R1.csv")

Results_Mesa <- data.frame(Numero=1:nrow(Results_Mesa), Longitud =
Results_Mesa$Feret,Area=
Results_Mesa$Area,Perimetro=Results_Mesa$Perim.,Circunferencia=Results_Mesa$Circ.)

##Grano_Dañado
Results_GD <- Results_Mesa[c(...),] ## Ingrese elementos detectados y verificados

Area_GD <-data.frame(sum(Results_GD$Area))
colnames(Area_GD)<-c("Area Grano Dañado")
rownames(Area_GD)<-c("(mm2)")

##Grano_Manchado

Results_GM <- Results_Mesa[c(...),] ## Ingrese elementos detectados y verificados

Area_GM <-data.frame(sum(Results_GM$Area))
colnames(Area_GM)<-c("Area Grano Manchado")
rownames(Area_GM)<-c("(mm2)")

##Grano_Yesoso

library(readr)
Results_GY1 <- read_csv("../Result_GY001.csv")

```

```

Results_GY1 <- data.frame(Número=1:nrow(Results_GY1), Results_GY1 =
Results_GY1$Feret,Area=
Results_GY1$Area,Perimetro=Results_GY1$Perim.,Circunferencia=Results_GY1$Circ.)

library(readr)
Results_GY2 <- read_csv("../Result_GY002.csv")

Results_GY2 <- data.frame(Número=1:nrow(Results_GY2), Results_GY2 =
Results_GY2$Feret,Area=
Results_GY2$Area,Perimetro=Results_GY2$Perim.,Circunferencia=Results_GY2$Circ.)

#Results_GY <- Results_Mesa[c( ),] ## Ingrese elementos detectados y verificados
Area_GY <-data.frame(sum(Results_GY1$Area)+sum(Results_GY2$Area))
###Area_GY <-data.frame(sum(Results_GY1$Area))

colnames(Area_GY)<-c("Area Grano Yesoso")
rownames(Area_GY)<-c("(mm2)")

#rm(Results_GY1,Results_GY2)

##Grano_Rojo
Results_GR <- Results_Mesa[c(...),] ## Ingrese elementos detectados y verificados

Area_GR <-data.frame(sum(Results_GR$Area))
colnames(Area_GR)<-c("Area Grano Rojo")
rownames(Area_GR)<-c("(mm2)")

## Elementos a excluir del vector Total
Results_Mesa <- Results_Mesa[-c(,),]

Area_Total <-data.frame(sum(Results_Mesa$Area)) ##Area total de captura en mm2
colnames(Area_Total)<-c("Area Total")
rownames(Area_Total)<-c("(mm2)")

##ResultadoS_Finales
Resultado_Final <- data.frame(Area_Total,Area_GD,Area_GM,Area_GR,Area_GY)
Resultado_Final

```

Anexo X. Algoritmo utilizado para cuantificar propiedades de blancura en Rstudio.

```

library(readr)
R1<- read_csv("C:/.../Result_256/R1/Results_1.csv")
R2<- read_csv("C:/.../Result_256/R1/Results_2.csv")
R3<- read_csv("C:/.../Result_256/R1/Results_3.csv")
Result <- data.frame(R1, R2, R3)
Result

```