

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE SPECKLE DINÁMICO PARA LA ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE GERMINACIÓN DE SEMILLAS DE CAFÉ

Fecha de envío: 08/04/2024

Data de aceite: 02/05/2024

Lenin Alberto Nuñez Reales

Universidad Popular del Cesar, Grupo de Óptica e Informática, Departamento de Física, Valledupar - Colombia

Eberto Luis Benjumea Mendoza

Universidad Popular del Cesar, Grupo de Optoelectrónica y Procesamiento de Señales (OPSE), Departamento de Electrónica, Valledupar - Colombia

Juan Manuel Vilardy Ortiz

Universidad Popular del Cesar, Grupo de Optoelectrónica y Procesamiento de Señales (OPSE), Departamento de Electrónica, Valledupar - Colombia

Fabio Vega Nieto

Universidad Popular del Cesar, Grupo de Optoelectrónica y Procesamiento de Señales (OPSE), Departamento de Electrónica, Valledupar - Colombia

germinación de semillas de café, con la inversión de largos intervalos de tiempo, de uno a dos meses, en la aplicación de estos métodos. Otros aspectos que pueden afectar la la capacidad germinadora de las semillas de café son las condiciones de transporte y almacenamiento, junto con la alta sensibilidad de las semillas a la humedad y a la temperatura. En este trabajo de investigación se realiza el análisis de las imágenes captadas del speckle dinámico producido por granos de café con el objetivo principal de verificar la presencia de embriones vivos en semillas en cortos intervalos de tiempo dados en minutos. La implementación del sistema optoelectrónico para la captura de las imágenes de speckle dinámico producidas por los granos de café y el procesamiento digital de dichas imágenes, se basa en una cámara CMOS de un teléfono celular para la adquisición y transmisión de las imágenes con un de tamaño 720x480 píxeles, un computador para la gestión, recepción y procesado de las mismas, una red inalámbrica de área local, un láser He-Ne de 633 nm con 10 mW de potencia como fuente de luz coherente, un difusor óptico y una superficie de aluminio para la colocación de las semillas. Esta investigación presenta buenos resultados

RESUMEN: Uno de los problemas que más preocupa a los caficultores colombianos es la capacidad germinadora de sus semillas de café. Generalmente, los métodos tradicionales de estimación de germinación de semillas (siembra de muestras de una población) son lentos, al igual que la

al determinar cuántas y cuales semillas germinan de un total dado. La implementación del sistema optoelectrónico propuesto junto con el procesamiento digital de imágenes de speckle dinámico reduce el tiempo de estimación del porcentaje de germinación de meses a minutos. Finalmente, los resultados de la presente investigación son prometedores para nuevos proyectos de investigación relacionados con la clasificación de semillas de café por sistemas mecánicos y a proyectos de investigación de predicción de productividad de cosechas.

PALABRAS-CLAVE: Procesamiento digital de imágenes, Speckle dinámico, Semillas de café, Germinación de semillas de café.

DIGITAL IMAGE PROCESSING OF DYNAMIC SPECKLE FOR ESTIMATING THE GERMINATION PERCENTAGE OF COFFEE SEEDS

ABSTRACT: One of the problems that most concerns Colombian coffee growers is the germination capacity of their coffee seeds. Generally, traditional methods of seed germination estimation (sowing samples of a population) are slow, as is the germination of coffee seeds, with the investment of long time intervals, from one to two months, in the application of these methods. Other aspects that can affect the germination capacity of coffee seeds are transport and storage conditions, along with the high sensitivity of seeds to humidity and temperature. In this research work, the analysis of images captured from the dynamic speckle produced by coffee beans is carried out with the main objective of verifying the presence of live embryos in seeds in short time intervals given in minutes. The implementation of the optoelectronic system for the capture of the dynamic speckle images produced by the coffee beans and the digital processing of these images is based on a cell phone CMOS camera for the acquisition and transmission of the images with a size of 720x480 pixels, a computer for the management, reception and processing of the images, a wireless local area network, a 633 nm He-Ne laser with 10 mW of power as a source of coherent light, an optical diffuser and an aluminum surface for the placement of the seeds. This research presents good results in determining how many and which seeds germinate out of a given total. The implementation of the proposed optoelectronic system together with the digital processing of dynamic speckle images reduces the estimation time of the germination percentage from months to minutes. Finally, the results of the present research are promising for new research projects related to coffee seed sorting by mechanical systems and for crop productivity prediction research projects.

KEYWORDS: Digital image processing, Dynamic Speckle, Coffee seeds, Coffee seed germination.

INTRODUCCIÓN

Colombia, tras el fin del conflicto armado con las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia – ejército del Pueblo (FARC-EP), enfrenta problemáticas de degradación ambiental, pobreza rural, baja capacidad institucional y rezagos en el desarrollo de los territorios más afectados por el conflicto armado (Consejo Nacional de Política Económica y social 3850 de Colombia, 2015). Por tal motivo, Colombia busca realizar, entre muchos otros objetivos, la transformación de zonas rurales y/o afectadas por el conflicto armado. En ese sentido, se propuso aportar al eje estratégico *Innovación para el desarrollo rural* del CONPES 3850 mediante la estimación del porcentaje de germinación de semillas de café (Consejo Nacional de Política Económica y social 3850 de Colombia, 2015).

El almacenamiento de las semillas café, tras su adquisición, así como las condiciones climatológicas de distribución, afectan el porcentaje de germinación de estas (Barboza & Herrera, 1990; Arizaleta *et al.*, 2005; Zonta *et al.*, 2009; Clemente *et al.*, 2012). Las condiciones en zonas rurales las expone a diversos factores, como temperatura y humedad no deseadas, que van en detrimento de la vitalidad de la semilla (Barboza & Herrera, 1990; Rabal & Braga, 2009). Asimismo, la germinación de un grupo de semillas de café es lenta y poco uniforme, pudiendo tomar de uno a tres meses para completarse (Zonta *et al.*, 2009; Clemente *et al.*, 2012). Los métodos actuales para determinar la capacidad de germinación de las semillas de café suelen ser la lenta siembra de muestras de un lote, y el uso de la prueba de tetrazolio, con resultados en 48 horas. Esta última afecta la capacidad de germinación de semillas con porcentajes de humedad inferiores al 23% al combinarla con hipoclorito de sodio para la eliminación del pergamino (Clemente *et al.*, 2012).

El patrón de speckle surge cuando una superficie ópticamente rugosa se ilumina con luz que tiene un alto grado de coherencia, como la que proviene de un láser, la luz dispersada presenta una distribución de intensidad particular, haciendo que la superficie parezca estar cubierta con una estructura granular fina (Rabal & Braga, 2009). Cuando el patrón de speckle incide en objetos que muestran algún tipo de actividad (frutas, pinturas en proceso de secado o algún tipo de muestras biológicas), la apariencia visual del patrón es similar a la de un líquido en ebullición (Rabal & Braga, 2009). Este efecto se denomina speckle dinámico y está causado por variaciones en la fase de la luz producida por los movimientos de los centros de dispersión, cambios en el índice de refracción, potencia de rotación, etc. (Rabal & Braga, 2009). Las imágenes de este fenómeno pueden usarse para medir la actividad dinámica de las semillas, golpes en frutas, actividad parasitaria, etc. (Rabal & Braga, 2009).

Esta investigación pretende estimar el porcentaje de germinación de semillas de café como grupo, y determinar individualmente si una semilla germinaría o no, mediante el análisis de la evolución temporal del diagrama de speckle. Asimismo, pretende plantear un nuevo método que requiera obtenga resultados en un intervalo de tiempo corto (minutos).

El sistema consta de una cámara CMOS de un teléfono celular para la adquisición y transmisión de imágenes con un de tamaño 720x480 píxeles, un computador para la gestión, recepción y procesado de las mismas, una red inalámbrica de área local, un láser He-Ne 633 nm de 10 mW de potencia como fuente de luz coherente, un difusor óptico y una superficie de aluminio para la colocación de las semillas. El estudio mostró resultados satisfactorios para determinar cuántas y cuales semillas germinan de un total dado. Esta investigación abre las puertas a futuros proyectos para clasificación de semillas de café por sistemas mecánicos y proyectos de predicción de productividad de cosechas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo consta de un montaje óptico, una red inalámbrica de área local y un equipo de cómputo. El sistema optoelectrónico fue implementado en una mesa óptica con un laser He-Ne JDS Uniphase Model 1125P con longitud de onda 633 nm y potencia máxima de 10 mW. El haz de este laser incide en un objetivo de microscopio 40X con el fin de expandirlo. Luego atraviesa un difusor produciendo el patrón de speckle. Este patrón incide sobre un conjunto de semillas de café. Las imágenes o fotografías de las semillas bajo la incidencia del patrón de speckle son adquiridas mediante la cámara de un teléfono celular Moto G5s Plus model XT1801. Estas son transmitidas a un computador a través de una red inalámbrica de área local, gracias a la implementación de la aplicación móvil Droidcam bajo el sistema operativo Android y del desarrollo e implementación de un código en el software MATLAB. El montaje desarrollado e implementado es mostrado en la figura 1. Para sujetar el móvil de manera estable en el montaje, se diseñó e imprimió en 3D una carcasa para tal fin, la cual es mostrada en la figura 2.

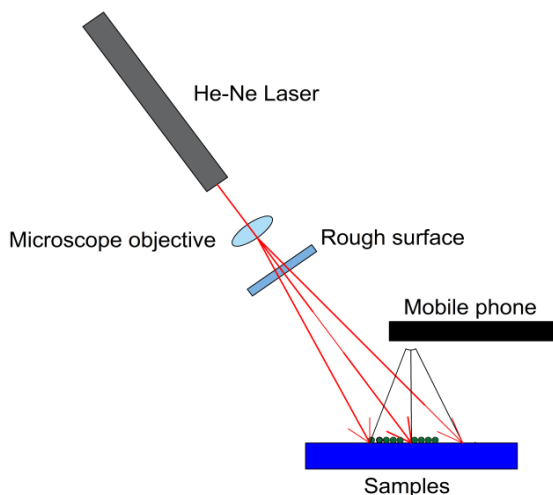


Figura 1. Esquema de montaje optoelectrónico.

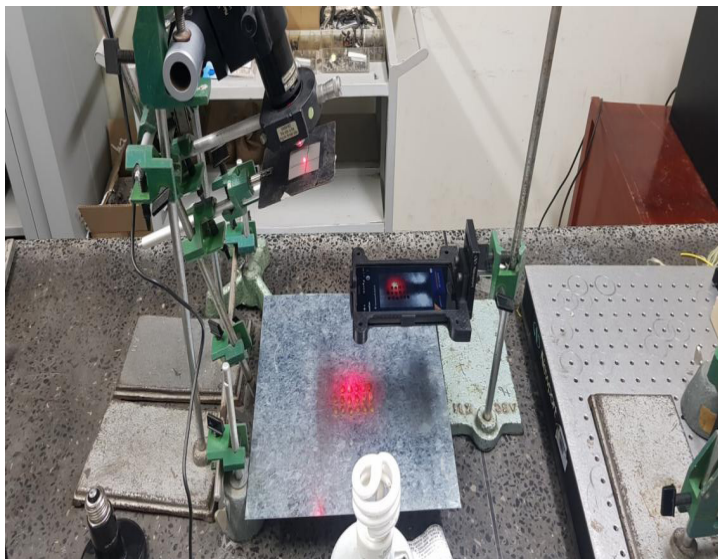


Figura 2. Montaje optoelectrónico.

Las semillas utilizadas en este estudio se escogieron de manera que presentaran la misma morfología: sin deformaciones y tamaño regular. El pergamino y el mucílago se les retiró manualmente a cada una de ellas. La disposición de las semillas ante la cámara se realizó en una distribución cuadrada, y de manera que ninguna semilla tuviese contacto con otra, guardando una distancia prudencial. Las imágenes se adquirieron de manera que todas las semillas exhibieran la cara posterior o anterior a la cámara.

El software en Matlab controla la conexión a la aplicación Droidcam y adquiere una imagen a color con las muestras iluminadas y 500 imágenes de patrón de speckle en las mismas. La imagen de las semillas iluminadas se segmenta bajo el color de las semillas. El script obtiene como resultado una máscara de segmentación. Luego, etiqueta cada agrupación de píxeles, los identifica como semilla y calcula la cantidad total de semillas bajo observación. Este proceso genera una cantidad de máscaras igual a la cantidad de semillas. Cada máscara contiene una única agrupación de píxeles correspondiente a semillas. Finalmente, se segmenta una vez más cada máscara obteniendo una pequeña máscara con el objetivo de optimizar el manejo de memoria RAM por el sistema. En el ejemplo que se mostrará en la presente investigación se utilizaron 30 semillas.

Las 500 imágenes de patrón de speckle son convertidas a escala de grises. Las pequeñas máscaras correspondientes a cada semilla, segmentan las 500 imágenes y la ejecución del código calcula los coeficientes de auto correlación para cada semilla. La figura 3 muestra el diagrama del proceso de estimación del porcentaje de germinación de las semillas de café.

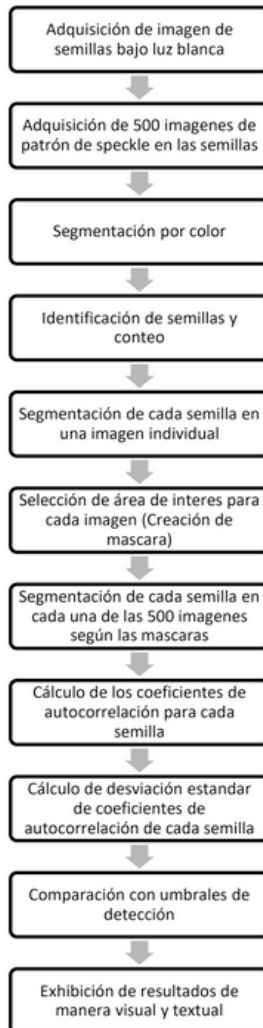


Figura 3. Diagrama del proceso de estimación del porcentaje de germinación de las semillas de café.

RESULTADOS

La aplicación Droidcam crea un servidor en la red de área local al cual se accede con la dirección privada del teléfono y un número de puerto. El programa enlaza a Matlab con dicho servidor, solicita el número de imágenes de speckle a tomar, y el tiempo entre ellas. Luego, espera la orden del usuario para la toma de una imagen a color bajo luz blanca de las semillas (Ver Figura 4), y la adquisición de imágenes de speckle dinámico (Ver Figura 5). Luego, se detectan las semillas mediante una segmentación por el color amarillo en la imagen bajo luz blanca. El resultado de este proceso se ilustra en la Figura 6. Posteriormente, el algoritmo extrae cada semilla a una imagen propia, tal como puede observarse en la figura 7 que mostramos como ejemplo. Cada imagen extraída (Una por semilla) es procesada para seleccionar el área de interés de cada una (Ver Figura 8).

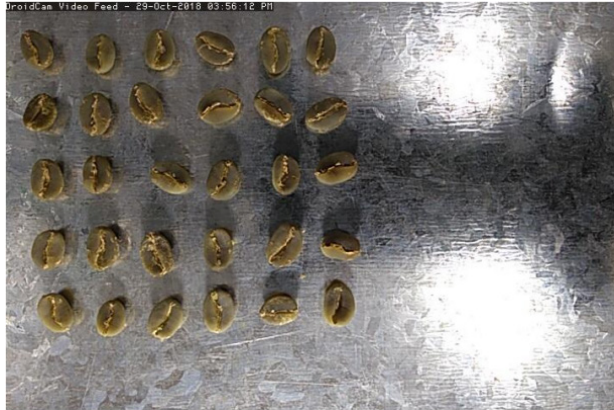


Figura 4. Imagen a color bajo luz blanca de las semillas.



Figura 5. Una de las 500 imágenes de speckle dinámico de las semillas.

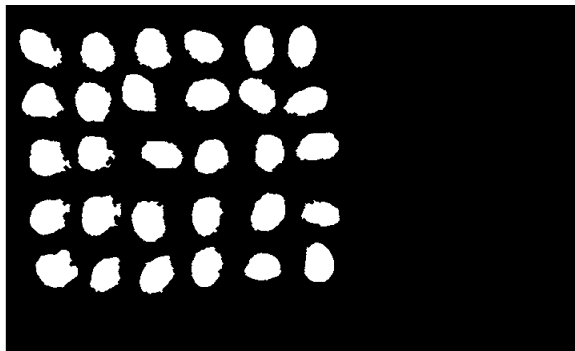


Figura 6. Identificación de semillas por segmentación de color.



Figura 7. Extracción de cada semilla.

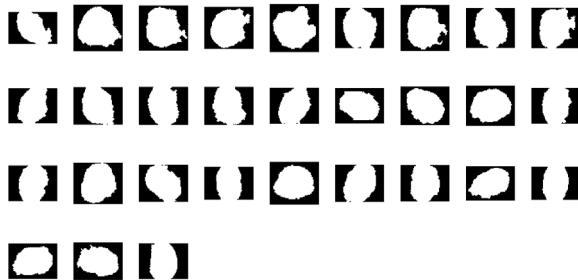


Figura 8. Máscaras de segmentación.

Las máscaras obtenidas para cada semilla son aplicadas a cada una de las 500 imágenes y se calculan los coeficientes de correlación para las nuevas 500 imágenes de cada semilla. En el ejemplo, utilizado en la presente investigación, significa que se crearon el producto de la cantidad de semillas por la cantidad de imágenes (30x500 imágenes), 15000 imágenes en total para analizar el total de semillas de manera independiente cada una.

La gráfica de los coeficientes de correlación demostró que las semillas que mostraban curvas pronunciadas o por lo menos rectas con pendientes negativas con actividad biológica (Ver Figura 9). Condición para declararlas vivas y con capacidad de germinar. En caso contrario, puede afirmarse que la semilla no demuestra actividad biológica (Ver figura 10).

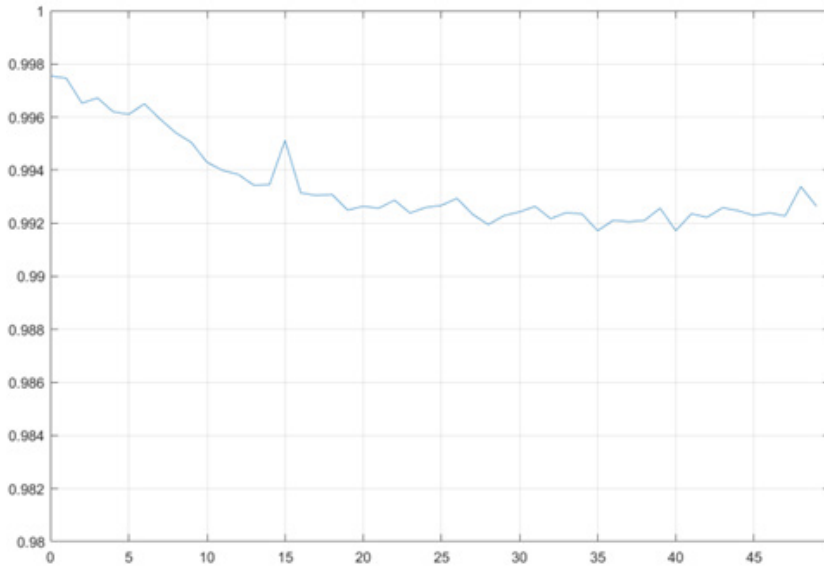


Figura 9. Curva de correlación de semilla con capacidad de germinación.

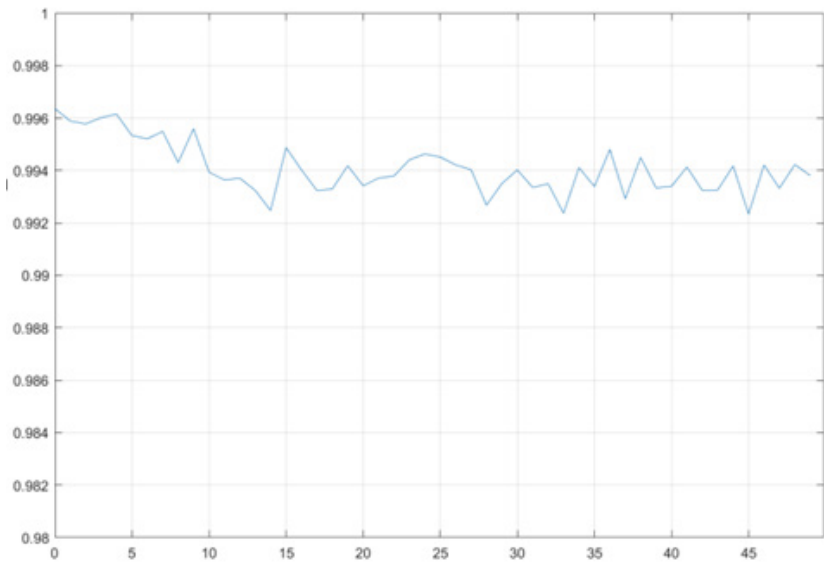


Figura 10. Curva de correlación de semilla sin capacidad de germinación.

Para cada semilla se calculó la desviación estándar de los coeficientes de autocorrelación de cada semilla, y se discriminan las mismas según un umbral de comparación de 0,0007. Las semillas cuya desviación estándar es inferior a este valor son categorizadas como semillas sin capacidad de germinación. Por otra parte, las semillas que exhiben una desviación estándar superior a 0,0007 son consideradas con capacidad de germinación.

El algoritmo toma la imagen de cada una de las máscaras individuales, como la mostrada en la figura 7, y las suma pixel a pixel teniendo en cuenta el umbral de comparación. Todas las máscaras correspondientes a semillas con desviaciones estándar de sus coeficientes de autocorrelación inferiores a 0,0007 son sumadas pixel a pixel formando una máscara que muestra las semillas sin capacidad de germinación. Este proceso origina una imagen como la mostrada en la figura 11. El mismo procedimiento se realiza con las máscaras individuales de semillas con desviaciones estándar de sus coeficientes de autocorrelación superiores a 0,0007, formando una imagen como la mostrada en la figura 12.



Figura 11. Máscara de semillas estimadas sin capacidad de germinación.

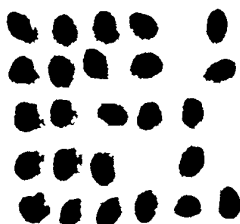


Figura 12. Máscara de semillas estimadas con capacidad de germinación.

Finalmente los colores de las semillas en la imagen a color, como la mostrada en la figura 4, son sustituidas en función de sus desviaciones estándar a través de las máscaras generadas según el umbral de discriminación. El resultado de este proceso puede observarse en la figura 13. El algoritmo además de mostrar gráficamente cuales semillas germinarán y cuáles no, también arroja textualmente cuantas semillas germinarán y el porcentaje de germinación con base al total de semillas detectadas.

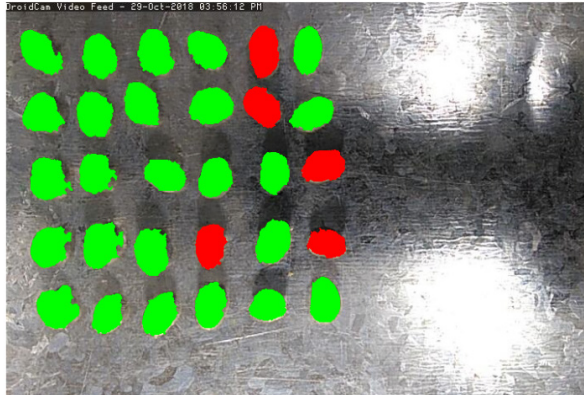


Figura 13. Resultados gráficos del algoritmo.

Cada semilla es numerada de la siguiente manera: en la figura 4, parte superior, primera fila de semillas, desde la izquierda hacia la derecha se encuentran respectivamente las semillas numeradas del 1 al 6; segunda fila, desde la izquierda hacia la derecha se encuentran respectivamente las semillas numeradas del 7 al 12, y así sucesivamente para cada fila. El método planteado determinó que 25 semillas germinarían y que solamente 5 no lo harían: las semillas 5, 11, 18, 22 y 24. Quiere decir esto que se estimó un porcentaje de germinación del 83,3%.

PROCESO DE SIEMBRA DE SEMILLAS DEL ESTUDIO

Con el objetivo de verificar los resultados del sistema propuesto fue necesario sembrar las semillas. Las germinaciones son mostradas en la figura 14. Los resultados de la germinación están consignados en la tabla 1. Germinó el 90% de ellas correspondiente a 27 semillas de un total de 30. Al contrastar el contenido de la tabla 1 con las estimaciones del sistema propuesto se puede observar que se estimó el porcentaje de germinación con un 7,4% de error. Asimismo no se logró determinar correctamente cuales semillas no germinarían: el sistema realizó cinco falsas detecciones de semillas con esta característica. Sin embargo, estimó correctamente sobre el 73,3% de los casos de las semillas analizadas que estas sí poseían capacidad de germinación.



Figura 14. Resultados gráficos del algoritmo.

Semilla	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Germinación	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Semilla	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Germinación	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X

Tabla 1. Germinaciones.

CONCLUSIONES

El estudio demostró que es posible determinar, de manera individual, si una semilla de café germinará. Se hace necesario refinar el procesamiento digital de las imágenes para evitar falsas detecciones mediante el análisis de variables no tenidas en cuenta en este trabajo. En especial, debe estudiarse las características de intensidad del patrón de speckle dinámico obtenido y los posibles efectos en el método planteado con el fin de optimizar el sistema. Se espera a mediano plazo diseñar e implementar una interfaz gráfica que permita automatizar el sistema. Todo esto con el objetivo de simplificar los procesos para los habitantes de las zonas rurales en aras de lograrla transformación de zonas rurales y/o afectadas por el conflicto armado según lo expresado por el CONPES 3850.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Popular del Cesar por su apoyo en esta investigación.

REFERENCIAS

1. Arizaleta M, Montilla J, & Pares J. 2005. Efecto del almacenamiento de las semillas de cafeto (*Coffea arabica* L. var. Catuai amarillo) sobre la emergencia. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 22(3), 205-213.
2. Barboza R, & Herrera J. 1990. El vigor en la semilla de café y su relación con la temperatura de secado, el contenido de humedad y las condiciones de almacenamiento. *Agronomía Costarricense*, 14(1): 1-8.
3. Clemente A, Carvalho M, & Guimarães R. 2012. Suitability of the tetrazolium test methodology for recently harvested and stored coffee seeds. *Ciência e Agrotecnologia*, 36(4), 415-423.
4. Departamento Nacional de Planeación. 2015. Consejo Nacional de Política Económica y social 3850 de Colombia. Gobierno de Colombia.
5. Rabal J, & Braga R. 2009. *Dynamic Laser Speckle and Applications*. Taylor and Francis Group. Estados Unidos de América.
6. Zonta J, Araújo E, Araújo R, Reis M, & Da Silva Lima J. 2009. LERCAFÉ test for the assessment of coffee seed quality during storage. *Seed Science and Technology*, 37. 140-146.