

EVALUACIÓN DEL PRINCIPIO DE REBOTE PARA SEPARAR OBJETOS DUROS Y FRUTOS VERDES DEL CAFÉ CEREZA

Ildebrando Restrepo Hernández¹; Fernando Alvarez Mejía²;
Juan R. Sanz Uribe³

RESUMEN

En el Centro Nacional de Investigaciones de café CENICAFÉ, fue investigado el principio de separación por rebote de los objetos duros (piedras y puntillas) y los frutos verdes presentes en el café cereza cosechado (variedades Colombia y Caturra). Utilizando un análisis de superficie de respuesta, se evaluaron tres alturas de caída y tres ángulos de inclinación de la placa de rebote. Fueron determinados los puntos estacionarios y la respuesta máxima en la distancia horizontal alcanzada por los elementos. Con la combinación de 60 cm de altura de caída y una inclinación de 40° de la placa se obtuvo una eficiencia de separación de objetos duros y de frutos verdes de 51,5% y de 9,9% respectivamente.

Palabras Claves: separación de objetos, rebote, café, superficie de respuesta.

Aprobado para su publicación Noviembre 22 de 1999.

ABSTRACT

At the Centro Nacional de Investigaciones de Café, CENICAFÉ, the principle of separation by bounce of hard objects (stones and nails) and green fruits in the harvested coffee cherry (varieties Colombia and Caturra), was investigated. Using an analysis of answer surface, three falls and three rakes of the bounce board were evaluated. The stationary points and the maxim answer reached in the horizontal range by the elements were determined. With the combination of fall of 60 cm and inclination board of 40° an efficiency of separation of hard objects and green fruits of 51.5% and 9,9% was obtained respectively.

Key words: separation of objects, bounce, coffee, surface of answer.

¹ Ingeniero Agrícola. Disciplina de Ingeniería Agrícola, CENICAFÉ.

² Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Apartado 1779.

³ Auxiliar de Investigación. Disciplina de Ingeniería Agrícola. CENICAFÉ. Apartado 2427 Manizales.

INTRODUCCION

Las leyes de protección de recursos naturales, que demandan la reducción drástica del consumo diario del agua y la utilización racional de ésta, están llevando al caficultor a optimizar y minimizar el consumo de esta en cada una de las etapas del proceso de beneficio húmedo del café. Sin embargo muchas fincas cafeteras de mediana y gran producción utilizan dispositivos hidráulicos como tanques sifón y trampas de agua, que separan los objetos y clasifican el café cereza, gastando considerables cantidades de agua (más de 4,5 lt / kg Café Cereza) (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 1995).

Con la práctica del despulpado sin agua se reduce la contaminación potencial de las aguas en un 72%. Uno de los principales problemas para llevar a cabo esta práctica ecológica, es la presencia de objetos duros como piedras, puntillas y otros en el café recolectado, que dañan las camisas de las despulpadoras generando costos adicionales por mantenimiento, de estas máquinas (Federacafé, 1995).

Existen diferentes principios mecánicos de separar objetos duros presentes en los productos agrícolas, entre los cuales se pueden citar: sistema de separación por punzones (Restrepo, 1997), separador de plano inclinado (Molfe; Singh y Puthur, 1980), separador de cepillos (Misener y Mcleod, 1989), separador de criba rotatoria (Long; Hamdy y Johnson,

1969; Srivastava y Hamdy, 1.974), separador neumático (Arias y Lozano, 1990), separador de pisos de cribas (Feller y Foux, 1975), separador electrónico (Misener y Mcleod, 1987), separadores electrostáticos (Krishnan ; Berlage y Lein, 1985) y separación por visión de computador (Sarkar y Wolfe, 1985).

De otro lado, aunque el proceso de recolección manual de café se realiza de manera selectiva, se hace necesaria la separación de gran cantidad de frutos verdes que llegan a las tolvas de recibo con el fin de mantener la buena calidad del grano.

Con el propósito de reducir el empleo del agua en el proceso de beneficio húmedo del café, evitar los daños a las camisas de las despulpadoras causados por objetos extraños y evaluar la separación de los frutos verdes, fué investigado el principio de separación por rebote.

REVISION DE LITERATURA

En Hawaii durante la decada de los 70's Shellenberger *et al* (1969) probaron un mecanismo de separación por rebote utilizando una lámina de acero inclinada; en este equipo los frutos inmaduros de café rebotaron más lejos siendo separados con relativa efectividad.

Martinez *et al* (1989) probó el principio de rebote para la separación de los frutos verdes presentes en el café cosechado mecánicamente. En este

trabajo se obtuvieron las curvas integrales de variación de la distancia de rebote de los frutos en diferentes estados de maduración, para diferentes valores del ángulo de inclinación de una superficie de rebote metálica.

Análisis teórico. Cuando un cuerpo esférico cae bajo la acción de la fuerza

de la gravedad e impacta sobre una superficie inclinada como se muestra en la Figura 1, el resultado de la fuerza ejercida sobre esta superficie es función de la masa y de las velocidades de impacto y rebote del cuerpo (Halliday y Resnick, 1980).

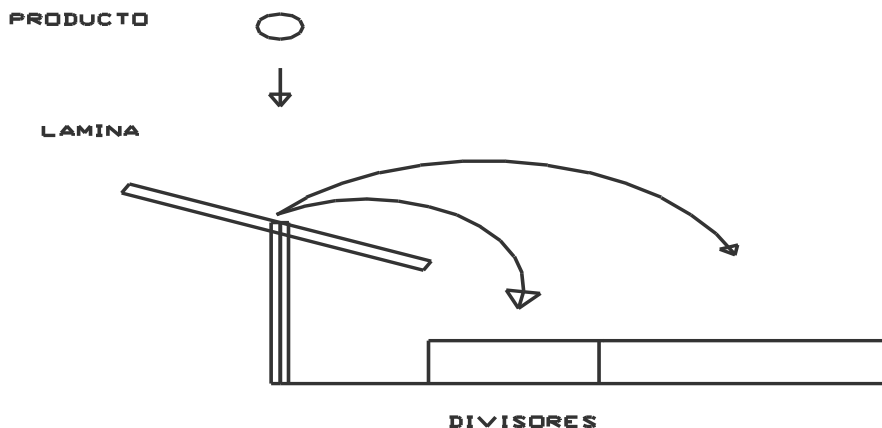


Figura 1. Principio de separación por rebote.

De acuerdo a la segunda ley de Newton se tiene que:

$$P = \int_0^{t_c} F_{(t)} dt = m(V_1 - V_2) \quad (1)$$

Donde:

- P** : Impulso [N-s].
- F_(t)** : Fuerza de contacto como una función del tiempo [N].
- t** : Tiempo durante el contacto

$$r = -\frac{V_2}{V_1} \quad (2)$$

- [s].
- t_c** : Tiempo total de contacto [s].
- m** : Masa de la esfera [kg].
- V₁** : Velocidad del centro de masa [m/s] antes de contacto. t=0
- V₂** : Velocidad del centro de masa [m/s] después de contacto. t = t_c

El principio físico útil es la diferencia que existe en el coeficiente de restitución r de los productos, para separar los diferentes objetos. El coeficiente de restitución, r, es definido como:

Donde el signo menos refleja que la dirección del rebote es opuesta a la dirección de impacto. El coeficiente de restitución de mayor valor, indica que estos productos caerán una distancia mayor que los de coeficiente de restitución más bajo (Srivastava y Ajit, 1993).

La velocidad de pre-impacto (V_1) puede ser estimada por el conocimiento de la caída libre bajo una aceleración gravitacional constante, haciendo posible determinar experimentalmente el coeficiente de restitución, si se conoce la altura de caída.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se realizó en el Laboratorio de experimentación en beneficio del café del Centro Nacional de Investigaciones de café CENICAFÉ, localizado en el municipio de Chinchiná, departamento de Caldas. A una altitud de 1.310 msnm, temperatura promedio de 20,6°C y humedad relativa promedio de 75%.

Para las pruebas se empleó café cereza de las variedades Colombia y Caturra, provenientes de la Estación Central "Naranjal" de CENICAFE y de fincas cafeteras particulares cercanas a la zona. Además se emplearon objetos duros de los más comunes que llegan a las tolvas de recibo en los beneficiaderos como son las piedras y puntillas. Se seleccionaron piedras del suelo circundante al beneficiadero y se escogieron objetos duros que pasaron una zaranda plana de 2,5 cm por 2,5 cm de orificio. Las puntillas que se

utilizaron fueron de 50,8 mm (2") de longitud.

Fueron utilizados los siguientes elementos:

- Placa de acero duro AISI 301 1/4, de 35 cm por 45 cm de área.
- Papel milimetrado de 70 cm por 50 cm de área.
- Papel "contact" de 74 cm por 54 cm de área.
- Cinta métrica.
- Dispositivo llamado "punto de caída libre" que consta de:
 - * Tubo de PVC de 3 pulgadas de diámetro y 20 cm de longitud con una ranura.
 - * Lámina de acero inoxidable de 0,4 mm de espesor y de forma circular de 7,62 cm de diámetro con agarradera.

Del café cereza que llega a la tolva de recibo del beneficiadero experimental, se tomaron 5 muestras, cada muestra constituida de 20 elementos (frutos verdes, pintones, maduros, sobremaduros, ramilletes⁴ verdes, ramilletes pintones, ramilletes maduros, secos, piedras y puntillas.

Para evaluar el principio de separación por rebote se consideraron tres alturas, (40, 50 y 60 cm) tomadas desde el punto de caída de los elementos hasta la superficie inclinada y tres grados de inclinación óptimos de la superficie de rebote (22,5°, 30° y 45°), encontrados por Martínez *et al* (1.989). Los elementos después de colisionar contra la superficie inclinada tomaron

⁴ Serie de dos o más frutos unidos por los pedúnculos.

diferentes trayectorias. Sobre un papel milimetrado en el piso, se midieron las coordenadas X y Y, del punto de impacto de cada objeto, tomando como origen el centro de la superficie de separación. Cada uno de los puntos de distancia horizontal (X , Y), fue utilizado como variable de respuesta para un análisis estadístico de superficie de respuesta.

Este análisis se realizó con el programa computacional de estadística "S.A.S," empleando la siguiente ecuación de segundo orden que relaciona la distancia horizontal (D) en función de la altura de caída de los frutos (A) y la inclinación de la placa de acero (I):

$$D = \beta_0 + \sum_{i=1}^n A_i I_i + \sum_{i=1}^n A_i I_i^2 + \sum_i \sum_j^m A_{ij} I_{ij} \quad (3)$$

Con el análisis de superficie de respuesta se determinaron los puntos estacionarios o extremos locales (los cuales pueden ser máximos, mínimos o punto de silla) para cada tipo de elemento mediante derivadas parciales, cuando éstas son igualadas a cero, así:

$$\frac{\partial DH}{\partial A} = 0; \frac{\partial DH}{\partial I} = 0; \frac{\partial DH}{\partial AI} = 0 \quad (4)$$

Donde:

DH : Distancia horizontal que recorre el fruto una vez ha impactado sobre la

placa inclinada de acero.

A : Altura de caída.

I : Inclinación de la placa.

Se procedió a determinar la respuesta máxima en la distancia horizontal utilizando las gráficas y las ecuaciones de superficies de respuesta generadas por el programa computacional.

Con la combinación óptima de altura de caída-ángulo de inclinación seleccionada, se determinó la eficacia de separación de objetos duros (piedras/puntillas y frutos verdes), utilizando la siguiente expresión:

$$E = \left(1 - \frac{M_{ns}}{M_s + M_{ns}}\right) * \left(1 - \frac{O_{ns}}{O_s + O_{ns}}\right) * 100 \quad (5)$$

Donde:

E: Eficacia de separación [%]

M_s: Café maduro seleccionado [número de frutos]

M_{ns}: Café maduro no seleccionado [número de frutos]

O_s: Objetos duros seleccionados [número de objetos]

O_{ns}: Objetos duros no seleccionados [número de objetos]

RESULTADOS Y DISCUSION

En Tabla 1 se muestra el resultado del análisis de superficie de respuesta indicando el valor y punto estacionario para la distancia horizontal (DH), la combinación altura de caída (A) - inclinación de la placa (I) y la variable que afectó más el cambio de la respuesta.

Tabla 1. Resultados del análisis de superficie de respuesta obtenidos para cada tipo de elemento (café y objetos duros).

Elemento	Valor punto estacionario (cm)	Punto estacionario	DH promedia (cm)	f(A - I) [cm - grados]	Variable que más afecta a DH
M	32,87	silla	32,39	(37,1 - 42,9)	Placa inclinada
P	35,92	silla	34,90	(45,4 - 40,0)	Placa inclinada
V	41,21	silla	39,14	(38,8 - 38,7)	Placa inclinada
RM	30,41	silla	26,50	(44,9 - 39,4)	Placa inclinada
RP	30,08	silla	26,84	(45,5 - 39,6)	Placa inclinada
RV	30,89	silla	28,64	(42,4 - 40,1)	Placa inclinada
S	34,78	silla	33,14	(45,1 - 39,7)	Placa inclinada
SM	28,73	silla	27,46	(47,1 - 40,8)	Placa inclinada
PIE	29,14	silla	24,71	(43,0 - 40,0)	Placa inclinada
PUN	31,58	silla	28,79	(40,7 - 41,9)	Placa inclinada

M: Maduro **RM:**Ramillete maduro **S:** Seco **PUN:** Puntilla
P: Pintón **RP:**Ramillete pintón **SM:**Sobremaduro **A:** altura caída
V:Verde **RV:**Ramillete verde **PIE:**Piedra **I:** inclinación
DH: Distancia horizontal

Se observó que para todos los elementos evaluados la variable de mayor incidencia en la respuesta obtenida de la distancia horizontal (DH) fué la inclinación de la placa (I). Debido a que los resultados mostraron que todos los puntos estacionarios evaluados corresponden a puntos de silla, se procedió a estimar las respuestas

máximas de la distancia horizontal mediante la curva de superficie y ecuación de cada variable, dentro de los rangos experimentales estudiados.

En la Figura 2, se muestra la curva característica de la variable respuesta distancia horizontal en cm (eje Y) para el fruto maduro.

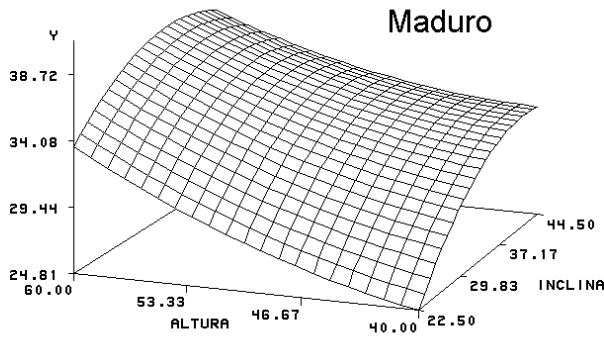


Figura 2. Superficie de respuesta para los frutos maduros.

En la Tabla 2 se muestran los parámetros de la ecuación de superficie de respuesta obtenida para cada uno de los elementos probados. La ecuación de segundo orden es de la forma:

$$DH = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 I + \beta_3 A^2 + \beta_4 AI + \beta_5 I^2 \quad (6)$$

Donde:

- DH: Distancia horizontal [mm]
- β_0 : Término independiente
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, β_4, β_5 : Coeficientes de A y de I
- A: Altura de caída [cm]
- I: Inclinación [grados]

Tabla 2. Parámetros de la ecuación de superficie de respuesta obtenida para cada uno de los elementos probados.

Elemento	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
Maduro	-3,75	-0,429	2,075	0,105	-0,008	-0,0221
Pinton	27,645	-2,261	2,960	0,031	-0,013	-0,029
Verde	-47,977	-0,405	5,007	0,016	-0,022	-0,053
Ramillete Maduro	-33,373	-0,891	4,255	0,017	-0,016	-0,044
Ramillete Pinton	-26,646	-1,067	3,986	0,019	-0,018	-0,040
Ramillete Verde	3,199	-1,159	2,606	0,015	-0,004	-0,0301
Secos	-3,203	-1,139	3,235	0,021	-0,018	-0,030
Sobremaduros	11,645	-0,951	1,933	0,015	-0,012	-0,017
Piedras	-55,459	-0,332	4,585	0,012	-0,018	-0,047
Puntillas	-19,742	-0,445	2,876	0,010	-0,010	-0,029

Para los frutos maduros utilizando la curva de superficie de respuesta y su respectiva ecuación se procedió a determinar los valores máximos de la variable respuesta distancia horizontal, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Distancias horizontales máximas calculadas de acuerdo a la altura de caída y el ángulo de inclinación para los frutos maduros.

Altura caída [cm] – ángulo inclinación [grados]	Distancia Horizontal (cm)
(60 – 38)	38,72
(60 – 40)	38,65
(60 - 45)	37,76

De igual forma, se procedió con los diferentes frutos y objetos duros. Los resultados se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores máximos calculados de la distancia horizontal de acuerdo a una altura de caída y un ángulo de inclinación, para las diferentes variables estudiadas.

Elemento	(A ,cm – I ,grados)	Distancia Horizontal [cm]
Maduro	(60 - 40)	38,65
Pintones	(60 - 40)	42,77
Verdes	(60 - 40)	47,88
Ramillete Maduro	(60 - 40)	34,10
Ramillete Pintón	(60 - 40)	34,11
Ramillete Verde	(60 - 40)	35,75
Seco	(60 - 40)	39,16
Sobremaduro	(60 - 40)	31,35
Piedras	(60 - 40)	32,70
Puntillas	(60 - 40)	35,72

Se procedió a determinar, de acuerdo con la Tabla anterior, la distancia óptima de separación de objetos duros del café cereza, así como la distancia óptima para separar los frutos verdes de acuerdo a la ecuación 5.

Una vez obtenida la distancia de separación de 37 cm como distancia

óptima, se procedió a realizar una prueba de separación por rebote a 12 muestras constituídas cada una por 160 frutos maduros y 40 objetos duros, utilizando una altura de caída de 60 cm, un ángulo de inclinación de 40°; los resultados de eficacia se muestran en la Tabla 5.

Con los resultados anteriores se procedió a efectuar un análisis de separación de frutos verdes, utilizando 12 muestras constituidas cada una por 120 frutos maduros y 40 frutos verdes, con una distancia de separación de 42 cm. En la Tabla 6 se observa la eficacia de separación de frutos verdes utilizando una altura de caída de 60 cm y un ángulo de inclinación de 40°.

Tabla 5. Análisis estadístico descriptivo de la eficacia de separación de objetos duros del café cereza.

Media [%]	51,50
Error Estándar	1,091
Mediana	50,99
Desviación Estándar	3,78
Varianza	14,28
Rango	13,66
Mínimo	44,86
Máximo	58,52
Coficiente de Variación [%]	7,34

Tabla 6. Análisis estadístico descriptivo de la eficacia de separación de frutos verdes del café cereza.

Media [%]	9,87
Error Estándar	0,63
Mediana	9,67
Desviación Estándar	2,19
Varianza	4,81
Rango	7,19
Mínimo	5,94
Máximo	13,13
Coficiente de Variación [%]	22,22

Los resultados obtenidos indican que el 9,87% de los frutos verdes puede ser separado de los frutos maduros utilizando este principio.

CONCLUSIONES

- Con el análisis de superficie de respuesta para las combinaciones de altura de caída e inclinación de la placa de rebote, se obtuvieron puntos sillas para todos los elementos estudiados en la variable respuesta distancia horizontal.
 - Las mayores distancias horizontales se lograron con una altura de caída de 60 cm y una inclinación de la superficie de rebote de 40°.
 - Utilizando una distancia de separación de 37 cm se obtuvo una eficacia de separación de objetos duros del café cereza maduro de 51,5%.
 - Utilizando una distancia de separación de 42 cm se obtuvo una eficacia de separación de frutos verdes del café cereza maduro de 9,87%.
- KRISHNAN, P; BERLAGE, A. G. and KLEIN E. Electrostatic separation of flower parts from onion seeds. *En: Transactions of the ASAE. Vol.28, No.5 (1985); p.1676-1679.*
- LONG, J. D.; HAMDY, M. and JOHNSON, W. H. Centrifugal force and wheat separation. *En: Agricultural Engineering. Vol.50, No. 16 (1969); p.578-580.*
- MARTÍNEZ R., A. *et al.* Investigaciones de la separación de los frutos de café mediante el principio de rebote. *En: Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. Vol. 2, No.3 (1.989); p. 15-26.*
- MISENER, G. C. and MCLEOD C. D. A resource efficient approach to potato- stone- clod separation. *En: Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. Vol.20, No.2 (1989); p.33-36.*
- _____ and _____. Evaluation of potato-stone-clod separation mechanisms. *En: Agricultural Engineering. Vol.29, No.2 (1987); p.169-171.*
- MOLFE, R. R; SINGH, A. K. and PUTHUR P. A. Roll-bounce firmnesseparation of blueberries. *En: Transactions of the ASAE. Vol.23, No.5 (1980); p.1.330-1.336.*

BIBLIOGRAFÍA

ARIAS, V. L. A. y LOZANO D., N. Diseño y evaluación de un clasificador neumático para café cereza. Cali, 1990. 85p. Tesis (Ingeniero Agrónomo). Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. Beneficio ecológico del café. Chinchiná: Cenicafé, 1995. 49p.

FELLER, R. and FOUX A. Oscillation screen motion effect on the particle passage through perforations. *En: Transactions of the ASAE. Vol.18, No.5 (1975); p.926-931.*

HALLIDAY, David and RESNICK, Robert. Física, parte 1. Mexico: Continental, 1980. p.197-258.

RESTREPO H.I. Desarrollo de un separador de objetos duros del café cereza, que no utilice agua. Medellín, 1997. 101p. Tesis (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.825

SARKAR, N. and WOLFE, R. Computer vision based system for quality separation of fresh. *En: Transactions of the ASAE. Vol.28, No.5 (1985); p.1.714-1.718.*

_____ and _____. Feature extraction techniques for sorting tomatoes by computer vision. *En: Transaction of the ASAE. Vol.28, No.3 (1985); p.970-974.*

SHELLENBERGER F. A.; MYERS, A. L. and MONROE G.E. Hand-carried, coffee-harvesting

Evaluación del principio de rebote.....

equipment. *En:* Transactions of the ASAE. Vol.12, No.6 (1969); p.63-765.

SRIVASTAVA, A.K. and AJIT, K. Engineering principles of agricultural machines. New York: American Society of Agricultural Engineering, 1993. p.489-498.

_____ and HAMDY, M.Y. Centrifugal grain - straw separation. Part 1: Theoretical analysis. *En:*

Transactions of the ASAE. Vol.17, No.2 (1974); p.198-201.

SRIVASTAVA, A.K. and HAMDY, M.Y. Centrifugal grain -straw separation. Part 2: *En:* Transactions of the ASAE. Vol.17, No.2 (1974); p. 200-204.