

Radiación gamma de ^{60}Co en características morfológicas y reproductivas de plantas M1 en *Coffea arabica* L.

Gamma radiation of ^{60}Co on morphological and reproductive characteristics of M1 plants in *Coffea arabica* L.

Carlos H. Avendaño-Arrazate¹ ,
Yeudiel Gómez-Simuta² ,
Misael Martínez-Bolaños¹ ,
Ismael Méndez-López¹ ,
Simitrio Ortíz-Curiel¹ ,
Rafael Ariza-Flores³ ,
Jaime Canul-Ku⁴ ,
Delfino Reyes-López^{5*} 

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)-Campo Experimental Rosario Izapa. Km. 18, Carretera Tapachula-Cacahotán, CP. 30870. Tuxtla Chico, Chiapas, México.

²Subdirección de Producción, Programa Moscamed-Moscacruz (SADER). CP. 30860. Metapa de Domínguez, Chiapas, México.

³Campo Experimental Iguala-INIFAP. Carretera, Iguala - Tuxpan km 2. Iguala, Guerrero, México.

⁴Campo Experimental Zacatepec-INIFAP. Carretera Zacatepec Galeana s/n, Centro, 62780 Zacatepec de Hidalgo, Morelos, México.

⁵Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad en Ciencias Agrícolas y Pecuarias. San José Acateno, Teziutlán Puebla, Puebla, México

*Autor de correspondencia:
delfino.reyes@correo.buap.mx

Artículo científico

Recibido: 06 de octubre 2020

Aceptado: 17 de abril 2021

Como citar: Avendaño-Arrazate CH, Gómez-Simuta Y, Martínez-Bolaños M, Méndez-López I, Ortíz-Curiel S, Ariza-Flores R, Canul-Ku J, Reyes-López D (2021) Radiación gamma de ^{60}Co en características morfológicas y reproductivas de plantas m1 en *Coffea arabica* L.. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 8(1): e2730. DOI: 10.19136/era.a8n1.2730

RESUMEN. Las especies comerciales de café presentan diferencias a nivel ploidia, incompatibilidad y autogamia, lo que reduce su uso para el mejoramiento genético convencional. El Objetivo del presente estudio fue conocer la radiosensibilidad con rayos gamma de ^{60}Co en café, variedad Oro Azteca, información indispensable para ser considerada en programas de mejoramiento genético por mutagénesis. Se utilizaron 345 semillas en cada tratamiento de café var. Oro Azteca, las cuales se irradiaron con rayos gamma de ^{60}Co a dosis de 0, 10, 50, 100, 200 y 300 Gy. Las semillas irradiadas se establecieron en un almacigo para su germinación, las plantas M1 se sembraron en macetas de 2 Kg de sustrato y posteriormente se llevaron a un lugar definitivo, distribuyendo los tratamientos en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Se evaluaron 15 variables de las cuales dos fueron de semilla, ocho de planta y cinco de fruto. Se calculó la DL_{50} para porcentaje de germinación y sobrevivencia de plantas mediante regresión exponencial y cuadrática. La GR_{50} se calculó para altura de planta y número de ramas mediante un modelo de regresión cuadrática II. En las demás variables se evaluó el efecto de las diferentes dosis de radiación. La DL_{50} para germinación fue de 60.4 Gy y de sobrevivencia de 177.8 Gy. La GR_{50} para altura de planta fue de 120.1 Gy y para número de ramas de 107.6 Gy. Para la mayoría de las variables la radiación gamma de ^{60}Co disminuyó significativamente sus valores a partir de los 100 Gy.

Palabras clave: DL_{50} , GR_{50} , mutaciones, mejoramiento, radiosensibilidad.

ABSTRACT. Commercial coffee species have differences at the ploidy, incompatibility and autogamy level, which reduces their use for conventional genetic improvement. The objective of the present study was to know the radiosensitivity with gamma rays of ^{60}Co in coffee, Oro Azteca variety, essential information to be considered in genetic improvement programs by mutagenesis. 345 seed were used in each treatment of Coffee var. Oro Azteca, which were irradiated with gamma rays of ^{60}Co at doses of 0, 10, 50, 100, 200 and 300 Gy. The irradiated seeds were established in a warehouse for their germination, the M1 plants were planted in pots of 2 kg of substrate and later they were taken to a final place, distributing the treatments in an experimental design of complete random blocks with four repetitions. 15 variables were evaluated of which two were seed, eight plant and five fruit. The LD_{50} for percentage of germination and plant survival was calculated by exponential and quadratic regression. The GR_{50} was calculated for plant height and number of branches using a quadratic regression model II. In the other variables, the effect of the different radiation doses was evaluated. The LD_{50} for germination was 60.4 Gy and for survival 177.8 Gy. The GR_{50} for plant height was 120.1 Gy and for the number of branches, 107.6 Gy. For most variables, the gamma radiation of ^{60}Co significantly decreased its values from 100 Gy.

Key words: LD_{50} , RG_{50} , mutations, improvement, radiosensitivity.

INTRODUCCIÓN

La producción de café en México es una de las actividades de gran importancia económica y social por ser rentable y con valor comercial para la industria (Medina *et al.* 2016). En México se siembran 62 9323 ha de café con una producción de 910 063 t y un rendimiento promedio de 1.44 t ha^{-1} (SIAP 2020). Presenta problemas de tipo biótico que limitan su producción, enfermedades como la roya (*Hemileia vastatrix* Berk & Br) y abióticos como el cambio climático, entre ellos la reducción de la precipitación, el cual hace al cultivo vulnerable, existiendo un riesgo de pérdida de la producción de café de 7 a 10% (Rivera *et al.* 2013).

Existen más de 130 especies del género *Coffea*. Sin embargo, los de importancia comercial se limita a *Coffea arabica* L., *Coffea conephora* y *Coffea liberica* Bull, las cuales presentan diferencias a nivel ploidía e incompatibilidad, lo que reduce su uso para el mejoramiento genético convencional, el cual se basa en la selección, obtención de cruza y retrocruza (Villalta-Villalobos y Gatica-Arias 2019). Proceso que requiere alrededor de 30 años para obtener un nuevo cultivar (Melese 2016). La selección de genotipos deseables se basa en la variabilidad existente entre y dentro de las poblaciones (Mena y Lépiz 2017), otra de las alternativas que se utiliza para generar variabilidad genética en diversos cultivos de manera inducida es la mutagénesis utilizando rayos gamma de ^{60}Co (Pooja y Srivastava 2015), debido a que su aplicación es sencilla, penetración elevada en el tejido, reproducción y alta frecuencia de mutación (Hasbullah *et al.* 2012).

En los últimos años se ha intensificado la utilización de las mutaciones radioinducidas en el mejoramiento genético en diferentes especies, en ornamentales (Chanchula *et al.* 2015, Giovannini *et al.* 2015, Patil *et al.* 2015, Deshmukh y Malode 2018, Billore *et al.* 2019), en frijol (Martirena *et al.* 2019), pasto africano (Álvarez-Holguín *et al.* 2018), cacahuete (Brito y Ángeles 2016), ajo (Pardo 2015), soya, trigo y girasol (Foroughbakhch-Pournavab *et al.* 2015), papa (Salomon *et al.* 2017), vainilla (Reyes-López *et al.* 2018). En la base de datos de IAEA

(Organismo Internacional de Energía Atómica) están enlistadas 3 332 variedades registradas que se han obtenido por mutagénesis radioinducida que incluye diversas especies de plantas como cereales, ornamentales y leguminosas. Sin embargo, para el cultivo de café no hay registros de variedades mutantes (IAEA 2020).

Considerando que el café es una planta autógama, su variabilidad genética es reducida aunado a que presenta autoincompatibilidad genética y poliploidía en especies comerciales, es necesario iniciar programas de mejoramiento genético por mutagénesis radioinducida como un complemento al mejoramiento genético convencional (Villalta-Villalobos y Gatica-Arias 2019). Para iniciar un programa de mejoramiento genético por mutagénesis, se debe determinar la dosis del mutágeno; DL_{50} y GR_{50} que permita una óptima frecuencia de mutantes en la población objetivo (Lamo *et al.* 2017). La determinación de dichos parámetros permite incrementar la posibilidad de éxito para generar mutantes toda vez que la respuesta radiosensible es diferencial debido al genotipo, cantidad de ADN, nivel de ploidía y contenido de agua (Horn y Shimelis 2013). Además, los cambios morfológicos, estructurales y funcionales van a depender de la intensidad y duración de la dosis de radiación gamma aplicada (Wi *et al.* 2005). Debido a que actualmente no se cuenta con información sobre el efecto de rayos gamma de ^{60}Co (DL_{50} y GR_{50}) para café en México. El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la radiosensibilidad de café, var. Oro Azteca a los rayos gamma de ^{60}Co , información indispensable para ser considerada en programas de mejoramiento genético por mutagénesis.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material biológico e irradiación

Se utilizó semillas de café var. Oro Azteca, que se sometieron a diferentes dosis de radiación con rayos gamma de ^{60}Co , que constituyeron los tratamientos: T1 (0 Gy), T2 (10 Gy), T3 (50 Gy), T4 (100 Gy), T5 (200 Gy) y T6 (300 Gy), se utilizaron 345 semillas en cada tratamiento. Las dosis

se determinaron mediante el sistema de dosimetría Gafchromic y una cámara de ionización RADCAL modelo Accudose. El irradiador fue un equipo panorámico Gamma Beam 127 MDS Nordion, con fuente de almacenamiento de 50 g de cobalto ^{60}Co en seco.

Establecimiento del experimento

El experimento se llevó a cabo en tres fases (abril de 2015 a noviembre de 2018) en las instalaciones del Campo Experimental Rosario Izapa del INIFAP ubicado en el Municipio de Tuxtla Chico, Chiapas, México ($14^{\circ} 40' \text{ LN}$ y $92^{\circ} 10' \text{ LO}$, y 435 msnm). La primera fase consistió en sembrar las semillas irradiadas en un almacigo para determinar el porcentaje de germinación, con un sustrato a base de suelo y arena con una proporción de 2:1, con textura franco arenosa, pH de 6.1 y 3.0% de materia orgánica. La segunda fase consistió en poner las plántulas emergidas en macetas de 2 kg de sustrato y la tercera fase fue establecer las plantas en un lugar definitivo en campo, a las cuales se les denominaron plantas M1, por ser la primera generación de plantas derivadas de semillas irradiadas.

Diseño experimental y variables registradas

Las plantas M1, se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Cada repetición consistió de 12 plantas las cuales se sembraron en marco real de 2 m x 1.5 m, se registraron 15 variables en diferentes fases de crecimiento. Porcentaje de germinación (PG) medida a los 45 días después de la siembra (DDS), porcentaje de sobrevivencia (PS), número de hojas (NH), medidas a los 90 DDS, altura de planta (AP), número de ramas por planta (NRPP), número de frutos por planta (NFPP) medidas a los 720 días DDS, peso de frutos por planta (PFP), peso de 100 frutos (P100F), peso de frutos vanos (PFV), porcentaje de frutos vanos (POFV), incidencia de enfermedades de roya anaranjada (Roya) (*Hemileia vastatrix*), antracnosis (Antra) (*Colletotrichum* sp), mancha por Cercospora (Cerc) (*Cercospora coffeicola*), y ojo de gallo (OGa) (*Mycena citricolor*), medidas a los 1240 DDS. Para la evaluación de la incidencia de enfermedades, en

cada una de las plantas dentro de cada tratamiento, se seleccionaron cuatro ramas en el segundo tercio altitudinal y de cada rama se contabilizó el número de hojas y número de hojas con presencia de síntomas de las enfermedades de interés. La incidencia por planta se determinó con base al promedio de hojas totales y hojas enfermas en las cuatro ramas seleccionadas.

Análisis estadístico

La estimación de la DL_{50} para germinación de semillas y sobrevivencia de plantas se realizó mediante los parámetros de modelos de regresión exponencial y cuadrática, mientras la GR_{50} para altura de planta y número de hojas, se realizó con los parámetros de modelos de regresión cuadrática I y II. La selección del mejor modelo se llevó a cabo con base al mayor valor de coeficiente de determinación simple o ajustada, diferencia no significativa en la prueba de falta de ajuste y el menor valor del criterio de información de Akaike (AIC) Ramírez *et al.* (2006). La evaluación de los modelos, análisis de varianza, comparación de medias con la prueba de Dunnett y la comprobación de los supuestos de los modelos respectivos se llevaron a cabo con el paquete estadístico SAS versión v9 (SAS Institute 2002). Por otra parte, las regiones de radiosensibilidad (estimulación, transición e inhibición) se determinaron de acuerdo con lo propuesto por Ramírez *et al.* (2006). Las variables del componente de rendimiento y los valores de porcentaje de incidencia para cada una de las enfermedades evaluadas se analizaron mediante ANOVA y pruebas de comparación de medias Tukey, 0.05.

RESULTADOS

Germinación y sobrevivencia

A los 45 DDS el porcentaje de germinación de semillas en T1 fue de 86.29%, mientras que, en los demás tratamientos con radiación, se presentó una tendencia a disminuir el porcentaje de germinación con el incremento de la dosis de radiación. T2 y T3 registraron el 61.44 y 54.15% de germinación respectivamente, que corresponden a disminuciones

de 28.79 y 37.24%, respecto a T1. Las radiaciones altas como en T6 (300 Gy) inhabilitaron la germinación, ya que registró 99.33% de semillas que no germinaron. La DL_{50} para germinación fue de 60.4 Gy, mediante los parámetros de regresión exponencial negativa con un coeficiente de determinación de 0.95 (Figura 1a).

Para sobrevivencia de plantas, en T1, T2, T3 y T4 no se observó mortalidad de plantas a los 90 DDS. Sin embargo, en T5 y T6 la sobrevivencia de plantas fue afectada drásticamente, ya que en T5 se registró una mortalidad del 50% del número inicial de plántulas emergidas, mientras que en T6, las plántulas no sobrevivieron. La DL_{50} para sobrevivencia de plantas se estimó en 177.88 Gy, mediante los parámetros de regresión cuadrática I (Figura 1b).

Características morfológicas

En altura de planta a los 720 DDS, T1, T2, y T3, presentaron valores de 82.99, 87.08 y 86.59 cm, respectivamente, dichos valores no fueron estadísticamente diferentes (Figura 2A). Sin embargo, T4 registró un valor de 59.48 cm, resultado estadísticamente diferente ($p \leq 0.05$) en lo que se refiere a los demás tratamientos, lo que se infiere que la radiación gamma de ^{60}Co en semillas de café var. Oro Azteca afecta de forma significativa la altura de planta a partir de los 100 Gy.

Para el número de ramas por planta a los 720 DDS en T1, T2 y T3 fueron en un rango de 14 a 16, valores que no fueron estadísticamente diferentes (Figura 2B). Sin embargo, en T4, disminuyó de forma significativa a ocho ramas por planta. En relación con el número de hojas en T1 se registró un promedio de 190 hojas por planta. T2 y T3 no fueron estadísticamente diferentes con relación a T1. Sin embargo, en T2, se registró el mayor número de hojas por planta (225 hojas). De igual forma que en número de ramas, T4 resultó estadísticamente diferente comparado con T1 (111 hojas por planta) (Figura 2C).

En lo que se refiere a GR_{50} para altura de planta y número de ramas (Tabla 1) se encontró en 120.12 Gy y 107.78 Gy, respectivamente, debido a que ambas variables presentaron en el modelo de regresión lineal cuadrático II, el mayor coeficiente de

determinación ajustada y menor valor de IAC. No fue posible determinar la GR_{50} para número de hojas por presentar coeficientes de determinación ajustada de 0.42 y 0.28 para los modelos de regresión cuadrática I y II respectivamente. El intervalo de transición estuvo entre 10 y 100 Gy (Tabla 2). La región de inhibición para la germinación se estimó que es a partir de dosis superiores a 50 Gy, mientras que, para la sobrevivencia, altura de planta y número de ramas por planta fue de 100 Gy.

Efecto de la radiación gamma de ^{60}Co en componentes de rendimiento e incidencia de enfermedades

El comportamiento de los componentes del rendimiento a los 1240 DDS, fue variable dependiendo de la dosis de radiación. Pero en todas se observó diferencias significativas. Los resultados para PFP y P100F en T1 se obtuvo el valor más alto (856 y 119.9, respectivamente) y el más bajo en T4 (110.2 y 18.5, respectivamente); mientras que para PFV y POFV el valor más alto fue para T3 (128.2 y 18.4, respectivamente) y en el más bajo para T4 (23.2 y 6.1, respectivamente) (Tabla 3).

Con respecto al porcentaje de incidencia de enfermedades a los 1240 DDS, se encontró que la antracnosis y roya anaranjada fueron las principales enfermedades distribuidas en toda la parcela con una incidencia del 12.24 y 6.12%, (Tabla 3), respectivamente. Sin embargo, el comportamiento de las cuatro enfermedades fue estadísticamente igual, solo para antracnosis presentó la menor incidencia con T3 (50 Gy).

Los rayos gamma de ^{60}Co tuvieron efectos significativos en las variables del componente de rendimiento (Tabla 4), para la variable NRPP el valor máximo de los tratamientos irradiados estuvo por arriba de T1. Pero en el T3 fue mayor el porcentaje de plantas (54%) que presentaron valores máximos por arriba de T1. La variable NFPP se observó que T1 presentó un valor máximo de frutos por planta, y los tratamientos T2 y T3 presentaron los valores más altos de PFP y T3 y T4 el valor más alto de P100F. En la variable PFV fueron T2 y T3 los que presentaron valores más altos, pero solamente el T4 presentó me-

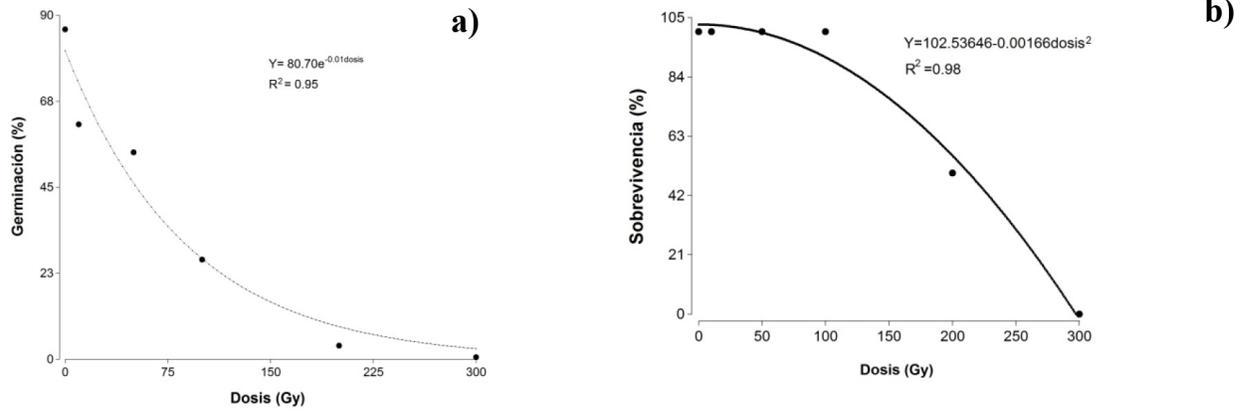


Figura 1. a) Regresión exponencial y b) Regresión cuadrática para la determinación de DL_{50} en porcentaje de germinación y sobrevivencia, respectivamente.

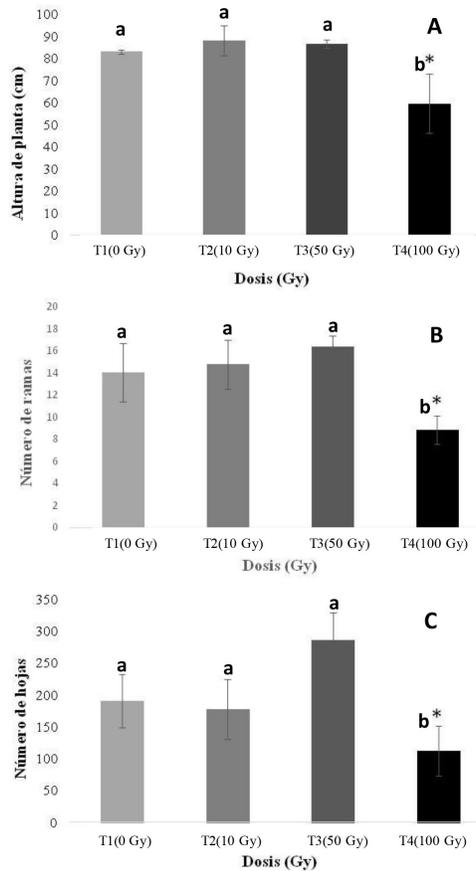


Figura 2. Efecto de la radiación gamma de ^{60}Co en altura de planta (A), número de ramas (B) y número de hojas (C) en plantas M1 de café var. Oro Azteca. Medias con letras iguales son estadísticamente iguales entre sí (Tukey, 0.05).

Tabla 1. Modelos de regresión lineal y cuadrática para la determinación de la GR₅₀ de altura de planta y número de ramas en función de la dosis de radiación gamma de ⁶⁰Co.

| Altura de Planta | | | | | | |
|------------------|----------------|-------------------------|-----------------|-------|---|------------------|
| Modelo | R ² | R ² Ajustado | Falta de ajuste | AIC | Ecuación | GR ₅₀ |
| Cuadrático II | 0.77 | 0.72 | 0.75 | 49.87 | Y = 83.78533 + 0.37199x - 0.00616x ² | 120.12 |
| Cuadrático I | 0.69 | 0.66 | 0.28 | 51.32 | Y = 87.71642 - 0.00268x ² | 131.32 |
| Número de Ramas | | | | | | |
| Modelo | R ² | R ² Ajustado | Falta de ajuste | AIC | Ecuación GR ₅₀ | GR ₅₀ |
| Cuadrático II | 0.74 | 0.70 | 0.67 | 22.30 | Y = 13.82954 + 0.14815x - 0.00197x ² | 107.78 |
| Cuadrático I | 0.50 | 0.54 | 0.02 | 29.43 | Y = 15.39511 - 0.00059012x ² | 119.05 |

AIC = Criterio de información de Akaike.

Tabla 2. Intervalo de las regiones de radiosensibilidad de semillas de café var. Oro Azteca a los rayos gamma de ⁶⁰Co.

| Variable | DL ₅₀ | GR ₅₀ | Estimulación | Transición | Inhibición |
|----------|------------------|------------------|--------------|------------|------------|
| PG | 60.4 | - | - | 10-50 | >50 |
| PS | 177.8 | - | - | 10-100 | >100 |
| AP | - | 120.1 | - | 10-100 | >100 |
| NR | - | 107.7 | - | 10-100 | >100 |

PG = Porcentaje de germinación; PS = Porcentaje de sobrevivencia; AP = Altura de planta; NR = Número de ramas.

Tabla 3. Efecto de los rayos gamma de ⁶⁰Co en los componentes del rendimiento y la incidencia de enfermedades en café var. Oro Azteca a los 1240 DDS.

| Tra | PFP g | P100F g | PFV g | POFV g | Antra % | Roya % | Cerc % | OGa % |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| T1 | 856.0 ^a | 119.9 ^a | 116.9 ^a | 13.71 ^a | 12.24 ^{ab} | 6.12 ^a | 0.70 ^a | 0.23 ^a |
| T2 | 853.5 ^a | 97.5 ^{ab} | 92.07 ^a | 14.37 ^a | 18.94 ^a | 8.63 ^a | 2.41 ^a | 0.00 ^a |
| T3 | 600.7 ^a | 84.59 ^b | 128.2 ^a | 18.4 ^a | 8.61 ^b | 5.59 ^a | 2.11 ^a | 0.00 ^a |
| T4 | 110.2 ^b | 18.55 ^c | 23.27 ^b | 6.1 ^b | 16.9 ^a | 6.71 ^a | 1.15 ^a | 0.00 ^a |

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05). Tra = Tratamiento; PFP = Peso de frutos por planta; P100F = Peso de 100 frutos; PFV = Peso de frutos vanos; POFV = Porcentaje de frutos vanos; Antra = Incidencia de antracnosis; Roya = Incidencia de roya; Cerc = Incidencia de mancha por cercospora; OGa = Incidencia de ojo de gallo.

Tabla 4. Valores máximos y porcentaje de plantas por arriba del promedio de T1 en los componentes del rendimiento en café var. Oro Azteca a los 1240 días después de la siembra.

| Tra | NRPP | NFPP | PFP (g) | P100F (g) | PFV (g) |
|-------------|----------|------------|------------|--------------|------------|
| T1 (0 Gy) | (43) 48% | (2547) 37% | (3012) 37% | (172) 70% | (505) 37% |
| T2 (10 Gy) | (47) 44% | (2340) 25% | (3227) 27% | (162) 42% | (729) 29% |
| T3 (50 Gy) | (46) 54% | (1954) 27% | (3989) 35% | (174) 44% | (571) 37% |
| T4 (100 Gy) | (45) 23% | (1316) 27% | (1790) 4% | (176) 10% | (380) 6% |

Valores máximos entre paréntesis y porcentaje de plantas por arriba del promedio de T1; Tra = Tratamiento, NRPP = Número de ramas por planta, NFPP = Número de frutos por planta, PFP = Peso de frutos por planta, P100F = Peso de 100 frutos, PFV = Peso de frutos vanos.

nor valor de PFV y menor porcentaje de frutos vanos.

DISCUSIÓN

Germinación y sobrevivencia

El efecto de la radiación gamma de ⁶⁰Co en la

germinación de semillas y sobrevivencia en plántulas de café varió según la dosis de radiación, ya que se encontró una tendencia a disminuir de manera significativa estos parámetros al aumentar la dosis, debido a que 300 Gy inhabilitó la germinación de semillas y se registró el 100% de mortalidad de plántulas por

lo que se infiere que para café, 300 Gy se puede considerar dosis altas con efectos negativos en estas variables, siendo 60.4 Gy la dosis recomendada para obtener una germinación y sobrevivencia de plántulas por arriba del 50%, lo que permite seguir con el proceso de selección en plantas sobrevivientes. Estos resultados coinciden con lo reportado por diversos autores en otras especies que se han irradiado con ^{60}Co , por ejemplo, Salomon *et al.* (2017) mencionan que la dosis recomendada de radiación con gammas de ^{60}Co para inducir mutaciones en semillas de papas de 20 a 40 Gy, presentando dosis mayores reduce drásticamente la emergencia de plantas. Mientras que Díaz-López *et al.* (2016) reportan una DL_{50} para germinación en Jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) con dosis de radiación gamma de 500 a 1000 Gy. En tanto que, Álvarez-Holguín *et al.* (2018) encontraron al irradiar semillas de pasto africano una DL_{50} a 2076 Gy y la GR_{50} fluctuó entre 1357 y 1900 Gy por lo que recomiendan para el mejoramiento genético de esta especie irradiar a 1533 Gy para ambos parámetros. Al respecto, Dada *et al.* (2018) reportaron que la DL_{50} en tres variedades de café (Mundo Novo, Kents y Geisha) fue en el rango de 12 Gy, al utilizar desde 0 hasta 25 Gy para inducir mutaciones en estacas enraizadas. Mientras que Lamo *et al.* (2017) mencionan los logros que se han tenido en varios frutales de interés comercial mediante la inducción de mutaciones genéticas con rayos gamma. Por otra parte, Martirena *et al.* (2019) en un trabajo donde irradiaron callos y nudo cotiledonal y semillas de frijol, encontraron que el mejor tratamiento fue la radiación de semillas a 100 Gy. En algunos otros casos la radiación gamma de ^{60}Co , no afecta los procesos de germinación en semillas como en uchuva (*Physalis peruviana* L.) donde la radiación no afectó su germinación, pero favoreció la emergencia (Antúnez-Ocampo *et al.* 2017). En Chile de agua (*Capsicum annum*), López-Mendoza *et al.* (2012), reportan que la radiación gamma no afectó la germinación a dosis de 20 a 120 Gy. Pero Ramírez *et al.* (2006) mencionan que la radiación puede ayudar en la germinación de diversas especies hortícolas y cereales cuando estas presentan latencia o cuando las condiciones ambientales limitan la germinación. En lo referente

a los efectos fisiológicos de la radiación gamma de ^{60}Co se han reportado diversos efectos, al respecto Lokesha *et al.* (1992) y Hameed *et al.* (2008) reportan que la inhabilidad de la semilla para germinar a altas dosis de rayos gamma puede atribuirse a cambios histológicos y citológicos, disrupción y desorganización de la túnica de la semilla, interrupción de la mitosis celular en las zonas meristemáticas durante la germinación, síntesis de proteína, balance hormonal o intercambio de gas en la hoja. Mientras que Kovács y Keresztes (2002) mencionan que también se relaciona con la formación de radicales libres en las semillas irradiadas.

En relación a sobrevivencia, Abdullah *et al.* (2009) reportan en cúrcuma un promedio de sobrevivencia del 50% con 20 Gy y solo del 2% a 40 Gy. En tanto que Antúnez-Ocampo *et al.* (2017) encontraron que a dosis mayores de 275 Gy la supervivencia en *Physalis peruviana* L. es afectada de manera drástica. Para vainilla (*Vanilla planifolia* G. Jackson), Reyes-López *et al.* (2018) encontraron al irradiar esquejes el mayor porcentaje de sobrevivencia se tuvo a dosis menores de 35 Gy. Mientras que Minisi *et al.* (2013) reportan que en *Moluccella laevis* L. obtuvieron el 100% de sobrevivencia con 20 Kr.

Características morfológicas

La radiación gamma de ^{60}Co afectó significativamente ($p \leq 0.05$) la altura de planta y el número de ramas por planta con dosis de 100 Gy. Para número de hojas y ramas, aunque estadísticamente no fueron significativos T1, T2 y T3, numéricamente se observa mayor número de hojas y ramas a los 50 Gy (Figura 2), esto es importante, ya que, estas variables influyen en el rendimiento. La tendencia de disminuir la altura de planta al aumentar la dosis de radiación se ha reportado en *Physalis peruviana* (Antúnez-Ocampo *et al.* 2017), cacahuete (Brito y Angeles 2016), papa (Salomon *et al.* 2017) y lenteja (Roy *et al.* 2019). La reducción del tamaño de planta en el cafeto permitirá incrementar el número de plantas por unidad de superficie y con ello mayor eficiencia en el uso del suelo. En relación al número de hojas Kara *et al.* (2016), reportan que el número de hojas en soya disminuye al irradiar con dosis de 0 a 500 Gy. Por otro

lado, Antúnez-Ocampo *et al.* (2017) mencionan que no encontraron diferencias estadísticas significativas en número de hojas cuando se irradiaron con rayos gamma semillas de *Physalis peruviana* L.

Efecto de la radiación gamma de ^{60}Co en componentes de rendimiento e incidencia de enfermedades

La radiación no presentó diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) en la mayoría de las enfermedades consideradas en el presente estudio. Pero numéricamente se observa una disminución a partir de los 100 Gy. Los componentes del rendimiento fueron afectados de manera significativa ($p \leq 0.05$) a dosis de 100 Gy, por lo que en trabajos futuros de mejoramiento genético en café por mutagénesis, se podrían considerar dosis más estrechas a partir de los 50 Gy para no afectar dichos componentes del rendimiento que son parámetros importantes al momento de seleccionar plantas con características agronómicas deseables. Resultados similares son reportados por Olasupo *et al.* (2016), quienes encontraron en ocho accesiones de Cowpea (*Vigna unguiculata*) un aumento de frutos por planta a 100 Gy. Sin embargo, a partir de los 200 Gy disminuye drásticamente. También Alvarez-Holguin

et al. (2018), reportan disminución de número de semillas por planta al aumentar la dosis de radiación en pasto africano. Mientras que Mei *et al.* (1994) y Li *et al.* (2007) mencionan que las características más favorables que se inducen con rayos gamma son la precocidad en la madurez, altos rendimientos y resistencia a enfermedades.

CONCLUSIONES

Con los datos obtenidos sobre la DL_{50} para germinación, sobrevivencia de plantas y GR_{50} para altura de planta y número de ramas, así como el efecto que tuvo la radiación gamma de ^{60}Co en algunos de los componentes del rendimiento, la dosis de radiación que puede tener mayor probabilidad de producir mutaciones útiles en un programa de mejoramiento genético por mutaciones inducidas en café var. Oro Azteca es de 60 a 150 Gy, información relevante para inducir modificaciones genéticas que den como resultado fenotipos que pueden ser seleccionados para mitigar el efecto de limitantes bióticas y abióticas que reducen la producción de café en México.

LITERATURA CITADA

- Abdullah TL, Endan J, Nazir BM (2009) Changes in flower development, chlorophyll mutation and alteration in plant morphology of *Curcuma alismatifolia* by gamma irradiation. *American Journal Applied Science* 6: 1436-1439.
- Álvarez-Holguín A, Morales-Nieto CR, Avendaño-Arrazate CH, Santellano-Estrada E, Melgoza-Castillo A, Burrola-Barraza ME, Corrales-Lerma R (2018) Dosis letal media y reducción media del crecimiento por radiación gamma en pasto africano (*Eragrostis lehmanniana* Ness). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 5: 81-88.
- Antúnez-Ocampo OM, Cruz-Izquierdo S, Sandoval-Villa M, Santacruz-Varela A, Mendoza-Onofre LE, y De la Cruz-Torres E (2017) Variabilidad inducida en caracteres fisiológicos de *Physalis peruviana* L. mediante rayos gamma ^{60}Co aplicados a la semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 40: 211-218.
- Billore V, Shriram JM, Suprasanna P, Jain M (2019) Gamma irradiation induced effects on in vitro shoot cultures of *Dendrobium sonia orchid*. *Biotechnology Reports* 22: 1-7.
- Brito DA y Ángeles EA (2016) Inducción de Mutaciones con ^{60}Co y selección de quimeras en cacahuete (*Arachis hypogaea*) Tipo virginia. *Acta Universitaria* 26: 11-17.

- Chanchula N, Taychasinpitak T, Jala A, Thanananta T, and Kikuchi S (2015) Radiosensitivity of in vitro cultured *Torenia fournieri* Lind. From Thailand by γ -ray irradiation. International Transaction Journal of Engineering, Management, Applied Sciences Technologies 6: 157-164.
- Dada KE, Anagbogu CF, Forster BP, Muiyiwa AA, Adenuga OO, Olaniyi OO, Bado S (2018) Biological effect of gamma irradiation on vegetative propagation of *Coffea arabica* L. African Journal of Plant Science 12: 122-128.
- Deshmukh PD and Malode SN (2018) Effects of gamma radiation on seed germination, plant survival and growth characteristics in *Dianthus caryophyllus* var. Chabaud. Journal of Global Biosciences 7: 5403-5410.
- Díaz-López E, Morales-Ruiz A, Olivar-Hernández P, Hernández-Herrera ME, Marín-Beltrán JF, León de la-Rocha JM, García-Andrade (2016) Radiosensitivity with rays gamma of ^{60}Co at seeds of Jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) to determine LD₅₀. Scholars Journal of Agriculture and Veterinary Sciences 3: 93-95.
- Foroughbakhch-Poumavab R, Bacópulos-Mejía E, Benavides-Mendoza A (2015) Efecto de la irradiación con UV-C en la germinación y vigor de tres especies vegetales. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 2: 129-137.
- Giovannini A, Scariot V, Caser M, Buttafava A, Mansuino A, Ghione GG, Savona M, Sabatini ME, Carbonera D, y Balestrazzi (2015) Mutation breeding using gamma-rays to increase seed germination in *Rosa hybrida*. Acta Horticulturae 1087: 373-378.
- Hameed A, Mahmud TS, Atta BM, Haq MA and Sayed H (2008) Gamma irradiation effects on seed germination and growth, protein content, peroxidase and protease activity, lipid peroxidation in desi and kabuli chickpea. Pakistan Journal Botany 40: 1033-1041.
- Hasbullah NA, Taha RM, Saleh A, Mohamed N (2012) Physiological responses of callus from *Gerbera jamesonii* Bolus ex. Hookf. to gamma irradiation. Brazilian Archives of Biology and Technology 55: 411-416.
- Horn L, Shimelis H (2013) (Radio-sensitivity of selected cowpea (*Vigna unguiculata*) genotypes to varying gamma irradiation doses. Science Research Essays 8: 1991-1997.
- IAEA. (2020). Mutant Variety Database. Disponible en línea <https://mvd.iaea.org>. Fecha de consulta: 6 de Julio 2020.
- Kainthura P and Srivastava R (2015) Induction of genetic variability and Isolation of mutants in tuberose (*Polygonum tuberosum* L.). Tropical Agricultura Research 26: 721-732.
- Kara Y, Ertem VH, and Kuru A (2016) Gamma radiation effects on crude oil yield of some soybean seeds: Functional properties and chemical composition of glycine max-ataem-7 seeds. Tropical Journal of Pharmaceutical Research 15: 2579-2585.
- Kovács E and Keresztes Á (2002) Effect of gamma and UV-B/C radiation on plant cells. Micron 33: 199-210.
- Lamo K, Bhat DJ, Kour K, Solanki SPS (2017) Mutation Studies in Fruit Crops: A Review. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 6: 3620-3633.
- Li Y, Liu M, Cheng Z, Sun Y (2007) Space environment induced mutations prefer to occur at polymorphic sites of rice genomes. Advanced in Space Research 40: 523-527.
- Loksha R, Vasudeva R, Shashidhar HE, Reddy ANY (1992) Radio-sensitivity of *Bambusa arundinacea* to gamma rays. Journal Tropical Forest Science 6: 444-450.
- López-Mendoza H, Carrillo-Rodríguez JC, and Chávez-Servia JL (2012) Effects of gamma-irradiated seeds on germination and growth in *Capsicum annum* L. plants grown in a greenhouse. Acta Horticulturae 947: 77-81.

- Martirena RA, Veitia RN, Rodríguez GL, Collado LR, Rodríguez TD, Rivero QL, Ramírez-López M (2019) Efecto de diferentes explantes irradiados en la regeneración *in vitro* de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar "ICA Pijao". Acta biológica Colombiana 24: 13-25.
- Medina-Meléndez JA, Ruiz-Nájera RE, Gómez-Castañeda JC, Sánchez-Yáñez JM, Gómez-Alfaro G, Pinto-Molina O (2016) Estudio del sistema de producción de café (*Coffea arabica* L.) en la región Frailesca, Chiapas. CienciaUAT 10: 33-43.
- Mei M, Deng H, Lu Y, Zhuang C, Liu Z, Qiu Q, Qiu Y, Yang TC (1994) Mutagenic effects of heavy ion radiation in plants. Advanced in Space Research 14: 363-372.
- Melese K (2016) The role of biotechnology on coffee plant propagation: A current topics paper. Journal of Biology Agriculture and Healthcare 6: 13-19.
- Mena MS y Lepiz IR (2017) Genética y genotecnia. Colegio de postgraduados, México. 190p.
- Minisi AF, El-mahrouk ME, Rida El-Din FM, and Nasr MN (2013) Effects of gamma radiation on germination, growth characteristics and morphological variations of *Moluccella laevis* L. American-Eurasian Journal Agricultural & Environmental Science 13: 696-704.
- Olasupo FO, Olumuyiwall C, Forster BP and Bado S (2016) Mutagenic Effects of Gamma Radiation on Eight Accessions of Cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.). American Journal of Plant Sciences 7: 339-351.
- Pardo-Roldán A (2015) Mutagénesis inducida en microbulbos de *Allium sativum* L. Acta Agronómica 64: 254-259.
- Patil HU, Deshmukh GN, Kazi NA (2015) Mutation Breeding in Chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora* T.). Asian Journal of Multidisciplinary Studies 3: 25-27.
- Pooja K, Ranjan S (2015) Induction of Genetic Variability and Isolation of Mutants in Tuberose. (Polianthes tuberosa L) Tropical Agricultural Research 26: 721 ? 732
- Ramírez R, González LM, Camejo Y, Zaldívar N, Fernández Y (2006) Estudio de radiosensibilidad y selección del rango de dosis estimulantes de rayos X en cuatro variedades de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). Cultivos Tropicales 27: 63-67
- Reyes-López D, Huerta-Lara M, Avendaño-Arrazate CH, Silva-Gómez SE, De la Cruz-Torres E, García-Andrade JM, Martínez-Bolaños M (2018) Efectos de rayos gamma (^{60}Co) en esquejes de vainilla (*Vanilla planifolia* G. Jackson): In: Balcázar GM, Cortina RGE, Díaz SAC, De la Cruz-Sánchez E, Escobar AL, Ortiz SJJ, Rodríguez RRG, Tejeda VSA (eds.) 60 años del nacimiento de las instituciones nucleares en México. ININ-SUTIN. Estado de México, México. pp: 243-250.
- Rivera SMR, Nikolskii GL, Castillo ÁM, Ordaz ChVM, Días PG, Guajardo PRA (2013) Vulnerabilidad de la producción del café (*Coffea arabica* L.) al cambio climático global. Terra Latinoamericana 31: 305-313.
- Roy A, Sen S, Bhattacharyya PK, Nath R and Bhattacharyya S (2019) Determination of effective dose of gamma irradiation for lentil seed mutagenesis. International Journal of Chemical Studies 7: 154-156.
- Salomón JL, González CM, Castillo C, Varela M (2017) Comportamiento de Barna, cultivar de papa (*Solanum tuberosum* L.) ante diferentes dosis de rayos gamma de fuente cobalto 60. Cultivos Tropicales 38: 127-130.
- SAS (2002) User's Guide of SAS. Statistical Analysis System. SAS Institute Inc. Cary, N. C. USA. 550p.
- SIAP (2020) Sistema de Información Agropecuaria. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación-México. www.siap.gob.mx Fecha de consulta: 4 de abril de 2020.

Villalta-Villalobos J y Gatica-Arias A (2019) Una mirada en el tiempo: mejoramiento genético de café mediante la aplicación de la biotecnología. *Agronomía Mesoamericana* 30: 577-599.

Wi SG, Chung BY, Kim JH, Baek MH, Lee JW, Kim JS (2005) Ultrastructural changes of cell organelles in *Arabidopsis* stem after gamma irradiation. *Journal Plant Biology* 48: 195-200.