

Caracterización morfológica de líneas promisorias de cambur (*Musa AAA*) obtenidas a partir de la irradiación con rayos X

Elba N. Vallejo de Astudillo^{1*}, Efraín G. Salazar Yamarte^{1†}, Iselen Trujillo², Luis Castro¹.

¹Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP). Maracay, Aragua, Venezuela. ²Universidad Experimental Simón Rodríguez (UNESR), Instituto de Estudios Científicos y Tecnológicos (IDECYT). Los Altos del Cují, Miranda, Venezuela. *Correo electrónico: vallejoelba@gmail.com

RESUMEN

Las musáceas comestibles en Venezuela tienen una alta demanda debido a sus propiedades alimenticias, su producción está destinada principalmente al consumo interno. El cambio climático ha traído diversas consecuencias, entre las cuales se puede mencionar la disminución de precipitaciones, siendo las musáceas afectadas negativamente por su sensibilidad al déficit hídrico. La obtención de materiales tolerantes a ambientes con menor disponibilidad de agua, es una necesidad del mejoramiento genético de esta especie. Con la finalidad de seleccionar líneas promisorias tolerantes a condiciones de sequía, se caracterizaron morfológicamente plantas de cambur sub grupo Cavendish (*Musa AAA* cv Pineo Gigante) provenientes de yemas irradiadas con rayos X a una dosis de 30 Gy. Se evaluó y comparó el crecimiento de plantas in vitro provenientes de las yemas irradiadas y no irradiadas, considerando las siguientes variables: altura de planta, grosor de pseudotallo, número de hojas y área foliar, observándose diferencias significativas entre ambos grupos. Las plantas provenientes de yemas irradiadas mostraron valores mayores en las variables evaluadas, en comparación con las plantas de cambur provenientes de yemas no irradiadas, en condiciones de sequía. La emisión de la hoja bandera en el material irradiado ocurrió a los siete días, mientras que el material no irradiado ocurrió después de 10 días. Las plantas obtenidas a partir de yemas irradiadas, constituyen posibles líneas promisorias, ya que presentaron características morfológicas diferentes, y generalmente de mayor valor con respecto a las plantas provenientes de yemas no irradiadas. El material promisorio seleccionado será empleado para ensayos posteriores en campo.

Palabras clave: bananos, déficit hídrico, Pineo Gigante, radiación ionizante, mejoramiento genético.

Morphological characterization of promising banana (*Musa AAA*) lines obtained from X-ray irradiation

ABSTRACT

Climate change has brought various consequences, among which we can mention the decrease in rainfall, with musaceae being negatively affected by their sensitivity to water deficit. Obtaining materials tolerant to environments with less water availability is considered a need to be satisfied by the genetic improvement of this species. In order to select promising lines tolerant to drought conditions, genotypes of sub-group Cavendish banana (*Musa AAA* cv Pineo Gigante) from buds irradiated with X-rays at a dose of 30 Gy were morphologically characterized. For this, the growth of plants in vitro from irradiated and non-irradiated buds was evaluated and compared, considering the following variables: plant height, pseudostem thickness, number of leaves and leaf area, observing significant differences between both groups. Plants from irradiated buds showed higher values in the variables evaluated, compared to banana plants from non-irradiated buds, under drought conditions. The emission of the flag leaf in the irradiated material occurred after seven days, while the non-irradiated material occurred after 10 days. The plants obtained from irradiated buds constitute possible promising lines, since they presented different morphological characteristics, and of greater value with respect to the plants from non-irradiated buds. The promising material selected will be used for subsequent field trials.

Key words: Pineo Gigante, ionizing radiation, bananas, water deficit, genetic improvement.

Recibido: 19/02/2019 - Aprobado: 22/10/2019

INTRODUCCION

Los bananos y plátanos ocupan el cuarto lugar mundial en los cultivos agrícolas, luego del maíz, arroz y trigo. Como frutal ocupa el segundo lugar, después de los cítricos. El cultivo es importante tanto desde el punto de vista económico como social, ya que diversos países de Latinoamérica como Colombia, Ecuador y Costa Rica basan al menos parte de su economía en su exportación, mientras que en otros, como India y algunos países africanos, la producción es de subsistencia y juega un importante papel en su seguridad alimentaria (Canto Canché *et al.* 2015, Quispe Aguilar 2019).

El cultivo de musa comestible en Venezuela, también conocida como cambur, representa la mayor actividad frutícola del país. Siendo una de las frutas predilectas y más buscadas en cada rincón del territorio nacional, con una producción de 424.649 t y una superficie sembrada de 30.544 ha (FEDEAGRO 2019).

El rendimiento del banano es óptimo en el rango de 20 - 30 °C y con uso abundante de agua en suelo. Es muy sensible a la disponibilidad de agua en el suelo. Idealmente el cultivo requiere 1.300-2.600 mm.año⁻¹ (100-200 mm.mes⁻¹), para contrarrestar la evapotranspiración. Cuando el agua se reduce las raíces perciben el déficit y envían señales para el cierre de estomas y evitar la transpiración, lo que permite que las plantas sobrevivan a la sequía (Thornton y Cramer 2012), aunque una sequía en períodos críticos puede afectar el rendimiento en la producción de fruta. La producción en Venezuela se distribuye en diferentes partes del territorio nacional, y se lleva a cabo a lo largo de todo el año, además tiene gran importancia económica ya que, por sus propiedades alimenticias, es muy significativa para la economía agroalimentaria del país.

En Venezuela se ha venido desarrollando un conjunto de sistemas de producción de musáceas (bananos y plátanos) que responde a las condiciones de clima y suelos de las diferentes áreas productivas. La mayoría de ellos son altamente dependientes de la época lluviosa, caracterizados por el predominio del monocultivo con poca diversidad genética y con prácticas de manejo generalmente deficientes. A estas prácticas se le atribuyen

problemas de degradación o contaminación de suelos y aguas, en combinación con los efectos directos de la variabilidad del clima y el cambio climático, trayendo durante los últimos años una desaceleración de la actividad productiva debido a eventos atmosféricos, factores económicos y problemas fitosanitarios (Olivares *et al.* 2019).

El cambio climático puede tener efectos negativos sobre la actividad agrícola. Dentro de los elementos del clima que afectan negativamente la producción, destacan el incremento de la temperatura promedio y la disminución de las precipitaciones. Se muestran periodos largos de sequías, los cuales afectan las siembras en los campos y la producción de alimentos. Asimismo, la severidad y frecuencia de la sequía se han incrementado en el transcurso de los años, contribuyendo a una mayor incidencia de enfermedades en las plantas. Estos factores reducen significativamente los niveles de producción, afectando principalmente a los pequeños y/o medianos productores, con riesgos cada vez más frecuentes de pérdidas completas debido a la reducción de las cosechas (Belalcázar 1991, Olivares *et al.* 2019).

Los resultados obtenidos por Gallardo *et al.* (2017) al trabajar con los impactos provocados por la sequía agrícola en el cultivo de plátano en Cuba, demuestran que los procesos de sequía agrícola se manifiestan en todos los ciclos del cultivo, afectando de manera general los rendimientos, donde la evaluación de fenómeno es de gran utilidad para el manejo sostenible de ecosistemas agrarios en aras de lograr mejores resultados productivos a mediano y corto plazo; señalando que el análisis de este fenómeno climatológico desde el punto de vista agrícola, permite trazar estrategias para la aplicación de métodos de conservación del suelo y del recurso hídrico a los agricultores.

La limitación en la disponibilidad del agua es un gran problema para la agricultura mundial, que afecta de forma permanente el 28 % de los suelos del mundo (Castaño *et al.* 2012). La sequía, se manifiesta generalmente como una escasez de agua en la zona de las raíces, lo que da como resultado que el cultivo no pueda absorber agua y disminuya su rendimiento (Del Valle 2006).

La superficie cosechada de bananos (4.481 ha) para la Región Central concentrada mayormente en el estado Aragua (Olivares *et al.* 2017), podría verse afectada directa e indirectamente por un cambio en la magnitud de las lluvias. Aquellas zonas donde existían precipitaciones de 1.600-2.000 mm.año⁻¹ desaparecerán y dominará un rango más bajo de 800-1.200 mm.año⁻¹, de acuerdo con el Modelo UKTR. El déficit hídrico aumentará de 1.000.000 ha a 4.700.000 ha (Ovalles *et al.* 2005, Ovalles *et al.* 2008), cuyos eventos de sequía tendrán repercusiones en los rendimientos de bananos (Olivares y Zingaretti 2018).

El impacto del cambio climático será variable en todos los agroecosistemas, y dependerá de las características biofísicas (especie, cultivar y condiciones del suelo) del sistema de producción, de las capacidades tecnológicas y de las condiciones socioeconómicas de los productores bananeros (Olivares *et al.* 2019).

De igual manera, las respuestas de la planta dependen del genotipo y el estadio de desarrollo de la misma en el momento del estrés, de la duración y la severidad del estrés y de los factores ambientales que lo provoquen. En dependencia de las condiciones antes mencionadas, las plantas activan mecanismos de defensa a nivel molecular, morfológico, fisiológico y celular (Peleg *et al.* 2011, López-Gómez *et al.* 2017, Bustamante 2018).

Para las plantas de cultivo, la tolerancia al estrés abiótico es medida más por la pérdida de rendimiento, que por la supervivencia. Sin embargo, una gran parte de la investigación sobre estrés abiótico en sistemas modelo se ha centrado principalmente en la fase vegetativa, y se ha esforzado por identificar fenotipos de supervivencia, lo que ha obstaculizado la capacidad para identificar fácilmente, los indicadores de un rendimiento mejorado en plantas de cultivo (Peleg *et al.* 2011). Por lo tanto, es importante contar con materiales que toleren las condiciones de sequía para garantizar la producción agrícola en estas nuevas condiciones ambientales, en caso de presentarse.

Las musáceas son plantas donde muchos de sus materiales son muy sensibles al déficit hídrico, por lo cual su respuesta en la mayoría de los casos, no es positiva a la falta de humedad en

el suelo en cualquiera de sus fases de desarrollo (Varona 2013).

En el caso de musáceas comestibles, el mejoramiento no puede hacerse por métodos tradicionales debido a la esterilidad de los materiales comerciales. De allí, la necesidad de usar nuevas estrategias, donde la inducción de mutaciones se presenta como una alternativa viable para la obtención de los materiales tolerantes a estrés hídrico, cuya selección para esta característica, debe basarse en un buen fenotipaje de los materiales obtenidos, así como en una evaluación exhaustiva del germoplasma disponible. Estos dos últimos aspectos deben ser factores prioritarios para identificar muestras útiles, que puedan ser utilizadas en programa de mejoramiento genético de bananos (Del Valle 2006).

Los principales objetivos del mejoramiento convencional en musáceas están dirigidos a la obtención de materiales resistentes a plagas y enfermedades (Trujillo 1996, Emaldi *et al.* 2004, Leiva *et al.* 2015, Galo *et al.* 2017, Pérez *et al.* 2019). Sin embargo, progresivamente se han incorporado nuevas características como arquitectura de la planta, calidad de fruta, entre otras. Esta forma de mejoramiento se ha beneficiado por herramientas biotecnológicas como la propagación masiva in vitro, rescates de embriones in vitro, y recientemente la utilización de marcadores moleculares (Martínez *et al.* 2008).

El mejoramiento mediante la inducción de mutaciones a través de variación somaclonal ha permitido obtener nuevos clones con diferentes grados de resistencia a enfermedades en diferentes países, incluyendo a Venezuela (Trujillo y García 1996, Trujillo *et al.* 1997, Escalante *et al.* 2002, Emaldi *et al.* 2004, Cedeño *et al.* 2017).

La investigación sobre obtención de materiales en condiciones de sequía, fueron poco abordadas en el pasado, pero luego ganaron importancia dado el agotamiento de los recursos naturales. Por eso se vislumbró la necesidad de desarrollar variedades comerciales de banano adecuados para ambientes con poca disponibilidad de agua (Martínez, 1984). Existen investigaciones desarrolladas en el INIA (Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas) en el área de mejoramiento genético de bananos

(*Musa AAA*), donde se buscó obtener al menos un mutante de cambur que presentara un comportamiento de tolerancia a la sequía (Salazar 2012, 2014; Salazar *et al.* 2014).

Las mutaciones son alteraciones o modificaciones del ADN de los individuos, que se pueden generar de forma espontánea es decir de manera natural, y de manera inducida mediante la exposición a agentes mutagénicos químicos o físicos (Manrique 2012). Las mutaciones inducidas son aquellas provocadas por factores externos denominados mutágenos y pueden ser producidas por agentes físicos como radiaciones ionizantes, radiaciones no ionizantes y choques térmicos y agentes químicos que atacan al ADN. Los rayos gamma al ser utilizados como agente mutagénico penetran los individuos tratados, al igual que los demás agentes mutagénicos físicos. Estos juegan un papel en la mejora de rendimiento de los cultivos, la tolerancia al estrés (hídrico o climático) y un número de otros rasgos cualitativos y cuantitativos (Aguirre 2015, Segura 2016).

Salazar (2014) señala que el uso de radiaciones ionizantes ha permitido el desarrollo de nuevos clones de musáceas, que exhiben una respuesta de tolerancia a la sequía. Sin embargo, no se ha realizado una caracterización profunda de esos materiales, que permitan establecer diferencias entre los genotipos susceptibles y los tolerantes, y que en el futuro puedan servir como mecanismos efectivos de selección.

En vista de lo anteriormente señalado, existe la necesidad de describir estos materiales promisorios para avanzar en su identificación, así como en los mecanismos relacionados con la respuesta de tolerancia a la sequía. En este sentido, el objetivo del presente trabajo fue caracterizar morfológicamente los materiales de cambur regenerados a partir del cultivo *in vitro* de yemas axilares irradiadas con 30 Gy de rayos X, y seleccionadas por su tolerancia a condiciones simuladas de sequía en condiciones *in vitro*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio

La investigación tuvo como sede la Unidad de Biotecnología Agrícola Vegetal, ubicada en el Campo Experimental del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP) del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) Maracay, estado Aragua.

Material vegetal.

La muestra experimental obtenida previamente, fue una población MIV6 de *Musa AAA* cv Pineo Gigante, irradiada con rayos X a una intensidad 30 Gy, en un tomógrafo axial Phillips, Modelo CT MX-16. Estas plantas, mostraron comportamiento diferencial a la sequía (Salazar 2014). Como control, se emplearon plantas de Pineo Gigante *Musa AAA* proveniente del cultivo *in vitro* de yemas no irradiadas

Los materiales fueron sembrados en bolsas de polietileno de capacidad de 5 kg conteniendo arena previamente esterilizada con calor húmedo durante 5 h, a una temperatura de 121 °C en un recipiente de presión regulada y mantenidos en condiciones de umbráculo.

Efecto de las condiciones de estrés hídrico sobre del crecimiento de plantas *in vitro* de cambur

Las plantas de cambures provenientes de yemas irradiadas y no irradiadas fueron sometidas a condiciones de estrés hídrico mediante la suspensión del riego por 40 días. Se realizaron mediciones a los 0, 20 y 40 días.

Se estableció un diseño completamente al azar en el cual, las plantas fueron distribuidas de forma aleatoria sobre unos mesones. Las condiciones ambientales dentro del umbráculo fueron: temperatura máxima de 39 °C y mínima de 18 °C; con una humedad relativa promedio de 78 % y luz 4,52 mol.m⁻².d⁻¹.

El número de plantas de cambures provenientes de yemas irradiadas fueron 140 y como control se utilizaron 70 plantas provenientes de yemas no irradiadas.

Variables morfológicas evaluadas

Las variables morfológicas evaluadas fueron las siguientes: altura de la planta (AP), grosor del pseudotallo (GT), número de hojas funcionales (NHF) con más del 75 % de área verde, tiempo de emisión foliar o emisión de la hoja bandera (EF), largo de la hoja, ancho de la hoja y área foliar (AF) en cm² (Castaño *et al.* 2012).

El área foliar se calculó utilizando la siguiente expresión, según Martínez (1984):

$$\text{Área foliar (AF)} = \text{Largo de hoja} \times \text{ancho de hoja} \times 0,8.$$

Al evaluar el número de hojas, es importante destacar que solo se contabilizaron las fotosintéticamente activas.

Adicionalmente, se observó la morfología y la arquitectura de las plantas de cambures, con el fin de identificar plantas fuera de tipo. Se seleccionaron las plantas que se mantuvieron erguidas, y sin ningún síntoma de marchitez por falta de agua, para posterior siembra en campo.

Para el análisis de los datos se realizó un análisis de la varianza, la jerarquía de los promedios diferenciados se obtuvo mediante la prueba de comparaciones múltiple de Tukey, con nivel de significancia del 5 %. Se utilizó el programa estadístico InfoStat versión 2016 (Di Renzo *et al.* 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los resultados mostrados en el Cuadro 1, se observa que a los 20 días de suspensión del riego, la altura y el largo de la hoja en las plantas provenientes de yemas irradiadas y no irradiadas en condiciones de umbráculo no fue estadísticamente diferente, aunque si se observaron diferencias en el grosor del pseudotallo y el ancho de la hoja. Sin embargo, a los 40 días se observaron diferencias estadísticas significativas entre las plantas de cambures cv Pineo Gigante proveniente de yemas irradiadas y no irradiadas, en cuanto a las variables altura de planta, grosor del pseudotallo, ancho de la hoja y largo de la hoja (Ver Cuadro 1 y Figura 1).

Castaño *et al.* (2012) señalan que el consumo de agua por la planta aumenta a medida que crece. En las etapas de plántula (V1) durante las primeras ocho semanas del cultivo, los

Cuadro 1. Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento de plantas de cambur provenientes de yemas irradiadas y no irradiadas en condiciones de umbráculo.

Días	Material	Altura (cm)	Grosor del pseudotallo (cm)	Largo de la hoja (cm)	Ancho de la hoja (cm)
0	PPYNI	34,8 ^b	1,28 ^b	28,92 ^b	12,33 ^b
	PPYI	51,17 ^a	1,69 ^a	38,42 ^a	14,60 ^a
20	PPYNI	59,3 ^a	2,25 ^b	45,50 ^a	16,6 ^b
	PPYI	58,94 ^a	2,46 ^a	46,76 ^a	17,5 ^a
40	PPYNI	61,23 ^b	4,6 ^b	56,78 ^b	27,85 ^b
	PPYI	77,61 ^a	5,84 ^a	70,71 ^a	34,38 ^a

PPYNI: Plantas provenientes de yemas no irradiadas. PPYI: Plantas provenientes de yemas irradiadas. Letras iguales significan que no se observaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos para la prueba de Tukey ($\alpha=0,05$).



Figura 1. A: Plantas de cambur provenientes de yemas irradiadas. B: Plantas de cambur provenientes de yemas no irradiadas.

requerimientos hídricos son constantes, las plantas requieren mayor suministro de agua ya que comienza a aumentar su biomasa. Esto pudiera justificar el comportamiento de las plantas de cambures obtenidas a partir de yemas irradiadas y no irradiadas, ya que los materiales se encontraban en la fase de crecimiento cuando se le suspendió el riego.

Se ha señalado que entre los principales efectos del estrés hídrico sobre el crecimiento, está la reducción en la altura, tallo, raíces, área foliar, peso foliar específico y biomasa de la planta (Luna *et al.* 2012).

Machado (2011) obtuvo que la altura en plantas de *Jatropha curcas* L. fue el indicador más variable, seguido por el grosor de las ramas primarias, el número de ramas secundarias, el número de ramas primarias y el grosor del tallo en la base. Estos caracteres morfológicos estuvieron positivamente relacionados, lo que denotó el alto grado de complementariedad existente en estos rasgos estructurales a medida que las plantas se desarrollaron.

Por otro lado, las plantas obtenidas a partir de yemas irradiadas que mostraron tolerancia a condiciones de sequía, presentaron una coloración verde intensa en sus hojas y el pseudotallo se mantuvo erguido durante toda la evaluación (Figura 2A).

Es importante destacar que no todas las plantas provenientes de yemas irradiadas presentaron la misma respuesta a las condiciones simuladas de sequía, ya que algunos de ellas mostraron susceptibilidad a esta condición, evidenciada principalmente, por la deshidratación del pseudotallo y el posterior quiebre del mismo (Figura 2B). Estos resultados pueden explicarse como una

posible respuesta diferencial por parte del tejido vegetal a la radiación. Cabe destacar que probablemente, la irradiación sirva de estímulo para algunos procesos morfológicos, en aquellos tejidos donde no tuvo un efecto deletéreo.

Debido que las mutaciones ocurren de forma aleatoria, la modificación ocurrida puede afectar aspectos morfológicos, fisiológicos y anatómicos de los cuales depende la respuesta de las plantas ante el estrés hídrico (Salazar *et al.* 2014, Aguirre 2015).

Por otro lado, las plantas de cambur cv Pineo Gigante provenientes de yemas no irradiadas, presentaron un mayor número de individuos que mostraron estar afectados por la condiciones de estrés hídrico. Estos materiales manifestaron pérdida de turgencia foliar como el primer síntoma de marchitez a los 8 días, lo cual es indicativo de deshidratación. Se evidenció en un menor crecimiento, además de presentar una coloración marrón en las hojas y el pseudotallo (Figura 3).

Estos datos coinciden con los reportado por Luna *et al.* (2012), quienes observaron que el primer síntoma de marchitez presentes en *P. psicipula* y *L. leucocephala* es el amarillamiento foliar, resultado de la degradación de la clorofila como respuesta al estrés hídrico.

Las plantas de cambur que mostraron daños causados por la falta de agua, fueron descartadas

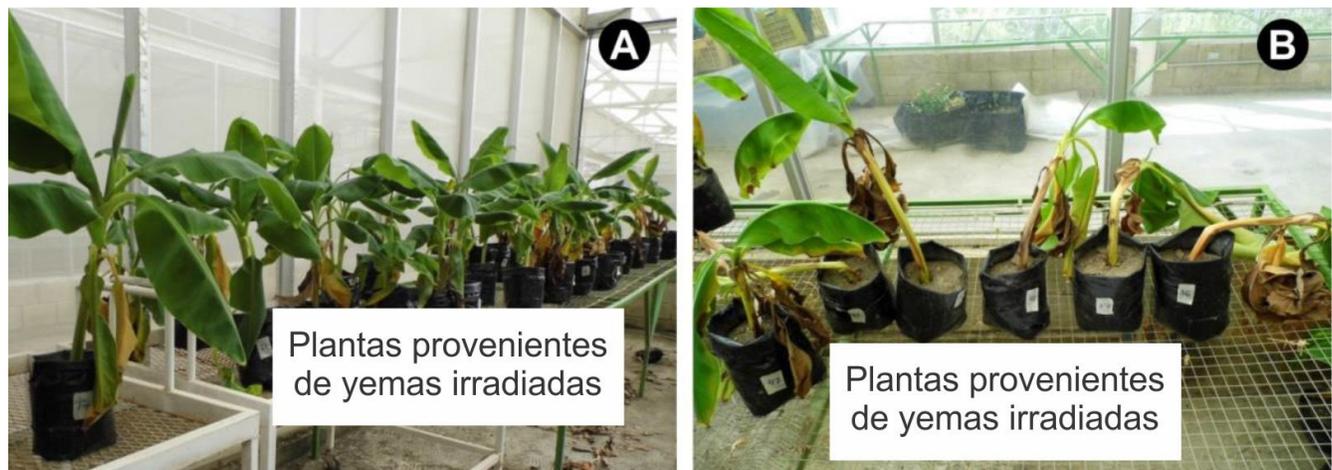


Figura 2. A. Plantas de cambur cv Pineo Gigante provenientes de yemas irradiadas tolerantes al estrés hídrico; B) Plantas de cambur cv Pineo Gigante provenientes de yemas irradiadas susceptibles al estrés hídrico.



Figura 3. Plantas de cambur Pineo Gigante, regeneradas a partir de yemas no irradiadas.

del presente trabajo de investigación, ya que con esta prueba se deseaba seleccionar aquellas plantas de cambur Pineo Gigante, con posible tolerancia a sequía, las cuales proseguirían en la fase de cultivo en condiciones de campo.

Todas las plantas de cambur cv Pineo Gigante provenientes de yemas no irradiadas, mostraron estar afectadas por las condiciones de estrés hídrico en comparación con las plantas de cambur proveniente de yemas irradiadas. (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto del déficit hídrico sobre la población de plantas de cambur provenientes de yemas irradiadas y no irradiados en condiciones de umbráculo

Material	Plantas iniciales (#)	Plantas afectadas por sequía (#)	Sobrevivencia (%)
PPYNI	70	70	0
PPYI	140	75	54

PPYNI: Plantas provenientes de yemas no irradiadas. PPYI: Plantas provenientes de yemas irradiadas.

En la etapa de plántula se condiciona el establecimiento de las especies vegetales, ya que el estrés hídrico puede provocar su muerte, por ello es necesario estudiar sus respuestas fisiológicas y morfológicas ante condiciones de baja humedad del suelo (Cregg 2004).

Los resultados mostrados en el Cuadro 2 evidencian que el proceso de irradiación, está directamente relacionado con el desarrollo de la capacidad de las plantas regeneradas para soportar las condiciones de sequía, lo que podría plantear la utilidad de los rayos X como herramienta mutagénica en musáceas.

Sin embargo, en esta etapa de la investigación, aún no se puede afirmar de forma categórica, que los rayos X pueden ser utilizados como herramienta mutagénica en musáceas, pues podría haber ocurrido una radioestimulación (Chakravarty y Sen 2001, Hernández-Muñoz *et al.* 2017, 2019).

Adicionalmente, se identificaron tres plantas fuera de tipo entre las líneas provenientes de yemas irradiadas, las cuales presentaron características morfológicas diferentes a las otras plantas del grupo. Dichas plantas presentaron una mayor altura, hojas más angostas, estrechas y lanceoladas, además de presentar un color verde menos intenso con respecto a las demás plantas del grupo (Figura 4).

Es importante destacar que los resultados obtenidos, podrían indicar que la irradiación, además del efecto diferencial para la tolerancia a sequía, puede haber afectado atributos morfológicos,



Figura 4. Plantas de cambur cv Pineo Gigante fuera de tipo, proveniente de yemas irradiadas.

indicando que es imperativa la evaluación en condiciones de campo de los materiales regenerados. La evaluación en condiciones de campo es necesaria, pues pueden existir cambios en la fase reproductiva motivados al estrés hídrico. Adicionalmente, es necesario, contar con un material que no solamente sea tolerante a las condiciones de sequía, sino que mantenga las características de productividad y de calidad de fruto, exigidas comercialmente.

Con relación al número de hojas, la Figura 5 muestra que las plantas de líneas promisorias obtenidas de yemas irradiadas de cambur, presentaron mayor cantidad de hojas en comparación con las plantas provenientes de yemas no irradiadas. Asimismo, se observó que la frecuencia de la aparición de la hoja bandera en las plantas irradiadas fue cada siete días, mientras que en las plantas no irradiadas, la emisión de las hojas se retardó, emergiendo cada 15 días.

Los resultados anteriormente mostrados, son una evidencia de que las condiciones de estrés hídrico simuladas, si generaron diferencias entre el grupo de plantas obtenidas de yemas irradiadas y no irradiadas, mostrando valores más favorables para la emisión de las hojas en la línea de plantas promisorias, que durante la suspensión del riego, continuaron emitiendo una hoja por semana. Se

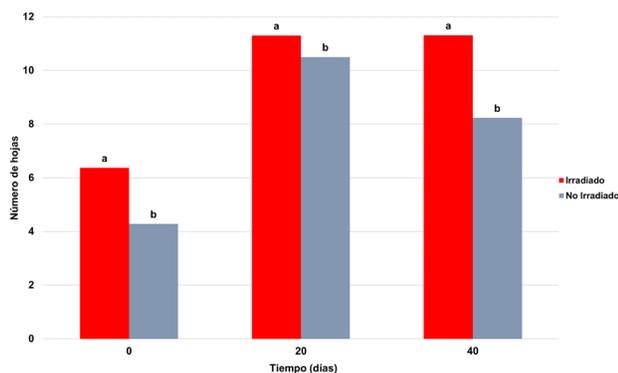


Figura 6. Número de hojas emitidas en plantas de cambur provenientes de yemas irradiadas y no irradiadas sometidas a condiciones de estrés hídrico durante 0, 20 y 40 días. Letras iguales indican promedios sin diferencias estadísticas significativas, de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha=0,05$).

puede inferir que la tasa de emisión foliar está estrechamente relacionada con las condiciones ambientales, como lo es en este caso el estrés hídrico, incidiendo en una variable tan importante como el área foliar, pues de ella depende en parte la fotosíntesis, y por ende la adaptación a la falta de agua (Cregg 2004, Salazar 2014).

El crecimiento radicular es otro proceso que también se modifica debido al estrés hídrico. La disponibilidad de agua afecta la relación entre el crecimiento de la parte aérea y la raíz; en caso de déficit hídrico la raíz continúa su desarrollo mientras que la parte aérea deja de crecer por causa del estrés. Sin embargo, las plantas son capaces de continuar el desarrollo de sus raíces en búsqueda de agua en zonas más profundas del suelo (Salazar 2014).

Potters *et al.* (2007) señalaron que las plantas expuestas a condiciones de estrés abiótico sub-lethal presentan una amplia gama de respuestas morfológicas inducida por estrés, que pueden afectar directamente la inhibición en la elongación celular, por la estimulación localizada de la división celular y alteraciones en la diferenciación celular.

Estos resultados coinciden con los descritos por Belalcázar (1991), quien menciona que uno de los factores que más influye sobre la emergencia de las hojas son los períodos largos de sequía, que pueden retrasar el proceso de emisión foliar en 15 días o más.

En la Figura 6 se muestra que el área foliar es uno de los parámetros que indica crecimiento en las plantas, ya que está directamente relacionado con las dimensiones de la lámina foliar, y una mayor tasa fotosintética. Se evidenció que las plantas de cambur obtenidas de yemas irradiadas, presentan un área foliar mayor a las plantas obtenidas de yemas no irradiadas. En condiciones simuladas de sequía, las plantas continúan su crecimiento, pero las obtenidas de yemas no irradiadas, presentan un crecimiento más lento.

Un área foliar más grande es un indicador de tolerancia en condiciones de estrés hídrico, pues indica que no se reduce el crecimiento en condiciones de estrés, lo cual puede estar relacionado con un sistema radical más

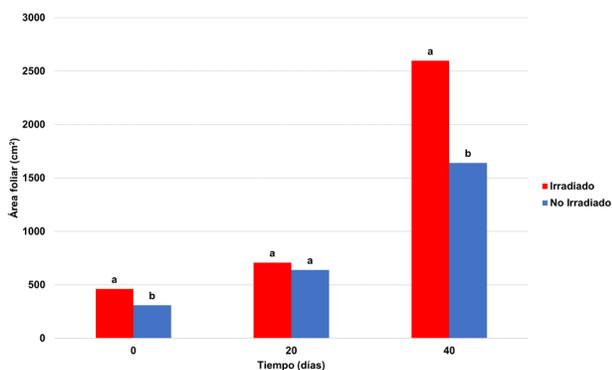


Figura 7. Área foliar de las plantas de cambur provenientes de yemas irradiadas y no irradiadas sometidas a condiciones de estrés hídrico durante 0, 20 y 40 días. Letras iguales indican promedios sin diferencias estadísticas significativas, de acuerdo a la prueba de Tukey ($\alpha=0,05$).

desarrollado. Por otro lado, al presentarse un área foliar más grande las líneas promisorias, se podría pensar en una mayor evapotranspiración, sin embargo, las plantas obtenidas de yemas irradiadas presentan una mejor tolerancia a sequía. Belalcázar (1991) y Salazar (2012) indican que a mayor área foliar, mayor será la demanda de agua de las plantas, ya que sus necesidades hídricas se deben a que tiene gran superficie foliar transpirante, siendo más exigente en agua que otras especies. Dichos autores señalan que a medida que la planta aumenta su crecimiento, la cantidad de agua que consume también es mayor. Sin embargo, en este caso, las plantas irradiadas presentan un mejor crecimiento que las no irradiadas, lo que afirma la adaptación de las mismas a procesos de sequía.

El análisis de crecimiento vegetal permite evaluar cómo las variaciones en el genotipo, el ambiente y el manejo pueden modificar la acumulación de biomasa a nivel de planta a partir de mediciones sencillas (básicamente, área foliar y peso de los diferentes órganos), a partir de las cuales se han derivado parámetros que permiten estimar, con suficiente precisión, procesos fundamentales que conforman la productividad, debido que es la fuente de producción de los foto asimilados (Di Benedetto *et al.* 2016).

Las variables evaluadas se relacionan entre sí de forma integral, durante el desarrollo de las plantas. Al respecto, Belalcázar (1991) señaló que existen relaciones directas, altamente significativas y confiables entre la altura de la planta, el diámetro del pseudotallo y el número de hojas emitidas, siendo de importancia el suministro del agua, para garantizar un crecimiento normal del cultivo en cada una de sus fases de desarrollo.

CONCLUSIONES

Las plantas provenientes de yemas irradiadas mostraron un mejor comportamiento en las variables de crecimiento durante las condiciones del estrés hídrico, en comparación con las plantas proveniente de yemas no irradiadas en condiciones de umbráculo.

El área foliar y el tiempo de emisión de la hoja bandera pueden ser utilizados como criterios de selección en condiciones de sequía.

Se identificaron tres plantas fuera de tipo dentro de la población de las plantas irradiadas (líneas promisorias), cuya variación fenotípica podría ser atribuida a los efectos de la irradiación.

La técnica de inducción de mutaciones a través de radiación ionizante pudiera ser una alternativa efectiva para la obtención de materiales promisorios de cambur cv Pineo Gigante tolerante al estrés por déficit hídrico.

LITERATURA CITADA

- Aguirre, D. 2015. Mutaciones y agentes mutagénicos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura. UNNE. Argentina. 654 p.
- Belalcázar, S. 1991. El Cultivo del Plátano en el trópico. Manual de Asistencia Técnica 50. ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). Colombia. 376 p.
- Bustamante G, A. 2018. Caracterización de mecanismos implicados en la regulación de la respuesta a estrés por frío en plantas. Tesis de Doctorado en Biotecnología. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia. INIAP. 131 p.

- Canto, B; Orozco, M; Martínez, L; Manzo, G; James, A; Rodríguez, C; Islas, I; Beltrán, M; Guzmán, S; Garrido, E; Higuera, I; Sandoval, J. 2015. Bananos y plátanos, frente al cambio climático. En: Hacia dónde va la ciencia en México. Ecosistemas, Plagas y Cambio Climático por I. Higuera-Ciapara (Coordinador). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Academia Mexicana de Ciencias, A.C. Secretaria Ejecutiva del Consejo Consultivo de Ciencias. Centro Geo. D.F. México. 56 p.
- Castaño, A; Aristizábal, M; González, H. 2012. Requerimientos hídricos del plátano Dominico-Hartón (*Musa AAB Simmonds*) en la región Santágueda Caldas, Colombia. *Revista UDCA15* (2):331-338.
- Cedeño, G; Suárez, C; Vera, D; Fadda, C; Jarvis, D; De Santis, P. 2017. Detección temprana de resistencia a *Mycosphaerella fijiensis* en genotipos locales de Musáceas en Ecuador. *Scientia Agropecuaria* 8(1): 29-42.
- Chakravarty, B; Sen, S. 2001. Enhancement of regeneration potential and variability by γ -irradiation in cultured cells of *Scilla indica*. *Biologia plantarum* 44(2):189-193.
- Cregg, BM. 2004. Improving drought tolerance of trees: Theoretical and practical considerations. *Acta Horticulture* 630:147-156.
- Del Valle, R. 2006. Mejoramiento Convencional y Biotecnológico de los cambures y plátanos: Contribución a la seguridad alimentaria en el trópico. IX Congreso Venezolano de fruticultura. Barquisimeto, Venezuela. Memorias pp: 91-99.
- Di Benedetto, A; Togonetti, J. 2016. Técnica de análisis de crecimiento de plantas: Su aplicación a cultivos intensivos. Buenos Aires, Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 42(3):12-23.
- Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Balzarini, MG; González, L; Tablada, M; Robledo, CW. 2017. Infostat (en línea, programa informático). Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba. Consultado 16 ago. 2018. Disponible en: <https://bit.ly/3l4HBjN>
- Emaldi, U; Trujillo, I; García, E. 2004. Comparison of characteristics of bananas (*Musa* sp.) from the somaclone CIEN BTA-03 and its parental clone Williams. *Fruits* (4): 257-263.
- Escalant, J; Sharrock, S; Frison, E. 2002. The genetic improvement of musa using conventional breeding and modern tools of molecular and cellular biology. INIBAP-PROMUSA. 12 p.
- FEDEAGRO (Confederación de Asociaciones de Productores Agropecuarios de Venezuela). 2019. Estadísticas agrícolas (en línea). Consultado 20 oct. 2019. Disponible en <http://bit.ly/2TBAAFB>
- Gallardo, Y; Brown, O; Williams, PW; Matamoros, Y; Rodríguez, I. 2017. Impactos provocados por la sequía agrícola en el cultivo de Plátano (*Musa*) en áreas del municipio Venezuela, Ciego de Ávila, Cuba. *Ciencia y Tecnología* 10(2): 9-18.
- Hernández-Muñoz, S; Pedraza-Santos, ME; López, PA; Cruz-Torres, E; Fernández-Pavía, S; Martínez-Palacios, P; Martínez-Trujillo, A. 2017. Determinación de la DL50 y GR 50 con rayos gamma (60Co) en protocormos de *Laelia autumnalis in vitro*. *Agrociencia* 51(5):507-524.
- Hernández-Muñoz, S; Pedraza-Santos, ME; López, PA; Gómez-Sanabria, JM; Morales-García, JL. 2019. Mutagenesis in the improvement of ornamental plants. *Revista Chapingo, Serie horticultura* 25(3):151-167.
- Leiva, M; Alvarado, Y; Acosta, M; Cruz, M; Roque, B; Mena, E. 2015. Components of resistance to assess Black Sigatoka response in artificially inoculated *Musa* genotypes. *Revista Protección Vegetal* 30: 60 – 69.
- López-Gómez, P; Youssef, M; Kú-Cauich, JR; Enríquez-Valencia, JA; Iracheta-Donjuan, L; Escobedo-Gracia, M. 2017. Organogénesis directa de yemas florales de *Musa* sp., y variación somaclonal evaluada por marcadores moleculares. *Agroproductividad* 10(8): 65-71.
- Luna-Flores, W; Estrada-Medina, H; Jiménez-Osornio, J; Pinzón-López, L. 2012. Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y

- eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana* 30(4):343-353.
- Machado, R. 2011. Caracterización morfológica y productiva de procedencias de *Jatropha curcas* L. *Revista Pastos y forrajes* 34: 267-280.
- Martínez, GA. 1984. Determinación del área mínima foliar en plátano en el trópico húmedo. *Colombia Revista ICA (Instituto Colombiano Agropecuario)* 19(2):183-187.
- Martínez, G; Delgado, E; Rodríguez, D; Hernández, J; Del Valle, R. 2008. Breve análisis sobre la producción de musáceas en Venezuela. *Producción Agropecuaria* 1(1):24-29.
- Olivares, B; Zingaretti, ML. 2018. Analysis of the meteorological drought in four agricultural localities of Venezuela through the combination of multivariate methods. *UNED Research Journal* 10 (1): 181-192.
- Olivares, B; Cortez, A; Parra, R; Lobo, D; Rodríguez, MF; Rey, JC. 2017. Evaluation of agricultural vulnerability to drought weather in different locations of Venezuela. *Revista Facultad Agronomía (LUZ)* 34(1):103-129.
- Olivares, B; Rey, JC; Lobo, D; Gómez, JA; Landa, BB. 2019. El cambio climático en zonas bananeras de la Región Central de Venezuela: El futuro de los bananos con un escenario hídrico incierto. III Simposio Venezolano de Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria. Memorias. Universidad Metropolitana. Caracas, Venezuela. p. 34-45.
- Ovalles, F; Cabrera-Bisbal, E; Cortez, A; Rodríguez, MF; Rey, JC; Comerma, J. 2005. Aproximación a los escenarios de adaptación al cambio climático del sector agrícola. Maracay, INIA. 146 p.
- Ovalles, F; Cortez, A; Rodríguez, MF; Rey, JC; Cabrera-Bisbal, E. 2008. Variación geográfica del impacto del cambio climático en el sector agrícola en Venezuela. *Agronomía Tropical* 58(1): 37-40.
- Peleg, Z; Apse, MP; Blumwald, E. 2011. Engineering Salinity and Water-Stress Tolerance in Crop Plants: Getting Closer to the Field. *Advances in Botanical Research* 57: 407-443.
- Pérez, N; Skeete, A; Rodríguez, D; Companioni, B. 2019. Aplicación de inductores de resistencia abióticos en banano para el control de *Fusarium* sp. *Universidad & Ciencia* 8 (1): 17-27.
- Potters, TP; Pasternak, Y; Guisez, K; Palme, J; Jansen, MA. 2007. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble *Trends Plant Science* 12(3):99-105.
- Quispe Aguilar, A. 2019. Propagación del banano Gross Michel con diferentes técnicas de multiplicación en vivero en Belemkata Distrito de Echarati – La Convención-Cusco. Tesis de grado. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Facultad de Ciencias Agrarias. Escuela Profesional de Agronomía Tropical. 89 p.
- Salazar, E. 2012. Proyecto OIEA RLA-5063 (ARCAL CXXVI). Programación 2012-2014 (en línea). Organismo Internacional de Energía Atómica. Consultado 15 mar. 2017. Disponible en <https://bit.ly/2lCxBqu>
- Salazar, E. 2014. Radiaciones ionizantes en *Musa AAA* para Inducción de mutaciones hacia la tolerancia a estrés hídrico. Tesis Doctoral, Maracay, Venezuela. Escuela Socialista de Agricultura Tropical (ESAT). 172 p.
- Salazar, E; Trujillo, I; Pérez Macías, M; Gutiérrez, MA; Castro, L; Vallejo, E; Torrealba, M. 2014. Respuesta fisiológica al estrés hídrico de plantas de banano cv. 'Pineo Gigante' (*Musa AA*) regeneradas a partir de yemas irradiadas. *Biotecnología Vegetal* 14(3): 155-162.
- Segura, C. 2016. Generación de un protocolo para inducir variantes genéticas en café (*Coffea arabica* L.) mediante inducción de mutaciones con el uso de agentes químicos (en línea). Tesis Licenciatura en Agronomía, San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 98 p. Consultado 15 mar. 2017. Disponible en <https://bit.ly/3eAEihU>
- Singh, B; Singh, G. 2006. Effects of controlled irrigation on water potential, nitrogen uptake and biomass production in *Dalbergia sisso*

- seedlings. Environmental Experimental Botanical 55: 209-219.
- Thornton, P; Cramer, L. 2012. Impacts of climate change on the agricultural and aquatic systems and natural resources within the CGIAR's mandate. CCAFS CGIAR. Working Paper 23.
- Trujillo, I; García, E. 1996. Strategies for obtaining somaclonal variants resistant to yellow Sigatoka (*Mycosphaella musicola*). Infomusa 5(2):12-13.
- Trujillo, I; Hermoso, L.; García, E.1997. Caracterización estructural de clones de banano: resistentes y no resistentes a la Sigatoka Amarilla. Anales Botánica Agrícola 4:59-62.
- Varona, R. 2013. Efecto del riego deficitario controlado en la productividad del banano. Revista Ciencias Técnica Agropecuaria 22 (2): 51-53.