



YUCA: PAN Y CARNE, UNA ALTERNATIVA POTENCIAL PARA HACER FRENTE AL HAMBRE OCULTA

Cassava: bread and meat, a potential alternative to tackle hidden hunger

Paula Alejandra DIAZ TATIS¹, Camilo Ernesto LOPEZ CARRASCAL²

¹Grupo de Ciencias Biológicas y Químicas, Facultad de Ciencias, Universidad Antonio Nariño, Carrera 3 Este No 47 A - 15. Bogotá, Colombia. ² Grupo Manihot Biotec, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Cra 30 No 45-03, Bogotá Colombia.

*For correspondence: celopezc@unal.edu.co

Received: 14th January 2020, **Returned for revision:** 7th July 2019, **Accepted:** 12th August 2020.

Associate Editor: Gabriel Pinilla Agudelo.

Citation/Citar este artículo como: Díaz Tatis PA, López Carrascal CE. Yuca: pan y carne, una alternativa potencial para hacer frente al hambre oculta. Acta Biol Colomb. 2021;26(2):235-246. Doi: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v26n2.84569>

RESUMEN

Uno de los retos que encara la humanidad es asegurar la alimentación y la adecuada nutrición para los cerca de ocho billones de habitantes del planeta. Las raíces de yuca constituyen la cuarta fuente más importante de calorías para la población humana siendo uno de los pilares de la seguridad alimentaria. Las raíces de yuca no poseen atributos nutricionales adecuados. Aunque existen variedades con valores relativamente altos de estos compuestos, sus valores están lejos de los necesarios para asegurar los requerimientos mínimos de la población humana. Las hojas de yuca poseen valores altos de contenido proteico, minerales y vitaminas, por lo que representan una fuente nutricional alternativa. Sin embargo, el consumo de hojas de yuca en América Latina es escaso o nulo como consecuencia de los altos niveles de cianuro que poseen. En algunos países de África y Asia las hojas se consumen a través de diversas recetas que incluye su cocción, eliminando así una gran cantidad del contenido cianogéno. En esta revisión se presenta un panorama general de la importancia nutricional de la yuca, las diferentes estrategias de mejoramiento genético clásico y no convencional destinados a incrementar los contenidos nutricionales de raíces y la importancia de la explotación de la variabilidad intrínseca de la yuca como una fuente de variedades y genes que puedan contribuir a la implementación de estrategias encaminadas a desarrollar materiales con los requerimientos nutricionales adecuados. Finalmente, se presenta el potencial que tienen las hojas de yuca para ser empleadas dentro de programas complementarios destinados a mejorar la calidad nutricional de la población humana.

Palabras clave: agricultura, almidón, desnutrición, diversidad, alimentación.

ABSTRACT

One of the challenges facing humanity is to ensure food and adequate nutrition for the nearly eight billion inhabitants of the planet. Cassava roots constitute the fourth most important source of calories for the human population, being one of the pillars of food security. Cassava roots do not have adequate nutritional attributes. Although there are varieties with relatively high values of these compounds, these are far from those necessary to ensure the minimum requirements of the human population. Cassava leaves have a high content of protein, minerals, and vitamins, so they represent an alternative nutritional source. However, their consumption in Latin America is scarce due to the high levels of cyanide they possess. In some countries of Africa and Asia, the leaves are consumed through various recipes that include cooking, thus eliminating a large amount of cyanogen content. This review presents an overview of the nutritional importance of cassava, the different strategies of classical and unconventional genetic improvement aimed at increasing the nutritional content of roots, and the importance of exploiting the intrinsic variability of cassava as a source of varieties and genes that can contribute to the development of strategies directed to developing materials with the appropriate nutritional requirements. Finally, the potential of cassava leaves to be used in complementary programs aimed at improving the nutritional quality of the human population is presented.

Keywords: agriculture, starch, malnutrition, diversity, feeding.

INTRODUCCION

La agricultura ha representado por más de 10 000 años un elemento fundamental del desarrollo de la civilización humana. Los actuales retos de cambio climático, seguridad y soberanía alimentaria acompañados de proveer calidad nutricional, deben enfrentarse a través de estrategias que impliquen saber valorar y utilizar los recursos naturales y la innovación en esquemas alternativos de agricultura y producción de alimentos, acordes con los lineamientos generales de autosostenibilidad y de buenas prácticas agrícolas. Solo de esta manera se podrá asegurar tanto la adecuada producción frente a escenarios de cambio climático, como la calidad nutricional (Smith y Gregory, 2013; Henry, 2019).

Se ha estimado que dos mil millones de personas son deficientes en uno o más micronutrientes, 160 millones de niños menores de cinco años presentan retraso en su crecimiento y 95 millones de personas padecen de desnutrición (Amoroso, 2016). Los costos asociados a la desnutrición son enormes, siendo más fuertes para las poblaciones más pobres, especialmente mujeres y niños (Bezanson e Isenman, 2010).

Uno de los principales retos que enfrenta no solo la agricultura mundial sino la humanidad en general es poder responder a las necesidades alimentarias y nutricionales en el contexto de las limitaciones de recursos naturales y a las condiciones de cambio climático (Henry, 2019). Según Fischer *et al.* (2014), se requiere lograr un incremento del 1,1 o 1,3 % en la producción de los cultivos más importantes cada año para lograr alimentar a la población humana en el año 2050. Frente a este contexto es prioritario la búsqueda de nuevas fuentes alimenticias y nutricionales que contribuyan a mejorar las condiciones de la población.

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es una planta de la familia Euphorbiaceae que acumula grandes cantidades de almidón en sus raíces almacenadoras (Ospina y Ceballos, 2002). Este almidón representa la tercera fuente calórica más importante para cerca de 1000 millones de personas en el mundo, principalmente de aquellas que habitan en los trópicos (Ospina y Ceballos, 2002). Aunque el almidón de yuca obtenido a partir de las raíces representa un aporte calórico importante, su contribución nutricional es muy baja. Por otro lado, varios estudios han mostrado que las hojas de yuca poseen un alto valor nutricional (Latify Muller, 2015). Sin embargo, los contenidos de cianuro en las hojas representan un obstáculo para su consumo (Montagnac *et al.*, 2009a). A pesar de ello, en varios países de África y Asia las hojas se consumen después de un proceso de cocción que elimina gran parte de los compuestos cianhídricos (Latif y Muller, 2015). Sin embargo, estos casos pueden considerarse como marginales, por lo cual el potencial de las hojas de yuca como una alternativa y complemento nutricional no ha alcanzado el valor que podría llegar a tener. Para lograrlo es importante responder a varios desafíos que se pueden agrupar en: *i*) generar mayor conocimiento

sobre la diversidad y determinantes genéticos asociados con la producción y acumulación de micronutrientes y compuestos cianogénicos en yuca; *ii*) desarrollar programas de mejoramiento genético convencional y de transformación genética apoyados en el conocimiento logrado en el primer punto, con el fin de lograr variedades con altos valores nutricionales al tiempo que baja concentración de compuestos cianógenos; *iii*) establecer metodologías que permitan disminuir la cantidad de cianuro en las hojas y que afecten lo menor posible el componente nutricional y *iv*) una vez se haya avanzado en los puntos anteriores, desarrollar campañas de promoción del consumo seguro de hojas en las poblaciones humanas. En este artículo de revisión presentamos la problemática nutricional y algunos estudios recientes sobre el uso y el impacto potencial que tiene el consumo de hojas de yuca desde un contexto global y local. Así mismo, se abordarán los principales resultados de los esfuerzos que se han logrado de manera directa o indirecta en abordar los cuatro desafíos señalados anteriormente.

En esta revisión también se pretende, por un lado, tratar de comprender por qué el uso de las hojas de yuca, si bien se ha establecido en algunos países de África, no se ha extendido a otras partes del mundo, y, por otra parte, estudiar los factores que han frenado su utilización como una fuente nutricional alternativa y complementaria. El objetivo de esta revisión es identificar cuáles son los desafíos a superar para lograr que el consumo de las hojas de yuca se pueda posicionar como un elemento más dentro de las diferentes estrategias para hacer frente a la problemática del hambre y la nutrición mundial. Es importante aclarar que el consumo de las hojas de yuca no debe hacer parte inmediata de dichas alternativas pues, como se pretende poner de manifiesto en esta revisión, son varios los obstáculos a superar antes de lograrlo. Así mismo, es importante hacer hincapié en que la visión que se tiene no es que el consumo de las hojas de yuca reemplace otras fuentes nutricionales, sino que sea una alternativa complementaria.

El hambre oculta

La agricultura actual enfrenta grandes desafíos, entre los que se encuentra el incremento en la producción para abastecer de alimentos a los aproximadamente nueve o diez billones de seres humanos que habitarán el planeta en 2050 (Smith y Gregory, 2013). No bastará con dar de comer, sino que será necesario alimentar de manera adecuada a esta población, principalmente a la niñez y a las madres en lactancia. Esto se debe lograr en un contexto de cambio climático global que augura no solo incrementos en la temperatura sino periodos de sequía y lluvia más acentuados y prolongados (Henry, 2019).

El hambre oculta es un término que se ha empleado para describir una situación de carencia de nutrientes que no necesariamente está acompañada de deficiencias en

la ingesta calórica y como su nombre lo indica, describe una condición invisible dada la falta de síntomas visibles en una o más deficiencias nutricionales (Muthayya *et al.*, 2013). En el reporte de la conferencia llevada a cabo en Montreal en 1991 y titulada “Ending hidden hunger: a policy conference on micronutrient malnutrition” llevada a cabo por la Organización Mundial de la Salud y Unicef, se indica que el principal objetivo de ese encuentro fue hacer visible el problema del hambre oculta y fue a partir de allí que se empezó a divulgar dicho término. La desnutrición es una de las afecciones de la malnutrición e incluye la emaciación (un peso insuficiente con respecto a la talla), el retraso del crecimiento (una talla insuficiente para la edad), la insuficiencia ponderal (un peso insuficiente para la edad) y la relacionada con los micronutrientes, que incluye las carencias de estos elementos, es decir, la falta de vitaminas o minerales importantes (OMS, 2019). Como causa de estas afectaciones los niños son particularmente más vulnerables a enfermedades y a la muerte (Ruel-Bergeron *et al.*, 2015).

El bajo consumo de vitaminas y minerales (micronutrientes) es una importante causa de enfermedad y mortalidad, ya que estos se necesitan para producir enzimas, hormonas y otras sustancias esenciales para un crecimiento y desarrollo adecuados. Se estima que 161 millones de niños menores de cinco años poseen retraso en el crecimiento, en parte debido al hambre oculta, que ocurre cuando los alimentos carecen de vitaminas y minerales esenciales (de Onis y Branca, 2016). La anemia causada por deficiencia de hierro afecta el sistema inmune y produce retraso en el crecimiento y en el desarrollo cognitivo (Balarajan *et al.*, 2011). La deficiencia en otro mineral como el zinc también incrementa el riesgo de muerte por diarrea y acarrea problemas cognitivos. La deficiencia en vitamina A es una de las más frecuentes en el mundo: se ha estimado que 90 millones de niños menores de cinco años y que 15 % de las mujeres embarazadas sufren de deficiencia de vitamina A subclínica, la cual está asociada con una elevada mortalidad infantil (Black *et al.*, 2013). Las mujeres, los lactantes, los niños y los adolescentes están particularmente expuestos a la malnutrición.

La situación de pobreza aumenta la probabilidad de sufrir distintas formas de malnutrición. Las consecuencias de la malnutrición son diversas e incluyen los incrementos en los costos de la atención de salud, la reducción de la productividad y el frenado del crecimiento económico, lo que puede perpetuar el ciclo de pobreza y mala salud. Frente a este panorama, la ONU determinó que su meta No 2 para 2030 es frenar el hambre y la malnutrición a través de la promoción de una agricultura sostenible (UN, 2017).

En Colombia la vigilancia de la desnutrición aguda se implementó a nivel nacional desde 2016, siendo uno de los elementos fundamentales en la salud pública. Según el Boletín epidemiológico de la semana 18 de 2018 del Instituto Nacional de Salud, la prevalencia nacional de desnutrición aguda moderada y severa fue de 0,09 por

100 000 menores de cinco años; las entidades territoriales de Guaviare, Amazonas, Guainía, Casanare y Vichada fueron las que presentaron mayor prevalencia.

La yuca y su importancia en la alimentación y en la industria

La yuca hace parte del género *Manihot* (familia Euphorbiaceae), el cual se encuentra distribuido desde el sur de los Estados Unidos y a través de Mesoamérica hasta el norte de Sudamérica. Después del descubrimiento de América, los comerciantes europeos introdujeron la yuca a África. Más adelante, en los 1800s, fue llevada también a Asia como un cultivo de seguridad alimentaria y además para la extracción de su almidón. De esta manera, en el siglo XX la yuca alcanza un importante posicionamiento como cultivo alimenticio expandiéndose considerablemente en el África subsahariana, la India, Indonesia y Filipinas (Howeler, 2012). En la mayoría de los países de Asia donde se cultiva la yuca (China, Tailandia y Vietnam) el almidón se usa como fécula, perlas de almidón o como alimento animal y para uso industrial. En los países de América Latina y África su principal uso es como fuente básica de alimento. Actualmente la yuca se cultiva en América, Asia y África (Ospina y Ceballos, 2002).

La yuca es cultivada principalmente por pequeños agricultores, los cuales la tienen como cultivo de bajos ingresos, pero a pesar de su producción a pequeña escala logran rendimientos que alcanzan a suplir las demandas de consumo (Ospina y Ceballos, 2002). Se estima que la producción anual de yuca en el mundo para 2017 fue de 278 millones de toneladas (FAO, 2017). La expansión del cultivo en términos de hectáreas sembradas ha crecido más rápidamente en África y Asia que en América. La producción de yuca solo en Nigeria representa un 36 % más del total producido en Latinoamérica y mucho más de lo que se siembra en Asia. África es el mayor productor de yuca en el mundo con el 58 % de la producción. Los principales países productores son Nigeria, la República Democrática del Congo y Ghana; estos tres países alcanzan alrededor del 30 % de la producción mundial. Latinoamérica produce el 11 % y Asia el 31 % (FAO, 2017). En Latinoamérica los principales productores son Brasil, Paraguay y Colombia (FAO, 2017). La producción de yuca en Colombia en el 2015 fue de 2,5 millones de toneladas en un área de siembra de 181 092 hectáreas. Las principales regiones productoras son la costa Caribe, los Andes orientales y la amazonia con el 52,2 %, 19,6 % y 8,9 %, respectivamente, de la participación en la producción anual (Aguilera, 2012).

La yuca es principalmente un cultivo del trópico, que se puede sembrar en terrenos marginales, con largos períodos de sequía y en suelos que pueden ser infértiles y ácidos (Suarez y Mederos, 2011). Dado que se propaga vegetativamente a partir de estacas de tallos, el material de plantación o semilla

es de bajo costo y fácilmente disponible, características que la hacen atractiva para el productor.

El principal producto económico derivado de la yuca son sus raíces, las cuales se utilizan en un amplio rango de aplicaciones. El almidón se emplea básicamente como *i*) raíz fresca y procesada para alimentación humana, *ii*) materia prima en la industria de alimentos, *iii*) en la producción de alimentos balanceados para animales y *iv*) materia prima de industrias no alimenticias (textil, papeles y adhesivos) (Suarez y Mederos, 2011).

En Colombia, las pequeñas comunidades productoras tienen a las raíces como alternativa de seguridad alimentaria y muy poco para alimentación animal. A pesar de la diversidad de usos, en Colombia se dificulta la agroindustria debido a que la producción se concentra en unas épocas del año a causa de la estacionalidad de las lluvias; además, las raíces que se tardan en cosechar o se almacenan por largos periodos de tiempo pierden calidad y por supuesto valor comercial (Aguilera, 2012). Vale la pena destacar que en algunas comunidades indígenas, especialmente de la amazonia, la yuca se siembra en chagras, un sistema de agricultura familiar y tradicional en el que se cultivan diferentes plantas con fines no solo de consumo sino también cultural, representando un elemento importante, tanto de soberanía alimentaria como de identidad (Pérez *et al.*, 2019).

Diversidad de la yuca

La planta progenitora de todas las variedades de la yuca comercial moderna es *Manihot esculenta* ssp. *flabellifolia*; dichas variedades probablemente se desarrollaron como consecuencia de un solo evento de domesticación (Allem, 1994). En 1999 se identificaron dos especies, *M. esculenta* ssp. *peruviana* y *M. pruinosa* como las especies más relacionadas filogenéticamente, lo que sugiere una ancestría común entre estas especies (Allem, 1999). La mayor diversidad del género *Manihot* se encuentra en Brasil, en el actual Distrito Federal y en el vecino estado de Goias que pertenece a la sabana del Cerrado, por lo que se sugiere que este es su centro de origen. *M. pruinosa* es exclusiva de Goias y el estado de Mato Grosso y crece también en campo abierto, en donde ocurrió un eventual entrecruzamiento simpátrico con *M. esculenta* ssp. *flabellifolia* según Allem (1994). Estos datos confirman así la relación filogenética y de ancestría que existe entre la yuca y las otras dos especies y además el origen geográfico de la planta. Recientemente estas observaciones fueron confirmadas a través del análisis de la secuencia del genoma de 58 variedades diferentes provenientes de distintos lugares del planeta y que incluían variedades silvestres y cultivadas (Bredeson *et al.*, 2016). El trabajo de Bredeson *et al.* (2016) encontró evidencia de hibridación interespecífica e introgresión, con ancestría mixta en yuca y sus parientes, lo cual confirma la mezcla

interespecífica que moldeó la domesticación del cultivo. Este estudio también reveló un fuerte cuello de botella materno al inicio de su domesticación, evidenciado por una limitada diversidad de secuencias genómicas de cloroplasto en las variedades cultivadas en relación con las progenitoras silvestres (Bredeson *et al.*, 2016).

La yuca se puede dividir en dos grandes grupos, la amarga y la dulce. Al interior de cada uno de ellos se ha podido establecer que hay una diversidad intraespecífica importante (Bradbury *et al.*, 2013). Los primeros análisis de diversidad genética de la yuca se realizaron utilizando los marcadores de tipo AFLPs (Amplified Fragment Length Polymorphic) y SSRs (Simple Sequence Repeats) (Chavarriaga *et al.*, 1998; Elias *et al.*, 2001a; Fregene *et al.*, 2003; Tovar *et al.*, 2015; Motero-Rojas *et al.*, 2017). Sin embargo, el tipo de marcadores que se ha impuesto en la actualidad es el de los SNPs (Single Nucleotide Polymorphism) (Kawuki *et al.*, 2009; Peña-Venegas *et al.*, 2014). En varios casos la diversidad morfológica se ha correlacionado en lo sustancial con los datos moleculares (Elias *et al.*, 2001b, Elias *et al.*, 2004; Tiago *et al.*, 2016). Los mayores niveles de diversidad genética también se han encontrado en Suramérica, particularmente en la región de la amazonia, tal como se espera que ocurra al ser el centro de origen geográfico de la yuca cultivada (Olsen y Shaal, 1999, Elias *et al.*, 2001a;b; Elias *et al.*, 2004; Emperaire y Peroni, 2007; Heckler *et al.*, 2008). Un estudio encontró, por ejemplo, que en una sola comunidad indígena en el sur de Guyana la diversidad fue equivalente a la que se encuentra representada por la colección central mundial de yuca presente en el banco de germoplasma del CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical) (Elias *et al.*, 2000). Así mismo, la genotipificación de la yuca presente en cuatro comunidades indígenas amazónicas colombianas permitió identificar 129 genotipos de yuca nuevos para la colección de germoplasma del CIAT (Peña-Venegas *et al.*, 2014).

La yuca, potencia en calorías pero con retos nutricionales frente a la seguridad alimentaria

A pesar de que las raíces de yuca acumulan importantes cantidades de almidón, y en consecuencia representa una de las principales fuentes de carbohidratos y energía para la población humana, es muy pobre en términos de valor nutricional. Las raíces de yuca tienen bajo contenido de proteína (0,7 % a 1,3 % del peso fresco, Ngiki *et al.*, 2014) (Tabla 1). El total de contenido de aminoácidos de la yuca es de aproximadamente 0,254 g por 100 g y el contenido de lisina es de aproximadamente 0,010 g por 100 g. La proteína en yuca tiene un alto contenido de arginina, pero es baja en metionina. Una dieta basada en yuca provee menos del 30 % de los requerimientos proteicos mínimos, por lo que se requieren fuentes alimenticias adicionales para asegurar una dieta balanceada.

Tabla 1. Contenido de minerales en hojas y raíces de yuca

	Chávez <i>et al.</i> , 2005 ¹		Achidi <i>et al.</i> , 2008 ²		Ravindran y Ravindran, 1988 ³		
	Hojas	Raíces	TMS30572	TME1	Muy jóvenes	Jóvenes	Maduras
Hierro	61,5 - 151	7,7 - 12,6	20	21	15	24	27
Manganeso	50,3 - 87,2	0,8 - 3,2	20	25	24	16	16
Cobre	6,2 - 8,1	1,4 - 3	5	7	4	5	4
Zinc	39,2 - 63,7	4,4 - 8,6	12	15	21	17	16
Calcio	8233 - 16 295	379 - 945	748	697	430	960	1140
Magnesio	4786 - 9735	806 - 1.479	311	353	370	310	260
Sodio	9,2 - 15,8	25,8 - 173,1	38	38	80	110	120
Potasio	8465 - 11 387	7574 - 10 389	2000	2044	2260	1850	1380
Fósforo	2631 - 3504	1012 - 1556	387	388	230	200	180

¹ Valores obtenidos a partir de 20 variedades de yuca. Los datos reportados son en mg/kg de materia seca.

² Valores reportado solo para hojas de dos variedades de yuca (TMS30572 y TME1). Los datos reportados son en mg/100 mg de materia seca.

³ Valores reportados para hojas de la variedad local MU22 (Sri Lanka). Los datos reportados son en mg/100 mg de materia seca.

Para tratar de resolver estas dificultades se han generado aproximaciones combinadas entre mejoramiento convencional y transformación genética. Así por ejemplo, se han desarrollado nuevas variedades de yuca ricas en provitamina A y carotenoides a través de trabajos del CIAT y del IITA (International Institut of Tropical Agriculture) en el marco del gran programa HarvestPlus (Ilona *et al.*, 2017). Se ha logrado generar variedades de yuca con alto contenido de vitamina A mediante el cruzamiento de variedades provenientes de la amazonia con variedades africanas (Chávez *et al.*, 2005). Sin embargo, varios estudios han mostrado que estas variedades pueden llegar a ser bastante pobres en otros nutrientes como Fe y Zn (Maziya y Kling, 2000), por lo cual su ingesta requiere el acompañamiento de otras fuentes nutricionales y de cambios en las dietas (Talsma *et al.*, 2017).

A través de biotecnología se han generado yucas transgénicas que mediante la introducción de genes han permitido acumular altas concentraciones de hierro y zinc. Así por ejemplo, la sobre expresión de un gen proveniente de un alga en plantas de yuca permitió la acumulación de hierro en las raíces (Ihemere *et al.*, 2012). Sin embargo, estos resultados se obtuvieron en plantas crecidas en invernadero, pero no se mantuvieron bajo condiciones de campo. También se logró la sobre expresión de un par de genes de *Arabidopsis* que codifican para transportadores de zinc, lo que permitió incrementar hasta en un 25 % la cantidad de este mineral en las raíces de las plantas transgénicas comparadas con las silvestres. Sin embargo, las plantas transgénicas mostraron una reducción en el tamaño de sus raíces y de toda la planta, probablemente debido a la deficiencia de zinc en sus partes aéreas (Gaitán-Solís *et al.*, 2015). Más recientemente, en estudios conducidos en campo en Puerto Rico, se ha reportado la generación de plantas de yuca transgénicas

que incrementan la acumulación de hierro y zinc mediante la sobre expresión de un par de genes provenientes de *Arabidopsis*. Estas plantas mostraron fenotipos normales y mediante ensayos de retención y bioaccesibilidad se encontró que el consumo de estas yucas podía proveer entre un 40-50 % y un 60-70 % del requerimiento estimado promedio de hierro y zinc, respectivamente, para niños de 1-6 años y madres no gestantes (Narayanan *et al.*, 2019).

La aceptación de cultivos transgénicos (OGM, Organismos Genéticamente Modificados) no es muy popular y menos para aquellos cultivos de seguridad alimentaria como la yuca. Solo a manera de ejemplo, un estudio realizado en Brasil mostró que hubo una aceptación general positiva del consumidor (no del productor) por los OGMs dirigidos al incremento en vitamina A, pero ellos mismos reconocieron que prefieren que sea a través de mejoramiento convencional (González *et al.*, 2009). La aceptación de yucas transgénicas será aún más difícil de lograr en la región amazónica, dado que es su centro de origen y que puede tener causas nefastas para la diversidad de la yuca en la zona. Por estas razones, la estrategia de mejoramiento no convencional para incrementar valores nutricionales en yuca debe considerarse con cuidado de acuerdo con las particularidades de la zona a la cual se vaya a dirigir. Adicionalmente, otra limitante que muestran los estudios de transformación genética es que el mejoramiento dirigido hacia un carácter generalmente afecta otros, como la producción. Otro aspecto que es importante reconocer en los proyectos de biofortificación es la importancia de los estudios y programas de aceptación, en particular la necesidad de incorporar iniciativas y campañas destinadas a difundir la importancia de los cultivos biofortificados (Bechoff *et al.*, 2018a). Con excepción del arroz dorado, en la mayoría de los casos los cultivos biofortificados han

tenido una relativa buena aceptación (Manjeru *et al.*, 2019). Por ejemplo, un estudio llevado a cabo en una comunidad rural en Suráfrica mostró que hubo una percepción positiva en la preparación de platos tradicionales utilizando maíz y patata dulce biofortificados en provitamina A (Govender *et al.*, 2019). En relación con la yuca, un reciente estudio demostró que había una mejor percepción por parte de los consumidores por la yuca amarilla que por la yuca de color blanco tradicional (Bechoff *et al.*, 2018b).

Una alternativa a las aproximaciones de mejoramiento no convencional es explotar la diversidad propia que presenta la especie *Manihot esculenta* para buscar variedades que posean naturalmente mejores valores nutricionales en sus raíces. En este sentido, un estudio evaluó el perfil metabólico de 23 variedades de yuca de la colección de germoplasma del CIAT. Se emplearon plántulas propagadas *in vitro* y se pudieron evaluar más de 9000 características metabólicas, encontrando que las variedades suramericanas eran las más diversas (Drapal *et al.*, 2019). Se hace entonces necesario continuar y profundizar más en este tipo de estudios y estrategias, centrándose en la explotación de la diversidad de la yuca como fuente de variedades y genes que puedan emplearse en programas de investigación. Por ejemplo, gracias al desarrollo de las nuevas herramientas de secuenciación, es posible combinar los datos obtenidos de diversidad a escala genómica con la caracterización fenotípica para realizar estudios de asociación que permitan identificar variantes alélicas asociadas con un mayor incremento en la acumulación de micronutrientes (Huang y Han, 2014).

El valor nutricional: una característica genética compleja

El metabolismo, asimilación, acumulación y movilización de micronutrientes en plantas es un proceso en el cual intervienen muchos genes y en consecuencia es un rasgo cuya base genética es compleja. Como todos los rasgos cuantitativos, es afectado por las condiciones ambientales (Palmgren *et al.*, 2008; Kobayashi y Nizhizawa, 2012). Lograr incrementar el contenido de micronutrientes en las plantas como una solución alternativa al problema de la deficiencia nutricional requiere la identificación de los genes implicados en su metabolismo y acumulación, así como determinar su función. Al tratarse de rasgos complejos, una aproximación válida ha sido el mapeo de *loci* de rasgos cuantitativos (QTL, del inglés Quantitative Trait Loci), en el que la disponibilidad de marcadores genéticos funcionales representa un elemento clave para facilitar el descubrimiento de genes (Lau *et al.*, 2015). Un estudio realizado en maíz permitió detectar varios QTL asociados con la concentración, contenido y producción de minerales, revelando la importancia de la combinación de los estudios genéticos con la caracterización fenotípica de poblaciones segregantes (Gu *et al.*, 2015). Otro estudio realizado en

mijo perla permitió identificar dos QTLs asociados con el contenido de Fe y Zn, que explican el 19 y el 36 % de la varianza fenotípica, respectivamente (Kumar *et al.*, 2016). Estudios similares han identificado QTLs asociados con la acumulación de micronutrientes en otros cultivos como frijol (Blair *et al.*, 2009) trigo (Genc *et al.*, 2009) y frijol mungo (Sompong *et al.*, 2012), entre otros. Es importante resaltar que, como se mencionó anteriormente, al tratarse de una característica compleja, el factor ambiental puede tener una fuerte incidencia en la expresión del fenotipo. Por esta razón es importante destacar la necesidad de conducir los estudios de evaluación fenotípica considerando la interacción Genotipo x Ambiente, los cuales permitirán identificar las mejores condiciones de siembra para alcanzar valores nutricionales óptimos.

Las hojas de yuca: una oportunidad para aliviar el hambre oculta

Una alternativa complementaria y no excluyente con los programas destinados a incrementar el contenido de minerales y vitaminas en las raíces es expandir el uso del consumo de hojas de yuca. Se ha estimado que a partir de una hectárea de yuca se puede llegar a obtener cerca de 17 mil kilos por hectárea de forraje verde (Gómez *et al.*, 2016). Desde los años 50s se ha logrado determinar que las hojas de yuca contienen importantes cantidades de proteínas, carotenos, vitaminas B y C y minerales. Los primeros trabajos realizados por Rogers (1959) identificaron que las hojas de yuca de plantas de 11-12 meses poseen 20,6 a 30,4 % de proteína cruda expresada como un porcentaje sobre el contenido de materia seca. Un estudio comparativo entre variedades brasileñas y de Jamaica encontró que existía una variación entre el 17,8 y el 34,8 %, también reportada como porcentaje de proteína sobre peso seco (Rogers y Milner, 1963). Posteriormente, un trabajo de Eggum constató también altos niveles de proteína (30 - 40 %) en las hojas de plantas de yuca colectadas en Nigeria con una alta digestibilidad (70 - 80 %) y con concentraciones adecuadas de aminoácidos, excepto de metionina (Eggum, 1970). Son varios los estudios recientes que han cuantificado la presencia de diferentes minerales, vitaminas y contenidos proteicos en hojas y raíces de diferentes variedades de yuca con amplios rangos en sus valores (Tabla 1). Al respecto, uno de los estudios recientes realizados en el CIAT que empleó algunos genotipos de la colección de germoplasma (Chávez *et al.*, 2005) permitió identificar que efectivamente hay una amplia variabilidad y que las hojas son altamente ricas en minerales (Tabla 1). Así mismo, los valores de ácido ascórbico en hojas oscilaron entre 1,7 y 419 mg/100g de tejido fresco. En las raíces generalmente estos valores solo fueron la décima parte. El contenido de carotenos en hojas también fue muy variable, entre 23 y 86 mg/100 g de tejido fresco, con repetición en el patrón en raíces

(1/10 del obtenido en hojas). Los valores de contenido de proteína, minerales y vitaminas (incluyendo carotenos) obtenidos en este estudio del germoplasma de CIAT, son de manera general similares a los reportados por Achidi *et al.* (2008), quienes compararon el valor nutricional de hojas de dos variedades de yuca africanas (TME1 y TMS30572) (Tabla 1). Sin embargo, es importante considerar que las diferencias observadas entre estudios no solo obedecen a la variabilidad genética, sino también a los métodos de extracción y análisis, a la porción de la hoja que se emplea, el estado de madurez y a las condiciones ecológicas de crecimiento.

Además de la variabilidad producto del fondo genético, la composición nutricional tanto en cantidad como en calidad de las hojas, también se ve afectada por factores como la densidad de siembra, la edad de las hojas, la época de corte y la proporción entre hojas, peciolo y tallos.

Las hojas de yuca y su toxicidad

A pesar de su alto valor nutricional, las hojas de yuca no se han empleado ampliamente en la alimentación humana por el miedo asociado con su toxicidad. Las hojas de yuca poseen, además de compuestos cianógenos, factores antinutricionales, tales como un alto contenido de fibra y la presencia de taninos, los cuales son polifenoles que reducen la disponibilidad de nutrientes, la ingesta y la digestibilidad, y que pueden llegar a generar toxicidad dependiendo de la cantidad consumida y del método de preparación (Montagnac *et al.*, 2009a;b). Paradójicamente, algunos de estos compuestos también pueden actuar como antioxidantes y anticancerígenos.

La mayor dificultad que enfrentan las hojas de yuca para su consumo es que contienen altas concentraciones de compuestos cianógenos, los cuales, para el caso particular de esta planta, se presentan bajo tres formas diferentes: glucósido cianogénico (95 % de linamarina y 5 % de lotaustratina), cianohidrininas y cianuro libre (Montagnac *et al.*, 2009a). La enzima linamarasa cataliza la hidrólisis de compuestos cianógenos a glucosa y cianohidrininas, mientras que la hidroxinitrila liasa cataliza la hidrólisis de las cianohidrininas del paso anterior a cianuro de hidrógeno (HCN) y a una cetona. Estas enzimas hidrolíticas se ubican en las paredes celulares y se liberan cuando el tejido vegetal es molido, triturado o masticado. El HCN es tóxico para la mayoría de los organismos aeróbicos ya que se une al citocromo oxidasa y bloquea la adquisición de oxígeno. Por esta razón las hojas de yuca deben procesarse antes de su consumo. En términos generales, las hojas de yuca pueden llegar a contener 100 ppm de cianuro total, siendo el máximo permitido de 10 ppm según la FAO (Latif y Muller, 2015). Como se mencionó anteriormente, el nivel de glucósidos cianogénicos varía según las condiciones edafoclimáticas, las variedades y el medio ambiente. Las hojas de yuca tienen

de cinco a 20 veces más potencial cianogénico que el de las raíces, pero también 200 veces más actividad de la enzima linamarasa. Las hojas jóvenes tienen el nivel más alto de linamarina, el cual disminuye al 50 - 70 % en hojas maduras (Latif y Muller, 2015). Aunque algunas veces el sabor amargo de los glucósidos cianogénicos funciona como un elemento que permite distinguir aquellas variedades u hojas con alto contenido de cianuro, hay que tener precauciones pues este método puede ser engañoso (Latif y Muller, 2015).

Son varios los estudios que se han dirigido en los últimos años a reducir la concentración de los compuestos cianógenos de las hojas de yuca (Latif y Muller, 2015). Actualmente existen diferentes técnicas de procesamiento para eliminarlos y su efectividad depende de los pasos de procesamiento, de la secuencia utilizada y también del tiempo. Machacar o triturar es una técnica bastante efectiva para la eliminación de glucósidos cianogénicos porque rompe los compartimentos celulares, permitiendo así el contacto directo entre la linamarina y la enzima linamarasa que cataliza su descomposición hidrolítica. En los países de África en que utilizan las hojas de yuca en su dieta, como en la República del Congo, es una práctica muy común el machacar las hojas de yuca por 15 minutos y posteriormente someterlas directamente a calor o en agua en ebullición por tiempos que varían entre diez a 120 minutos. La trituración disminuye el contenido de cianógeno en un 63 % a 73 % y si se acompaña del tratamiento de calentamiento se puede llegar a eliminar hasta el 97 % de los glucósidos cianógenos y completamente la cianohidrina y el cianuro libre (Montagnac *et al.*, 2009b). Sin embargo, este proceso puede eliminar algunos compuestos nutritivos. Otros métodos alternativos incluyen el secado al sol de las hojas y el uso de bicarbonato de sodio para reducir el tiempo del tratamiento al calor durante la cocción (Latif *et al.*, 2019).

Yuca: pan y carne

Las hojas de yuca, a pesar de las dificultades descritas anteriormente, han sido y son consumidas por algunas comunidades. A nuestro entender y con base en la revisión bibliográfica consultada, no se ha reportado ningún caso de intoxicación grave por el consumo de las hojas de yuca en aquellos países que la han incorporado en su dieta. Se ha reportado que indígenas de Brasil y Nueva Zelanda emplean las hojas de yuca de manera esporádica. Sin embargo en algunos países de África y Asia existen varias recetas a base de hojas de yuca y se encuentra en algunos casos hojas de yuca empacadas y comercializadas (Latif y Muller, 2015). Las hojas de yuca se consumen como vegetales en cerca del 60 % de los países del África subsahariana y en algunos países asiáticos como Indonesia, Filipinas y Malasia. En Tanzania, Kenia, Malawi y Madagascar, la yuca se cultiva para la producción de raíces, pero también para la obtención de hojas que se consumen como verduras. Según

un dicho en el Congo, la yuca es “suficiente”, porque de ella se obtiene el “pan” (a partir de las raíces) y la “carne” (de las hojas) (Achidi *et al.*, 2008). Se debe entender esta como una expresión popular, cuyo mensaje es que la yuca es un cultivo multipropósito que tiene el potencial, sino de suplir todas las necesidades nutricionales, si de convertirse en un elemento clave para la reducción de la desnutrición humana. La expresión quiere significar que con una sola planta se puede suplir, por un lado y de manera parcial, las necesidades calóricas a partir del almidón, que en este caso sería proporcionado por las raíces de la yuca; en este sentido la yuca representaría lo que es el consumo de pan en los países europeos. Por otro lado, el valor nutricional de las hojas, si bien no alcanza nunca el proporcionado por el consumo de la carne, si puede complementar o hacer menos grave las deficiencias por la falta de su ingestión. En el Congo, donde se escucha popularmente esta expresión, las hojas de yuca representan más del 60 % de todas las verduras consumidas.

Son diversas las recetas y las formas bajo las cuales se consumen las hojas de yuca en África y Asia. Las hojas de yuca se sirven principalmente como parte de una salsa, que se comen con platos con almidón como *Chikwange*, *fufu* de yuca, raíces de yuca, arroz y ñame. También se consumen cocidas como vegetales verdes y se preparan como las hojas de espinaca (República Centroafricana, Gabón, Rwanda y Burundi). En Sierra Leona, un plato típico de hojas de yuca incluye pescado, cacahuetes, pimientos y cebollas, el cual en conjunto puede proporcionar la proteína diaria requerida para un adulto si consume 150 g por día o para un niño si consume 75 g (Latif y Muller, 2015).

Las hojas de yuca también son consumidas por mujeres embarazadas en Sierra Leona y Liberia con el fin de aumentar la producción de leche materna (Latif y Muller, 2015). Para combatir la desnutrición en Brasil, se desarrolló un suplemento alimenticio denominado “multimistura” utilizando polvo de hojas de yuca, el cual fue administrado especialmente a mujeres embarazadas y a niños (Latif y Muller, 2015).

Los casos reportados en esta revisión muestran que en varios países de África se consumen las hojas de yuca. Dado el alto contenido de cianuro de las hojas y sin los tratamientos previos, se podría considerar que esa sería una costumbre irresponsable. Hasta donde se reporta en la literatura, no se ha hecho un seguimiento o estudio para identificar las variedades más adecuadas, ni tampoco existen recomendaciones específicas para su detoxificación. Aun así, hasta donde sabemos, no se han reportado casos de intoxicación, al menos graves que ameriten un reporte o difusión. Posiblemente el proceso de cocción realizado en los países africanos que consumen las hojas ha permitido asegurar la eliminación de un gran porcentaje de los compuestos cianógenos. Sin embargo, también es necesario considerar el efecto por acumulación gradual de estos

compuestos (Teles, 2002), por lo que es importante realizar estudios de seguimiento de los niveles de acumulación en poblaciones que consumen las hojas de yuca.

Para el caso particular de Colombia, si la posibilidad de utilizar las hojas de yuca como una alternativa complementaria para resolver el problema de desnutrición se traza como un objetivo a largo plazo, una de las prioridades deberá ser la caracterización del contenido de micronutrientes y de compuestos cianógenos en las variedades que actualmente se siembran en Colombia. Esta caracterización permitirá realizar recomendaciones de cuáles son las variedades más propicias para el consumo de las hojas, sin indicar con esto que su consumo se deba incentivar de manera inmediata. En segundo lugar, deben realizarse pruebas que permitan realizar recomendaciones sobre la manera en que se deben procesar las hojas para eliminar o al menos reducir la cantidad de compuestos cianógenos en las hojas. La ebullición parece ser la estrategia más adecuada, pero disminuye las propiedades y cualidades de los micronutrientes.

CONCLUSIONES

En conclusión, existe evidencia suficiente para considerar el potencial de las hojas de yuca como una fuente nutricional alternativa siempre y cuando se logren superar varios de los obstáculos mencionados en este trabajo: generar conocimiento sobre las bases genéticas asociadas con la acumulación de micronutrientes, identificar y desarrollar las variedades adecuadas (alto valor nutricional y bajos valores de compuestos cianógenos) e identificar un método de cocción adecuado que permita la eliminación de compuestos cianógenos sin perder las cualidades nutricionales. Este trabajo debe estar acompañado de iniciativas y campañas pedagógicas, educativas y publicitarias que permitan la mejor y adecuada adopción de este subproducto de la yuca.

Para alcanzar su potencial, es necesario desarrollar varios trabajos previos que se enfoquen principalmente en conocer mejor la diversidad, la variabilidad y los determinantes genéticos asociados, tanto con el metabolismo y la acumulación de micronutrientes, como con la ruta de biosíntesis de compuestos cianógenos. Este tipo de trabajos incluyen, por ejemplo, la caracterización del contenido nutricional en las colecciones de germoplasma de yuca, para así identificar las más promisorias. El desarrollo actual de la metabolómica permitirá un análisis a gran escala de manera más rápida y eficiente. Así mismo, la información genómica, combinada con la fenotipificación de los rasgos asociados con el incremento en valor nutricional, permitirán el desarrollo de estudios de asociación que no solo brindarán la posibilidad de caracterizar a escala genómica las variedades de yuca, sino también identificar los genes subyacentes. Este conocimiento ayudará a guiar el desarrollo de las mejores estrategias para la selección de variedades y emplearlas

en programas de mejoramiento genético. Otra de las alternativas es explorar aproximaciones de transformación genética encaminadas a bloquear específicamente la ruta de biosíntesis de compuestos cianógenos, idealmente dirigidos a las hojas. Sin embargo, es importante considerar posibles efectos no deseados, como la susceptibilidad a herbívoros, por ejemplo. Otro aspecto que debe considerarse en futuros programas de investigación es el desarrollo de métodos que permitan eliminar los compuestos cianógenos sin disminuir el valor nutricional. Una de las alternativas estudiadas recientemente es el empleo de bicarbonato combinado con una cocción durante un menor tiempo. Este sería un punto de partida a explorar, pero sin duda será importante considerar algunos otros.

Finalmente, un aspecto importante es que en paralelo se deben adelantar iniciativas de trabajo comunitario para identificar la percepción que tienen los consumidores sobre la introducción de las hojas de yuca en la dieta. Una estrategia para obtener esta información e incentivar en el futuro el consumo de las hojas de yuca, podría ser que en las ferias agroalimentarias se organicen concursos gastronómicos en que se elaboren recetas tradicionales que incorporen las hojas de yuca o se innoven nuevas recetas empleándolas. Antes de la organización de estas ferias se deben realizar fuertes campañas pedagógicas que alerten a la comunidad sobre los peligros de un uso indebido o preparación inadecuada de las hojas de yuca. Para este tipo de objetivos es muy importante el desarrollo de estrategias de innovación participativa, en las cuales los consumidores y los productores sean partícipes activos de las actividades de investigación, lo que permitiría una mayor probabilidad de apropiación del conocimiento. Solo esta combinación de estrategias y comunicación investigación-academia-comunidad permitirán en un futuro un posible uso de las hojas de yuca como una alternativa nutricional.

AGRADECIMIENTOS

A Johana Soto y Adriana Bernal por las discusiones fructíferas que enriquecieron esta revisión. Agradecimientos especiales a los dos revisores anónimos cuyas contribuciones permitieron mejoras significativas al manuscrito. Los autores expresan su agradecimiento al MinCiencias, convocatoria Ideas para el Cambio (contrato 079-2020) y a la Dirección de Investigaciones Sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia (Codigo Hermes 47309).

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

REFERENCIAS

- Achidi AU, Ajayi OA, Maziya-Dixon B, Bokanga M. The effect of processing on the nutrient content of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) leaves. *J Food Process Preserv.* 2008;32(3):486-502. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2007.00165.x>
- Aguilera M. La yuca en el Caribe colombiano: de cultivo ancestral a agroindustrial. Cartagena; 2012. Report No.: 158 de 2012. Disponible en: <http://www.banrep.gov.co/docum/LecturaFinanzas/pdf/dtser158.pdf>. Citado: 14 Ene 2020.
- Allem AC. The origin of *Manihot esculenta* Crantz (Euphorbiaceae). *Genet Resour Crop Evol.* 1994;41:133-150. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF00051630>
- Allem AC. The closest wild relatives of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Euphytica.* 1999;107:123-33. Doi: <https://doi.org/10.1023/A:1026422229054>
- Amoroso L. The Second International Conference on Nutrition: Implications for Hidden Hunger. *World Rev Nutr Diet.* 2016;115:142-152. Doi: <https://doi.org/10.1159/000442100>
- Balarajan Y, Ramakrishnan U, Özaltin E, Shankar AH, Subramanian SV. Anemia in low-income and middle-income countries. *Lancet.* 2011;378(9809):2123-35. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)62304-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)62304-5)
- Bechoff A, Chijioke U, Westby A, Tomlins KI. “Yellow is good for you”: consumer perception and acceptability of fortified and biofortified cassava products. 2018;8259:1-22. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203421>
- Bechoff A, Tomlins K, Fliedel G, Lopez-lavalle LAB, Westby A, Hershey C, *et al.* Cassava traits and end-user preference: relating traits to consumer liking, sensory perception, and genetics. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2018;58(4):547-567. Doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1202888>
- Bezanson K, Isenman P. Scaling up nutrition: a framework for action. *Food Nutr Bull;* 2010;31(1):178-186. Doi: <https://doi.org/10.1177/156482651003100118>
- Blair MW, Astudillo C, Grusak MA, Graham R, Beebe SE. Inheritance of seed iron and zinc concentrations in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Mol Breed.* 2009;23:197-207. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11032-008-9225-z>
- Bredeson JV, Lyons JB, Prochnick SE, Wu GA, Ha CM, Edsinger-Gonzales E, *et al.* Sequencing wild and cultivated cassava and related species reveals extensive interspecific hybridization and genetic diversity. *Nat Biotechnol.* 2016;34:562-570. Doi: <http://doi.org/10.1038/nbt.3535>
- Black RE, Victora CG, Walker SP, Bhutta ZA, Christian P, de Onis M, *et al.* Maternal and child undernutrition and overweight in low-income and middle-income countries. *Lancet.* 2013;382(9890):427-51. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)60937-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)60937-X)

- Bradbury EJ, Duputié A, Delètre M, Roullier C, Narváez-Trujillo A, Manu-Aduening JA, *et al.* Geographic differences in patterns of genetic differentiation among bitter and sweet manioc (*Manihot esculenta* subsp. *esculenta*; Euphorbiaceae). *Am J Bot.* 2013;100(5):857–66. Doi: <https://doi.org/10.3732/ajb.1200482>
- Chavarriga-Aguirre PP, Maya MM, Bonierbale MW, Kresovich S, Fregene MA, Tohme J, *et al.* Microsatellites in cassava (*Manihot esculenta* Crantz): discovery, inheritance and variability. *Theor Appl Genet.* 1998;97:493–501. Doi: <https://doi.org/10.1007/s001220050>
- Chávez AL, Sánchez T, Jaramillo G, Bedoya JM, Echeverry J, Bolaños EA, *et al.* Variation of quality traits in cassava roots evaluated in landraces and improved clones. *Euphytica.* 2005;143(1-2):125–33. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10681-005-3057-2>
- de Onis M, Branca F. Childhood stunting: a global perspective. *Matern Child Nutr.* 2016;12(S1):12–26. Doi: <https://doi.org/10.1111/mcn.12231>
- Drupal M, Barros de Carvalho E, Ovalle Rivera TM, Lopez-Lavalle LAB, Fraser PD. Capturing biochemical diversity in Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) through the application of metabolite profiling. *J Agric Food Chem.* 2019;67(3):986–993. Doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b04769>
- Eggum BO. The protein quality of cassava leaves. *Br J Nutr.* 1970;24(3):761–8. Doi: <https://doi.org/10.1079/BJN19700078>
- Elias M, Panaud O, Robert T. Assessment of genetic variability in a traditional cassava (*Manihot esculenta* Crantz) farming system, using AFLP markers. *Heredity.* 2000;85:219–30. Doi: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2540.2000.00749.x>
- Elias M, Mckey D, Panaud O, Anstett MC, Robert T. Traditional management of cassava morphological and genetic diversity by the Makushi Amerindians (Guyana, South America): perspectives for on-farm conservation of crop genetic resources. *Euphytica.* 2001a;120:143–57. Doi: <https://doi.org/10.1023/A:1017501017031>
- Elias M, Penet L, Vindry P, McKey D, Panaud O, Robert T. Unmanaged sexual reproduction and the dynamics of genetic diversity of a vegetatively propagated crop plant, cassava (*Manihot esculenta* Crantz) in a traditional farming system. *Mol Ecol.* 2001b;10(8):1895–907. Doi: <https://doi.org/10.1046/j.0962-1083.2001.01331.x>
- Elias M, Muhlen GS, Mckey D, Roa AC, Tohme J. Genetic diversity of traditional South American landraces of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz): an analysis using microsatellites. *Econ Bot.* 2004;58:242–56. Doi: [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2004\)058\[0242:GDOTSA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2004)058[0242:GDOTSA]2.0.CO;2)
- Empereire L, Peroni N. Traditional management of agrobiodiversity in Brazil : a case study of Manioc. *Hum Ecol.* 2007;35(6):761–8. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10745-007-9121-x>
- FAO. *Food Outlook, Biannual Report on Global Food Markets.* Trade and Markets Division of FAO. <http://www.fao.org/3/CA2320EN/ca2320en.pdf>. Citado en: 01 Ene 2018.
- Fischer T, Byerlee D, Edmeades G. Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world?. Canberra: ACIAR; 2014. p. 634.
- Fregene MA, Suarez M, Mkumbira J, Kulembeka H, Ndedya E, Kulaya A, *et al.* Simple sequence repeat (SSR) diversity of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) landraces: genetic diversity and differentiation in a predominantly asexually propagated crop. *Theor Appl Genet.* 2003;107:1083–93. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00122-003-1348-3>
- Gaitán-Solís E, Taylor NJ, Sirtunga D, Stevens W, Schachtman DP. Overexpression of the transporters AtZIP1 and AtMTP1 in cassava changes zinc accumulation and partitioning. *Front Plant Sci.* 2015;6:492. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00492>
- Genc Y, Verbyla AP, Torun AA, Cakmak I, Willsmore K, Wallwork H, McDonald GK. Quantitative trait loci analysis of zinc efficiency and grain zinc concentration in wheat using whole genome average interval mapping. *Plant Soil.* 2008;314: 49–66. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9704-3>
- Gómez W, Cardona Ayala C, Rivero S. Producción y calidad del forraje de tres variedades de yuca bajo tres densidades de siembra. *Temas Agrarios.* 2016;21(2): 9-20. Doi: <https://doi.org/10.21897/rta.v21i2.897>
- González C, Johnson N, Qaim M. Consumer acceptance of second-generation GM foods: the case of biofortified Cassava in the North-east of Brazil. *J Agric Econ.* 2009;60(3):604–24. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.2009.00219.x>
- Govender L, Pillay K, Siwela M, Modi AT, Mabhaudhi T. Consumer perceptions and acceptability of traditional dishes prepared with provitamin A-biofortified maize and sweet potato. *Nutrients.* 2019;11(7):1577. Doi: <https://doi.org/10.3390/nu11071577>
- Gu R, Chen F, Liu B, Wang X, Liu J, Li P, *et al.* Comprehensive phenotypic analysis and quantitative trait locus identification for grain mineral concentration, content, and yield in maize (*Zea mays* L.). *Theor Appl Genet.* 2015;128(9):1777–1789. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00122-015-2546-5>
- Heckler S, Zent S. Piara Manioc Varietals : Hyperdiversity or social currency? *Hum Ecol.* 2008;36(5):679–97. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10745-008-9193-2>
- Henry RJ. Innovations in plant genetics adapting agriculture to climate change. *Curr Opin Plant Biol.* 2019;S1369-5266(19)30112-8. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.11.004>
- Howeler RH. The cassava handbook : a reference manual based on the Asian Regional Cassava Training Course, held in Thailand. Bangkok: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); 2012. 801 p.

- Huang X, Han B. Natural variations and genome-wide association studies in crop plants. *Annu Rev Plant Biol.* 2014;65:531-551. Doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-035715>
- Ihemere UE, Narayanan NN, Sayre RT. Iron biofortification and homeostasis in transgenic Cassava roots expressing the algal iron assimilatory gene, FEA1. *Front Plant Sci.* 2012;3:171. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00171>
- Ilona P, Bouis HE, Palenberg M, Moursi M, Oparinde A. Vitamin A cassava in Nigeria: crop development and delivery. *African J Food Agric Nutr Dev.* 2017;17(2):12000-12025. Doi: <https://doi.org/10.18697/ajfand.78.HarvestPlus09>
- Kawuki RS, Ferguson M, Labuschagne M, Herselman L, Kim D-J. Identification, characterisation and application of single nucleotide polymorphisms for diversity assessment in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *Mol Breed.* 2009;23(4):669-84. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11032-009-9264-0>
- Kobayashi T, Nishizawa NK. Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants. *Annu Rev Plant Biol.* 2012;63:131-152. Doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105522>
- Kumar S, Hash CT, Thirunavukkarasu N, Singh G, Rajaram V, Rathore A, *et al.* Mapping quantitative trait loci controlling high iron and zinc content in self and Open pollinated grains of pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.]. *Front Plant Sci.* 2016;7:1636. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01636>
- Latif S, Müller J. Potential of cassava leaves in human nutrition: a review. *Trends Food Sci Technol.* 2015;44(2):147-58. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.006>
- Latif S, Zimmermann S, Barati Z, Müller J. Detoxification of Cassava leaves by thermal, sodium bicarbonate, enzymatic, and ultrasonic treatments. *J Food Sci.* 2019;84(7):1986-91. Doi: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14658>
- Lau WCP, Ruff MY, Ismail MR, Puteh A, Latif MA, Ramli A. Review of functional markers for improving cooking, eating, and the nutritional qualities of rice. *Front Plant Sci.* 2015;6:832. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00832>
- Manjeru P, Van Biljon A, Labuschagne M. The development and release of maize fortified with provitamin A carotenoids in developing countries. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2019;59(8):1284-1293. Doi: <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1402751>
- Maziya-Dixon B, Kling JG, Dixon AM. Genetic Variation in total carotene, iron, and zinc contents of Maize and Cassava genotypes. *Food Nutr Bull.* 2000;21(4):419-22. Doi: <https://doi.org/10.1177/2F156482650002100415>
- Montagnac JA, Davis CR, Tanumihardjo SA. Nutritional value of Cassava for use as a staple food and recent advances for improvement. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 2009a;8(3):181-94. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2009.00077.x>
- Montagnac JA, Davis CR, Tanumihardjo SA. Processing techniques to reduce toxicity and antinutrients of Cassava for use as a staple food. *Compr Rev Food Sci Food Saf.* 2009b;8(1):17-27. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2008.00064.x>
- Muthayya S, Rah JH, Sugimoto JD, Roos FF, Kraemer K, Black RE. The global hidden hunger indices and maps: an advocacy tool for action. *PLoS One.* 2013;8(6). Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067860>
- Narayanan N, Beyene G, Chauhan RD, Gaitán-solís E, Gehan J, Butts P, *et al.* Biofortification of field-grown cassava by engineering expression of an iron transporter and ferritin. *Nat Biotechnol.* 2019;37:144-151. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41587-018-0002-1>
- Ngiki YU, Igwebuiki JU, Moruppa S. Utilization of cassava products for poultry feeding: A review. *Int J Sci Technol.* 2014;2:48-59.
- Olsen KM, Schaal BA. Evidence on the origin of cassava : Phylogeography of *Manihot esculenta*. *Proc Natl Acad Sci USA.* 1999;96:5586-91. Doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.96.10.5586>
- OMS. Organización Mundial de la Salud. ¿Qué es la malnutrición? <https://www.who.int/features/qa/malnutrition/es/>. Citado: 10 Ene 2020.
- Ospina B, Ceballos H. La yuca en el Tercer Milenio: sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización. Bogotá: CIAT, CLAYUCA; 2002. 586 p.
- Palmgren MG, Clemens S, Williams LE, Krämer U, Borg S, Schjørring JK, *et al.* Zinc biofortification of cereals: problems and solutions. *Trends Plant Sci.* 2008;13: 464-473. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.06.005>
- Peña-Venegas CP, Stomph TJ, Vershoor G, Becerra Lopez-Lavalle LA, Struik PC. Differences in manioc diversity among five ethnic groups of the Colombian Amazon. *Diversity.* 2014;6(4):792-826. Doi: <https://doi.org/10.3390/d6040792>
- Pérez D, Mora R, López-Carrascal C. Conservación de la diversidad de yuca en los sistemas tradicionales de cultivo de la Amazonía. *Acta Biol Colomb.* 2019;24(2):202-212. Doi: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v24n2.75428>
- Ravindran G, Ravindran V. Changes in the nutritional composition of Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) leaves during maturity. *Food Chem.* 1988;27(4):299-309. Doi: [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(88\)90014-3](https://doi.org/10.1016/0308-8146(88)90014-3)
- Rogers DJ. Cassava leaf protein. *Econ Bot.* 1959;13(3). Doi: <https://doi.org/10.1007/BF02860586>
- Rogers DJ, Milner M. Amino acid profile of manioc leaf protein in relation to nutritive value. *Econ Bot.* 1963;17(3):211-6. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF02859438>
- Montero-Rojas MM, Correa AM, Siritunga D. Molecular differentiation and diversity of cassava (*Manihot esculenta*) taken from 162 locations across Puerto Rico and assessed with microsatellite markers. *AoB Plants.* 2017;1-13. Doi: <https://doi.org/10.1093/aobpla/plr010>

- Ruel-Bergeron JC, Stevens GA, Sugimoto JD, Roos FF, Ezzati M, Black RE, *et al.* Global update and trends of hidden hunger, 1995-2011: The Hidden Hunger Index. PLoS One. 2015;10(12):e0143497. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143497>
- Smith P, Gregory PJ. Climate change and sustainable food production. Proc Nutr Soc. 2013;72(1):21-28. Doi: <https://doi.org/10.1017/S0029665112002832>
- Sompong U, Somta P, Raboy V, Srinives P. Mapping of quantitative trait loci for phytic acid and phosphorus contents in seed and seedling of mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek). Breed Sci. 2012;62(1):87-92. Doi: <https://doi.org/10.1270/jsbbs.62.87>
- Suarez L, Mederos V. Apuntes sobre el cultivo de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) tendencias actuales. Cultiv Trop. 2011;32(3):27-35.
- Talsma EF, Borgonjen-van den Berg KJ, Melse-Boonstra A, Mayer EV, Verhoef H, Demir AY, *et al.* The potential contribution of yellow cassava to dietary nutrient adequacy of primary-school children in Eastern Kenya; the use of linear programming. Public Health Nutr. 2017;21(2):365-76. Doi: <https://doi.org/10.1017/S1368980017002506>
- Teles FF. Chronic poisoning by hydrogen cyanide in cassava and its prevention in Africa and Latin America. Food Nutr Bull. 2002;23(4):407-412. Doi: <https://doi.org/10.1177/156482650202300418>
- Tiago AV, Rossi AAB, Tiago PV, Carpejani AA, Silva BM, Hoogerheide ESS, *et al.* Genetic diversity in cassava landraces grown on farms in Alta Floresta-MT, Brazil. Genet Mol Res. 2016;15(3). Doi: <https://doi.org/10.4238/gmr.15038615>
- Tovar E, Bocanegra JL, Villafañe C, Fory L, Velasquez A, Gallego G, *et al.* Diversity and genetic structure of cassava landraces and their wild relatives (*Manihot* spp.) in Colombia revealed by simple sequence repeats. Plant Genet Resour. 2015;14(3):200-210. Doi: <https://doi.org/10.1017/S1479262115000246>
- UN. United Nations. Sustainable Development Goal 2: end hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture. United Nations Sustainable Development Knowledge Platform. 2017. Disponible en: <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg2>. Citado: 14 Ene 2020.