

Biofortificación con micronutrientes en cultivos agrícolas y su impacto en la nutrición y salud humana

Micronutrient biofortification in agricultural crops and their impact on human nutrition and health

JUAN PEDRO SIDA-ARREOLA¹, ESTEBAN SÁNCHEZ^{1,4}, GRACIELA DOLORES ÁVILA-QUEZADA²
CARLOS HORACIO ACOSTA-MUÑOZ³ Y PAUL BARUK ZAMUDIO-FLORES³

Resumen

Los seres humanos requieren de más de 22 elementos minerales para su desarrollo óptimo, los cuales pueden ser suplementados con una dieta balanceada. Las deficiencias de micronutrientes se han incrementado en las últimas décadas debido a la depreciación general de la calidad de la dieta de las poblaciones vulnerables, tanto en los países desarrollados y en desarrollo. Se estima que, de la población que padece malnutrición de micronutrientes, entre un 60 a 80% presenta deficiencia de hierro (Fe), más de 30% tiene deficiencia en zinc (Zn), 30% es deficiente en yodo (I) y alrededor del 15% es deficiente en selenio (Se). Las deficiencias de hierro (Fe) y zinc (Zn) son un problema crítico de salud pública en todo el mundo, con el impacto negativo en la salud, la esperanza de vida y la productividad. El proceso de biofortificación es un enfoque agrícola que puede mejorar la nutrición humana a nivel mundial. La biofortificación agronómica se considera a corto plazo y como una estrategia complementaria. Los análisis económicos sugieren que la biofortificación genética es la estrategia más eficaz para aumentar la dieta la ingesta de Fe y Zn de las poblaciones vulnerables. El enriquecimiento de micronutrientes esenciales de los granos de cereales mediante el mejoramiento genético es un área de alta prioridad de la investigación, y una estrategia eficaz entre otros enfoques, por ejemplo, el enriquecimiento, la suplementación y la diversificación de los alimentos. El presente manuscrito pretende dar a conocer la problemática de la deficiencia de micronutrientes a nivel mundial y cómo afecta a la nutrición y salud humana. Así mismo, se plantean algunas soluciones a este problema, como es el caso de la estrategia de biofortificación de micronutrientes en cultivos agrícolas.

Palabras clave: biofortificación, deficiencia de micronutrientes, nutrición, salud humana.

Abstract

Humans require more than 22 mineral elements for optimum growth, which can be supplemented with a balanced diet. Micronutrient deficiencies have increased over recent decades due to the general depreciation of the quality of the diet of vulnerable populations, both in developed and developing countries. It is estimated that the population suffering from micronutrient malnutrition, between 60-80% of the population are deficient in iron (Fe), over 30% are deficient in zinc (Zn), 30% are deficient in iodine (I) and about 15% are deficient in selenium. Deficiencies of iron (Fe) and zinc (Zn) are a critical public health problem worldwide, with negative impact on health, lifespan and productivity. Biofortification process is an agricultural approach that can improve human nutrition worldwide. Agronomic biofortification is considered a short-term and as a complementary strategy, but economic analyses suggest that genetic biofortification is the most effective strategy for increasing dietary intake of Fe and Zn of vulnerable populations. Enrichment of cereal grains by breeding is a high-priority area of research, and an effective strategy among other approaches, such as fortification, supplementation and food diversification. This manuscript seeks to highlight the problem of micronutrient deficiency in the world and how it affects the human health and nutrition. Also, some solutions to this problem arise, as in the case of the strategy of micronutrient biofortification in agricultural crops.

Keywords: biofortification, micronutrient deficiencies, nutrition, human health.

¹ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. Unidad Delicias, Av. Cuarta Sur 3820, Fracc. Vencedores del Desierto, 33089 Delicias, Chihuahua. México.

² Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Ciencias Agrotecnológicas. Escorza 900 Col. Centro. C. P. 31000. Chihuahua, Chih., México.

³ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. Unidad Cuauhtémoc. Av. Río Conchos S/N Parque Industrial, Apdo. Postal 781. C.P. 31570. Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

⁴ Dirección electrónica del autor de correspondencia: esteban@ciad.mx.

Introducción

Los micronutrientes son definidos como elementos químicos o sustancias requeridos en cantidades traza para el normal crecimiento y desarrollo de los organismos vivos. Hay varios métodos para mejorar el contenido de esos compuestos dentro de las partes comestibles de las plantas. El desarrollo tradicional es un enfoque probado, pero tiene varias limitantes, incluyendo los marcos de tiempo prolongados para desarrollar variedades y la relativamente baja "concentración de micronutrientes" entre variedades en una determinada región (Bonneuil, 2006; Johnson y Veilleux, 2010). Otra técnica es suministrar a las plantas con fertilizantes u otros químicos para aumentar su contenido de nutrientes durante el desarrollo (Dodd *et al.*, 2010).

La deficiencia de micronutrientes como Fe, Zn, selenio (Se) y el yodo (I) es un problema de salud pública, que afecta a más de un tercio de la población mundial. Deficiencias en calcio (Ca), magnesio (Mg) y cobre (Cu) se presentan en un tercio de la población, principalmente en los países en vías de desarrollo (White y Broadley, 2005). La malnutrición por deficiencia de micronutrientes tiene grandes consecuencias socio-económicas. Esto da como resultado el aumento de la mortalidad, baja talla y desarrollo infantil y problemas de aprendizaje en bebés y niños. Además, provoca pérdida de la capacidad para trabajar en los adultos, lo cual a su vez disminuye o dificulta el crecimiento económico e induce a la pobreza. Lo anterior ha sido ocasionado, en parte, por la agricultura moderna que impulsa principalmente un mayor rendimiento a menor costo, sin darle importancia a la calidad nutricional de los cultivos (Sands *et al.*, 2009).

La biofortificación con micronutrientes de los cultivos básicos se presenta como una herramienta útil para combatir esta problemática. Esta alternativa busca incrementar el contenido de nutrientes en los cultivos mediante técnicas de fertilización, fitomejoramiento tradicional o fitomejoramiento asistido con biotecnología (Welch y Graham, 2004). La biofortificación tiene muchas ventajas: una única inversión para desarrollar semillas fortificadas, los costos recurrentes son bajos y el germoplasma puede ser compartido. Además, el sistema de cultivos biofortificados es un medio viable para hacer llegar alimentos fortificados a las personas con acceso

limitado a ellos, especialmente la población con desnutrición de zonas rurales remotas (Nestel *et al.*, 2006). Sin embargo, requiere que la investigación agrícola establezca vínculos directos con los sectores de salud y nutrición humana (Bouis, 2003).

Por lo anterior, tres puntos principales que se requieren para implementar un programa de biofortificación con éxito son: 1) que los cultivos biofortificados deben ser de alto rendimiento y rentable para el agricultor; 2) los cultivos biofortificados deben mostrar eficacia para disminuir la problemática de malnutrición en los seres humanos; 3) el cultivo biofortificado debe ser aceptado por los agricultores y los consumidores en la región de destino.

Harvest Plus, es una organización no gubernamental que se enfoca en el desarrollo de cultivos biofortificados con selenio ha abordado todos estos temas (Hotz y McClafferty, 2007). Un punto importante a tomar en cuenta para la optimización de los programas de biofortificación es el procesamiento de los cultivos después de la cosecha. Cultivos como el trigo se consumen después de un proceso de molienda (White y Broadley, 2005), lo que pudiera modificar las concentraciones biodisponibles de los nutrientes en el cultivo. Además, las concentraciones de algunos nutrientes como el Se y el S se encuentran en mayor proporción en el embrión de la semilla, otros como el Fe, Cu y Zn se encuentran principalmente en el salvado (Lyons *et al.*, 2005).

Biofortificación con Fe y Zn

La Organización Mundial de la Salud estima que la prevalencia de la anemia alrededor del mundo es de 1600 millones, de los cuales, aproximadamente el 50% se estima que se debe a deficiencia de Fe (McLean *et al.*, 2009). Las principales causas de deficiencia de Fe son una inadecuada ingesta del elemento en la dieta y la baja biodisponibilidad de éste. En las poblaciones de bajos ingresos en el mundo, un suministro inadecuado de Fe biodisponible es por lo general debido a la falta de diversidad de la dieta. Los alimentos básicos que contienen altas cantidades de inhibidores de la absorción de Fe, como el ácido fítico o polifenoles, que forma la mayor parte de la dieta (Cercamondi *et al.*, 2013).

Más del 30% de la población mundial tiene anemia, que es en gran parte debida a la deficiencia de Fe (ID) (Gibson, 2006). Una de las principales causas de la ID es baja biodisponibilidad dietética Fe, que se observa típicamente en dietas monótonas planta- basada consumidas por las poblaciones del tercer mundo de nivel socioeconómico bajo (Gibson, 2006). Este tipo de dietas son ricas en ácido fítico y polifenoles, dos inhibidores conocidos de la absorción de Fe (Reddy *et al.*, 1996), pero pobre en potenciadores de la absorción de Fe, como la carne (Martínez-Torres y Layrisse, 1971) o ácido ascórbico (Siegenberg *et al.* 1991). La forma más grave de ID, anemia por deficiencia de Fe (AIF), es común en los niños y las mujeres jóvenes en el mundo en desarrollo, así como en los países desarrollados. IDA tiene efectos adversos para la salud en el resultado del embarazo, el crecimiento infantil, el rendimiento cognitivo, estado inmunológico, y la capacidad de trabajo.

Para las mujeres embarazadas, la anemia contribuye al 20% de todas las muertes maternas. Incluso ID de leve a moderada sin anemia puede disminuir la capacidad de trabajo y resistencia a la fatiga (Brownlie *et al.*, 2004) y afectar la cognición (Stoltzfus *et al.*, 2001). La biodisponibilidad de Fe no hemo, que constituye todo el Fe encontrado en los alimentos vegetales y más del 50% del Fe de origen animal, por lo general se encuentra en el intervalo de 2-20% (Monsen y Balintfy 1982). En contraste, el Fe hemo se absorbe en un 15-35%, y su absorción

es ligeramente influenciada por otros constituyentes de la dieta (Carpenter y Mahoney, 1992). La mayoría del Fe del cuerpo, 65-70%, se encuentra en las moléculas de hemoglobina y mioglobina utilizadas para el transporte de oxígeno y de almacenamiento, y funciona como un cofactor en varias enzimas (Aisen *et al.*, 2001). El almacenamiento de Fe, que constituye el residual de un tercio del Fe total del cuerpo, es secuestrada en las proteínas ferritina y hemosiderina en el hígado, el bazo y la médula ósea (Aisen *et al.*, 2001).

Programas de suplementación de Fe y fortificación de los alimentos han demostrado ser eficientes y han reducido la morbilidad y mortalidad en todo el mundo, pero no han sido universalmente exitosos en reducir de forma sostenible la prevalencia de deficiencias de micronutrientes en los países en desarrollo, debido a que las deficiencias nutricionales se presentan en más altos porcentajes (Mayer *et al.*, 2008). La biofortificación de cultivos de alimentos básicos para aumentar su contenido de micronutrientes, tiene un enfoque de salud pública para el control de las deficiencias de Fe (y Zn) en los países en desarrollo (Bouis y Welch, 2010). En general, las concentraciones de minerales en la mayoría de los suelos no son suficientes para apoyar los cultivos con altos contenidos de minerales (White y Broadley, 2005).

Aunque es difícil de definir bioquímicamente la deficiencia leve a moderada de Zn en los individuos, parece probable que la deficiencia de Zn es común en muchos países en desarrollo (Sandstead, 1999). Debido a las formas absorbibles de Fe y Zn se encuentran en muchos de los mismos alimentos, las altas tasas de deficiencia de Fe en el sudeste asiático y África subsahariana sugieren la ocurrencia generalizada probable de la deficiencia de Zn en las mismas poblaciones. En un meta-análisis realizado por Brown *et al.* (2002), se encontró que la administración de suplementos de Zn tiene un efecto positivo en el crecimiento lineal y el aumento de peso (pero no de peso para la talla) en niños prepúberes. La respuesta es especialmente marcada en los niños con retraso del crecimiento o con bajo peso, probablemente debido a que su ingesta habitual de Zn era inadecuada. Aproximadamente uno de cada

tres niños en edad preescolar en los países en desarrollo han retrasado su crecimiento (Onis, 2000), y una proporción de esta falta de crecimiento es probablemente debida a la deficiencia de Zn. La co-ocurrencia de las deficiencias de Fe y Zn aboga por un enfoque combinado de biofortificación con Fe y Zn en los alimentos. Aunque una alta relación Fe:Zn puede inhibir la absorción de Zn cuando se administra como un suplemento sin alimentos, no hay ninguna interacción significativa entre Fe y Zn cuando se administra con alimentos (Hotz y Brown, 2004). El zinc es necesario por más de 100 enzimas en el cuerpo; muchas funciones corporales se ven afectados por su deficiencia, incluyendo el crecimiento físico, competencia inmune, la función reproductiva, y el desarrollo neuronal (Hotz, 2001). La deficiencia de zinc puede afectar la función neuroconductual en niños (Grantham-McGregor y Ani, 2001), y puede aumentar el riesgo de resultados adversos del embarazo (King, 2000).

En muchos países, los programas de biofortificación y suplementación se han implementado para combatir esas deficiencias, por ejemplo, el enriquecimiento de Fe en la harina de trigo en Pakistán, suplementos de vitamina A en Nigeria, el uso de la sal yodada en Marruecos, etc. (Imhoff-Kunsch *et al.*, 2007). Por lo tanto, la biofortificación se considera una estrategia sostenible, rentable (Bouis y Welch, 2010) y viable a corto plazo para mejorar la composición mineral de los alimentos básicos (Bouis, 2007).

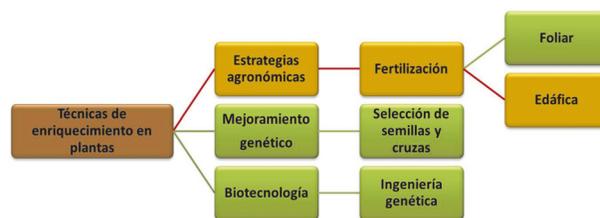
La aceptación social, los problemas de seguridad y largos procesos de aprobación reglamentaria pueden retrasar la aplicación de los cultivos biofortificados en ingeniería genética. Los programas de investigación utilizando el método de cría común actualmente se centran en aumentar el contenido de Fe de los cultivos básicos, como el trigo, el maíz, el arroz, el mijo perla, y frijoles, y dentro de estos cultivos, los frijoles parecen ser los más prometedores en relación a alcanzar los niveles de Fe que podría tener un impacto significativo en la salud pública (White y Broadley 2005, Hotz y McClafferty 2007, Blair, Monserrate *et al.* 2010, Bouis y Welch, 2010). En el Cuadro 1 se muestra la concentración de nutrientes en el frijol.

Cuadro 1. Concentración de nutrientes y contenido energético en frijol.

Nutrientes	Contenido por 100 g de semilla	
Calorías (kcal)		333
Proteínas (g)		23.36
Carbohidratos (g)		60.27
Fibra dietaria (g)		15.2
Vitaminas	Ácido fólico	0
	Tiamina (mg)	0.437
	Niacina (mg)	0.479
Minerales	Riboflavina (mg)	0.146
	Hierro (mg)	10.44
	Fósforo (mg)	301
	Calcio (mg)	240
	Zinc (mg)	3.67
	Magnesio (mg)	190
	Selenio (µg)	12.8
	Potasio (mg)	1795
	Manganeso (mg)	1.796

Actualmente existen tres principales estrategias de biofortificación (Figura 1), las cuales son empleadas ampliamente, pero considerando que la biofortificación se realiza en un menor tiempo y a un costo más bajo (White y Broadley, 2005).

Figura 1. Técnicas de biofortificación en plantas.

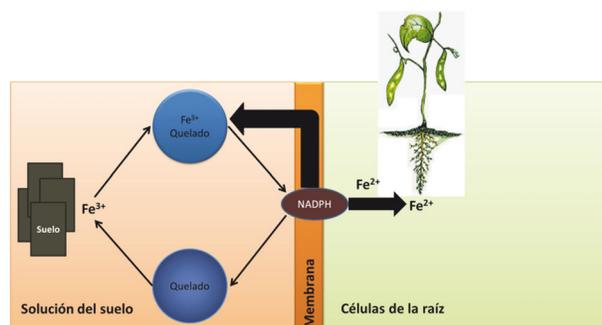


Estrategias de biofortificación con Fe y Zn

La aplicación de fertilizantes con Fe ofrece un medio agronómico para corregir la deficiencia de Fe en plantas. Los fertilizantes de Fe pertenecen a tres grupos principales: compuestos inorgánicos Fe, quelatos sintéticos de Fe, y complejos naturales de Fe. De ellos, la aplicación de quelatos sintéticos de Fe anualmente al suelo es el más eficiente (Abadía *et al.*, 2011).

Los quelatos sintéticos Fe (III) son generalmente derivados de la familia de los ácidos etilendiamino-carboxílico. Son caros y por lo tanto su uso está restringido a la horticultura sin suelo, así como a los cultivos de alto valor agregado cultivados en el campo. Además, estos xenobióticos afectan la disponibilidad de metal y la movilidad en el suelo debido a su extendida persistencia en el ambiente, cuestionando su sostenibilidad en la agricultura moderna (Álvarez-Fernández *et al.*, 2007). El frijol común es actualmente una de las leguminosas más importantes a nivel mundial y es una fuente importante de nutrientes para más de 300 millones de personas en África y Latinoamérica. Representa el 65% del total de proteína consumida y una mayor fuente de micronutrientes, como son Fe, Zn, tiamina y ácido fólico (Broughton *et al.*, 2003). En la Figura 2 se esquematiza el mecanismo general para la absorción de Fe en una planta de frijol.

Figura 2. Mecanismo de absorción de hierro en forma quelada en dicotiledóneas (Estrategia 1) Adaptado de Brady y Well (2002).



Aunque la concentración media de Fe en el frijol es alta, 55 $\mu\text{g/g}$ (Beebe *et al.*, 2000) comparada con otros cultivos como el trigo (Ortiz-Monasterio *et al.*, 2007), arroz (Gregorio, 2002) y maíz (Bänziger y Long, 2000), mucha gente sufre de deficiencia del elemento debido a un nivel insuficiente de Fe biodisponible en una monótona dieta basada en cereal y frijol (Bouis, 2007). Una estrategia potencial para combatir la deficiencia de Fe en las poblaciones consumidoras de frijol es la biofortificación con Fe. Por consiguiente, el enfoque multidisciplinario de bioenriquecimiento podría utilizarse para contrarrestar la deficiencia de Fe, ya sea aumentando la concentración y/o biodisponibilidad del Fe en los

granos. Esto es posible a través de fitomejoramiento tradicional, o mediante el empleo de técnicas de ingeniería genética (White y Broadley, 2005).

En algunos países como Ruanda y República Democrática del Congo, los fitomejoradores ya han desarrollado nuevas variedades de frijol con concentraciones de Fe por encima de 94 $\mu\text{g/g}$. Esto se logró mediante un programa de investigación internacional de apoyo a la investigación y desarrollo de cultivos biofortificados de HarvestPlus (Blair *et al.*, 2013). Los resultados mostraron una buena retención de micronutrientes después del procesamiento, e igual o mayor rendimiento agronómico, lo cual indica que el frijol común puede ser un cultivo prometedor para la biofortificación de Fe (Bouis y Welch, 2010).

El objetivo inicial de este estudio fue biofortificar el frijol con estrategias de fitomejoramiento selectivos para producir variedades de frijol con al menos un 80% más de Fe (Bouis y Welch, 2010). El objetivo en contenido de Fe en frijol fue de 94 mg/g, lo que representó un incremento de 44 mg/g en comparación con la concentración media en el germoplasma. Suponiendo una absorción media de Fe del 5%, el aumento de destino se estimó para cubrir un tercio de las necesidades diarias de Fe de los grupos de población más vulnerables que consumieron 30-40% de sus calorías diarias de frijol (Bouis y Welch, 2010). El nivel objetivo se alcanzó rápidamente y los primeros estudios en humanos que prueban el rendimiento de los granos biofortificados ya se han realizado (Petry *et al.*, 2012). Se han usado varios enfoques para desarrollar semillas altas en Fe, desarrollaron una línea de frijol alto contenido de Fe por retrocruzamiento avanzado incluyendo retrocruzamiento, selección recurrente y varias permutaciones de gametos y selección pedigree (Blair *et al.*, 2013).

La nueva línea de frijol se derivó por retrocruzamiento frijol silvestre en un frijol común cultivado del acervo genético Andina. El frijol silvestre tenía una concentración de Fe que va de 92 mg/g a 99 mg/g (Blair *et al.*, 2013). Los mismos investigadores (Blair *et al.*, 2010) desarrollaron dos líneas de frijol arbustivo andino con mejores concentraciones de Fe y Zn. Las líneas se derivaron

por el cruce de un frijol moteado rojo, comúnmente cultivado en África oriental y meridional, y en la región andina, con un frijol marrón cabeza de serie alta de minerales. El comportamiento agronómico de las nuevas variedades se puso a prueba en la región Andina y Centroamérica. Las concentraciones de Fe y Zn dependían fuertemente en el sitio de plantación pero fueron en promedio de 18-23 mg/kg más alto que en el grano parental moteado rojo. Aunque afectado por factores ambientales, la concentración de Fe más alto en los granos biofortificados en comparación con los granos de los padres sobre diferentes entornos indica que el desarrollo de plantas con alto contenido de Fe fue exitoso, y el principal desafío será mantener la concentración de Fe de alta en un número suficiente de genotipos para cubrir la variación climática, las diferencias de altitud y los tipos de suelo (Blair *et al.*, 2009).

Una alternativa para el fitomejoramiento es la biofortificación agronómica con la aplicación de fertilizantes minerales a los suelos o las hojas. La biofortificación agronómica a través de la fertilización del suelo ha aumentado los niveles de Zn (Shehu y Jamala, 2010) y de selenio (Hawkesford y Zhao, 2007) en los cereales. En cuanto a las aplicaciones de Fe, los mejores resultados se alcanzan con la aplicación de quelatos tales como FeEDTA porque presenta más Fe biodisponible en solución (Khoshgoftarmanesh *et al.*, 2010). Pero estos fertilizantes son más costosos (Khoshgoftarmanesh *et al.*, 2010) y llevan el riesgo de lixiviación, ya que aumentan la movilidad de minerales en todo el suelo (Alvarez *et al.*, 2001).

Conclusiones

Nuestro grupo de investigación, desde año 2009 ha venido trabajando en la biofortificación con selenio, hierro y zinc en frijol, obteniendo resultados muy importantes en la mejora de la calidad nutricional de estos micronutrientes y favoreciendo la capacidad antioxidante del frijol. Finalmente, cabe destacar que es factible implementar un programa de biofortificación con micronutrientes para mejorar la calidad nutricional y capacidad antioxidante en el frijol.

Literatura citada

- Abadía, J., Vázquez, S., Rellán-Álvarez, R., El-Jendoubi, H., Abadía, A., Álvarez-Fernández, A., López-Millán, A.F., 2011. Towards a knowledge-based correction of iron chlorosis. *Plant Physiology and Biochemistry* 49:471-482.
- Álvarez-Fernández, A., Orera, I., Abadía, J., Abadía, A., 2007. Determination of synthetic ferric chelates used as fertilizers by liquid chromatography-electrospray/mass spectrometry in agricultural matrices. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry* 18:37-47.
- Alvarez, J., Novillo, J., Obrador, A., Lopez-Valdivia, L., 2001. Mobility and leachability of zinc in two soils treated with six organic zinc complexes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49:3833-3840.
- Aisen, P., Enns, C., Wessling-Resnick, M., 2001. Chemistry and biology of eukaryotic iron metabolism. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology* 33:940-959.
- Bänziger, M., Long, J., 2000. The potential for increasing the iron and zinc density of maize through plant-breeding. *Food & Nutrition Bulletin* 21:397-400.
- Beebe, S., Gonzalez, A.V., Rengifo, J., 2000. Research on trace minerals in the common bean. *Food & Nutrition Bulletin* 21:387-391.
- Blair, M.W., Astudillo, C., Grusak, M.A., Graham, R., Beebe, S.E., 2009. Inheritance of seed iron and zinc concentrations in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Molecular Breeding* 23:197-207.
- Blair, M.W., Izquierdo, P., Astudillo, C., Grusak, M.A., 2013. A legume biofortification quandary: variability and genetic control of seed coat micronutrient accumulation in common beans. *Frontiers in Plant Science* 4.
- Blair, M.W., Monserrate, F., Beebe, S.E., Restrepo, J., Flores, J.O., 2010. Registration of high mineral common bean germplasm lines NUA35 and NUA56 from the red-mottled seed class. *Journal of Plant Registrations* 4:55-59.
- Bonneuil, C. 2006. Mendelism, Plant Breeding and Experimental Cultures: Agriculture and the Development of Genetics in France. *Journal of the History of Biology* 39:281-308.
- Bouis, H.E., 2003. Micronutrient fortification of plants through plant breeding: can it improve nutrition in man at low cost?. *Proceedings of the Nutrition Society* 62:403-411.
- Bouis, H.E., 2007. The potential of genetically modified food crops to improve human nutrition in developing countries. *Journal of Development Studies* 43:79-96.
- Bouis, H.E., Welch, R.M., 2010. Biofortification—a sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. *Crop Science* 50:S-20-S-32.
- Broughton, W.J., Hernandez, G., Blair, M., Beebe, S., Gepts, P., Vanderleyden, J., 2003. Beans (*Phaseolus* spp.)—model food legumes. *Plant and Soil* 252:55-128.
- Brown, K.H., Peerson, J.M., Rivera, J., Allen, L.H., 2002. Effect of supplemental zinc on the growth and serum zinc concentrations of prepubertal children: a meta-analysis of randomized controlled trials. *The American Journal of Clinical Nutrition* 75:1062-1071.
- Brownlie, T., Utermohlen, V., Hinton, P.S., Haas, J.D., 2004. Tissue iron deficiency without anemia impairs adaptation in endurance capacity after aerobic training in previously untrained women. *The American Journal of Clinical Nutrition* 79:437-443.
- Bruner, A.B., Joffe, A., Duggan, A.K., Casella, J.F., Brandt, J., 1996. Randomised study of cognitive effects of iron supplementation in non-anaemic iron-deficient adolescent girls. *The Lancet* 348:992-996.

- Carpenter, C.E., Mahoney, A.W., 1992. Contributions of heme and nonheme iron to human nutrition. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition* 31:333-367.
- Cercamondi, C.I., Egli, I.M., Mitchikpe, E., Tossou, F., Zeder, C., Hounhouigan, J.D., Hurrell, R.F., 2013. Total iron absorption by young women from iron-biofortified pearl millet composite meals is double that from regular millet meals but less than that from post-harvest iron-fortified millet meals. *The Journal of Nutrition* 143:1376-1382.
- Dodd, A.N., Kudla, J., Sanders, D. 2010. The language of calcium signaling. *Annual Review of Plant Biology* 61:593-620.
- Gibson, R.S., 2006. Zinc: the missing link in combating micronutrient malnutrition in developing countries. *Proceedings of the Nutrition Society* 65:51-60.
- Grantham-McGregor, S., Ani, C., 2001. A review of studies on the effect of iron deficiency on cognitive development in children. *The Journal of Nutrition* 131:649S-668S.
- Gregorio, G.B., 2002. Progress in breeding for trace minerals in staple crops. *The Journal of Nutrition* 132:500S-502S.
- Hawkesford, M.J., Zhao, F.-J., 2007. Strategies for increasing the selenium content of wheat. *Journal of Cereal Science* 46:282-292.
- Hotz, C., 2001. Identifying populations at risk of zinc deficiency: the use of supplementation trials. *Nutrition Reviews* 59:80-84.
- Hotz, C., Brown, K.H., 2004. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. International Zinc Nutrition Consultative Group (IZiNCG). Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. Hotz C and Brown KH, eds. Food and Nutrition Bulletin 25:S91-S204.
- Hotz, C., McClafferty, B., 2007. From harvest to health: Challenges for developing biofortified staple foods and determining their impact on micronutrient status. *Food & Nutrition Bulletin* 28:271S-279S.
- Imhoff-Kunsch, B., Flores, R., Dary, O., Martorell, R., 2007. Wheat flour fortification is unlikely to benefit the neediest in Guatemala. *The Journal of Nutrition* 137:1017-1022.
- Johnson, A.A.T., Veilleux, R.E. 2010. Somatic Hybridization and Applications in Plant Breeding. *Plant Breeding Reviews*. John Wiley & Sons, Inc. pp. 167-225.
- Khoshgofarmanesh, A.H., Schulin, R., Chaney, R.L., Daneshbakhsh, B., Afyuni, M., 2010. Micronutrient-efficient genotypes for crop yield and nutritional quality in sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30:83-107.
- King, J.C., 2000. Determinants of maternal zinc status during pregnancy. *The American Journal of Clinical Nutrition* 71:1334s-1343s.
- Lyons, G.H., Genc, Y., Stangoulis, J.C., Palmer, L.T., Graham, R.D., 2005. Selenium distribution in wheat grain, and the effect of postharvest processing on wheat selenium content. *Biological Trace Element Research* 103:155-168.
- Mayer, J.E., Pfeiffer, W.H., Beyer, P., 2008. Biofortified crops to alleviate micronutrient malnutrition. *Current Opinion in Plant Biology* 11:166-170.
- McLean, E., Cogswell, M., Egli, I., Wojdyla, D., De Benoist, B., 2009. Worldwide prevalence of anaemia, WHO vitamin and mineral nutrition information system, 1993-2005. *Public Health Nutrition* 12:444-454.
- Nestel, P., Bouis, H.E., Meenakshi, J., Pfeiffer, W., 2006. Biofortification of staple food crops. *The Journal of Nutrition* 136:1064-1067.
- Onis, M.d., 2000. Measuring nutritional status in relation to mortality. *Bulletin of the World Health Organization* 78:1271-1274.
- Ortiz-Monasterio, J., Palacios-Rojas, N., Meng, E., Pixley, K., Trethowan, R., Pena, R., 2007. Enhancing the mineral and vitamin content of wheat and maize through plant breeding. *Journal of Cereal Science* 46: 293-307.
- Petry, N., Egli, I., Gahutu, J.B., Tugirimana, P.L., Boy, E., Hurrell, R., 2012. Stable iron isotope studies in Rwandese women indicate that the common bean has limited potential as a vehicle for iron biofortification. *The Journal of Nutrition* 142:492-497.
- Reddy, M.B., Hurrell, R.F., Juillerat, M.A., Cook, J.D., 1996. The influence of different protein sources on phytate inhibition of nonheme-iron absorption in humans. *The American Journal of Clinical Nutrition* 63:203-207.
- Sabeh, F., Wright, T., Norton, S., 1992. Purification and characterization of a glutathione peroxidase from the Aloe vera plant. *Enzyme & Protein* 47:92-98.
- Sands, D.C., Morris, C.E., Dratz, E.A., Pilgeram, A.L., 2009. Elevating optimal human nutrition to a central goal of plant breeding and production of plant-based foods. *Plant Science* 177:377-389.
- Sandstead, H.H., 1999. Improving study design. *The American journal of clinical nutrition* 70:110-110.
- Shehu, H., Jamala, G., 2010. Available Zn distribution, response and uptake of rice (*Oriza sativa*) to applied Zn along a topose quence of lake gerio fadama soils at Yola, North-eastern Nigeria. *Journal of American Science* 6:1013-1016.
- Siegenberg, D., Baynes, R. D., Bothwell, T. H., Macfarlane, B. J., Lamparelli, R. D., Car, N. G., Mayet, F. (1991). Ascorbic acid prevents the dose-dependent inhibitory effects of polyphenols and phytates on nonheme-iron absorption. *The American Journal of Clinical Nutrition* 53(2):537-541.
- Stoltzfus, R.J., Kvalsvig, J.D., Chwaya, H.M., Montresor, A., Albonico, M., Tielsch, J.M., Savioli, L., Pollitt, E., 2001. Effects of iron supplementation and anthelmintic treatment on motor and language development of preschool children in Zanzibar: double blind, placebo controlled study. *BMJ* 323:1389-1398.
- Welch, R.M., Graham, R.D., 2004. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. *Journal of Experimental Botany* 55:353-364.
- White, P.J., Broadley, M.R., 2005. Biofortifying crops with essential mineral elements. *Trends in Plant Science* 10:586-593. 

Este artículo es citado así:

Sida-Arreola, J.P., E. Sánchez, G.D. Ávila-Quezada, C.H. Acosta-Muñiz y P. B. Zamudio-Flores. 2015. Biofortificación con micronutrientes en cultivos agrícolas y su impacto en la nutrición y salud humana. *TECNOCENCIA Chihuahua* 9(2): 67-74.

Resumen curricular del autor y coautores

JUAN PEDRO SIDA ARREOLA. Realizó sus estudios de Licenciatura en el Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana en Durango, Dgo, obteniendo el título de Licenciado en Biología con especialidad en Biotecnología, en el año 2004. Sus estudios de Maestría los realizó en la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua, donde obtuvo el grado de Maestro en Ciencias de la Productividad Frutícola en el año 2009. Actualmente está por concluir sus estudios de Doctorado en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Dentro de su formación, ha recibido cursos de actualización en Biotecnología y ha participado en varios congresos nacionales. Tiene colaboración en capítulos de libros, así como en la publicación de artículos en revistas internacionales.

ESTEBAN SÁNCHEZ CHÁVEZ. Realizó sus estudios de licenciatura en la Universidad Autónoma Chapingo (Chapingo), obteniendo en 1992 el título de Ingeniero Agrónomo especialista en Fitotecnia. Terminó su programa de maestría en la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), otorgándosele en 1996 el grado de Maestro en Ciencias, con especialidad en Productividad Frutícola. Recibió el grado de Doctor en Ciencias especialidad Fisiología Vegetal por la Universidad de Granada (España). Actualmente es miembro de comités editoriales de varias revistas y ha sido distinguido por el Sistema Nacional de Investigadores del CONACYT (S.N.I.) como investigador Nacional Nivel III; su productividad científica ha sido muy prolífica, ya que incluye la publicación de artículos científicos, capítulos de libros, participación como ponente en congresos científicos nacionales e internacionales y otras. Las principales áreas de su investigación son: fisiología del estrés en plantas, nutrición vegetal y fisiología postcosecha.

GRACIELA DOLORES ÁVILA QUEZADA. En 1992 recibió el título de Ingeniero Agrónomo Fitotecnista en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH). En el año 1997 recibió el grado de Maestría en Ciencias de la Productividad Frutícola por la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas (UACH). En el año 2002 recibió el grado de Doctora en Ciencias por el Colegio de Postgraduados en Texcoco, Estado de México. Fue investigadora del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) A.C. Coordinación Delicias de 2002 al 2011. Actualmente es profesora-investigadora de la Facultad de Zootecnia y Ecología (UACH). Fue presidenta de la Sociedad Mexicana de Fitopatología, vicepresidenta del Consejo Nacional Consultivo Fitosanitario (CONACOFI) y en el 2011 fue acreedora del Premio Chihuahuense destacada en Ciencias. Forma parte del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel I.

PAUL BARUK ZAMUDIO FLORES. Realizó sus estudios de Licenciatura en el Instituto Tecnológico de Acapulco (ITA) de Acapulco, Guerrero, obteniendo el título de Ingeniero Bioquímico en el año 2000. Terminó los estudios de Maestría en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos en el Centro de Desarrollo de Productos Bióticos (CEPROBI), perteneciente al Instituto Politécnico Nacional, en Yauhtepec, Morelos, en el 2005. En el año 2008 recibió el grado de Doctor en Ciencias en Desarrollo de Productos Bióticos por el CEPROBI-IPN en Yauhtepec, Morelos. Durante su trayectoria académica ha obtenido múltiples reconocimientos por alto desempeño académico. Ha sido distinguido por el Sistema Nacional de Investigadores (SNI) del CONACYT como Investigador Nacional Nivel I desde el año 2010 a la fecha. Ha tenido una importante productividad científica, que incluye la publicación de 30 artículos científicos en revistas internacionales, así como la publicación de diversos artículos de divulgación y capítulos de libros de editoriales internacionales y nacionales reconocidas. Es evaluador RCEA de proyectos de investigación del CONACYT (Fondos institucionales, mixtos y sectoriales), y es árbitro de 6 revistas científicas indizadas de circulación nacional e internacional. Actualmente es Investigador del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD) Unidad Cuauhtémoc, donde es responsable del laboratorio y líder del Grupo de Investigación (GI) en Carbohidratos, Empaque y Alimentos Funcionales (CEAF). Su área de investigación se enfoca en carbohidratos, empaques y alimentos funcionales.

CARLOS HORACIO ACOSTA MUÑÍZ. Realizó sus estudios de Licenciatura en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua, obteniendo el título de Químico Bacteriólogo Parasitólogo en el año 1997. Terminó los estudios de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua, en el 2001. En el año 2006 recibió el grado de Doctor en Ciencias con especialidad en Microbiología en el Centre de Génétique Moléculaire du Université de Paris-XI, de París, Francia. Realizó una estancia posdoctoral en el Departamento de Genética del CINVESTAV de Irapuato, Guanajuato. Cuenta con varias publicaciones en revistas nacionales e internacionales, así como capítulos de libros. Ha dirigido tesis de Licenciatura, Maestría y ha sido miembro de comités de tesis de Doctorado. Actualmente es Investigador del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD) Unidad Cuauhtémoc, donde es responsable del laboratorio de Microbiología. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) Nivel I.