

Las multifacéticas remolachas: una reevaluación de sus posibilidades productivas a la luz de los conocimientos actuales

Publicado online 06 de abril de 2022

Rattin, J.¹; Echarte, M.^{1,2,3}; Barrera, L.¹ (*ex aequo*);
Tognetti, J.^{1,4}; Di Benedetto, A.^{1,5}

RESUMEN

La especie *Beta vulgaris* subsp. *vulgaris* comprende a las comúnmente llamadas remolachas, de las que existen tres tipos: hortícola, azucarera y forrajera. Aunque el principal órgano de interés es en todos los casos la raíz engrosada, las tres remolachas constituyen cultivos muy diferentes entre sí, tanto en cuanto a sus características agronómicas como a los productos que se obtienen de ellos, por lo que generalmente se han estudiado por separado. Sin embargo, la capacidad de esta especie de acumular en sus raíces altas concentraciones de compuestos bioactivos valiosos, junto con su probada adaptación a vastas áreas de clima templado han incentivado recientemente a escala global el interés por su cultivo, en concordancia con la creciente preocupación por la salud humana, la calidad de la alimentación y el cuidado del medioambiente. Este renovado interés plantea la necesidad de revisar el estado actual del conocimiento sobre la ecofisiología de los tres tipos de remolacha, de modo de contar con herramientas que permitan optimizar la productividad y la calidad de los productos obtenidos. En la presente revisión se realiza un análisis integrador de la información actualmente disponible sobre los distintos tipos de remolacha. Para ello, se reseñan las nuevas posibilidades de utilización, se analiza comparativamente la ecofisiología de los distintos tipos a lo largo del ciclo de cultivo, y se evalúan los aspectos críticos de la producción y calidad para cada uso. Muchos de los nuevos usos propuestos involucran a la remolacha hortícola, de la cual la información ecofisiológica disponible es relativamente escasa. Finalmente, se analiza en qué medida los conocimientos existentes acerca de un tipo de remolacha son extrapolables a los otros, y se discuten los estudios que podrán ser necesarios para en última instancia facilitar la difusión y adopción de los cultivos de remolacha con diferentes propósitos.

Palabras clave: *Beta vulgaris*, bioenergía, compuestos nutraceuticos, ecofisiología, forraje, rendimiento.

ABSTRACT

The species Beta vulgaris subsp. vulgaris includes the so-called beets, of which there are three types, red (vegetable) beet, sugar beet and forage beet. Although in every case the main organ of agronomic interest is the storage root, the three beet types constitute very different crops, both in terms of crop characteristics and products obtained. This may be the reason why they have generally been studied separately. The ability of this species to accumulate in its roots bioactive compounds at high concentration, together with its proven adaptation to vast areas of temperate climate, have prompted global interest in its cultivation. This is also supported by a growing concern for human health, food quality and care for the environment. This renewed interest raises the need to review the current state of knowledge about the ecophysiology of the three beet types, which in turn may provide tools that will allow optimizing

¹Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Facultad de Ciencias Agrarias, Ruta 226, km 73,5 (B7620ZAA), Balcarce, provincia de Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: rattinejo@gmail.com

²Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Balcarce, Ruta 226, km 73,5 (B7620ZAA), Balcarce provincia de Buenos Aires, Argentina.

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Godoy Cruz 2290 (C1425FQB), Buenos Aires, Argentina.

⁴Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, La Plata, provincia Buenos Aires, Argentina.

⁵Universidad de Buenos Aires (UBA), Facultad de Agronomía, Av. San Martín 4453 (C1417DSE), CABA, Argentina.

crop productivity and quality. In the present review, an integrative analysis of the information currently available on the different types of beet is carried out, and new possibilities of beet utilization are outlined. The ecophysiology of the three beet types is comparatively analyzed throughout the growth cycle, and critical aspects of production and quality are analyzed for the different crop purposes. Many of the proposed new uses involve red beets, for which eco-physiological information available is relatively scarce. Finally, it is discussed up to what extent the existing knowledge about one type can be extrapolated to the others, and which studies may be needed to maximize crop achievements, and ultimately, facilitate adoption of beet crops for different purposes.

Keywords: *Beta vulgaris*, bioenergy, nutraceutical compounds, ecophysiology, forage, yield.

INTRODUCCIÓN

Las remolachas son plantas herbáceas bienales actualmente clasificadas dentro de la familia Amaranthaceae, subfamilia Betoideae y designadas como *Beta vulgaris* subsp. *vulgaris* (Lange *et al.*, 1999), que vienen siendo cultivadas desde la antigua Grecia (Winner, 1993). Derivan del ancestro silvestre *Beta vulgaris* subsp. *maritima*, una planta halófila de origen próximo al mar Mediterráneo (Biancardi *et al.*, 2012). Durante el primer año (fase vegetativa) desarrollan una roseta de hojas y almacenan las reservas de fotoasimilados, fundamentalmente sacarosa, en la raíz engrosada, principal órgano de interés agronómico. Durante el segundo año las plantas son inducidas a florecer a través de un proceso de vernalización (Brar *et al.*, 2015). Este proceso deteriora la calidad agrícola de las raíces, por lo que solo tiene interés agronómico cuando el cultivo se realiza para la producción de semillas.

La clasificación de las remolachas ha sufrido frecuentes modificaciones. Existen tres tipos de remolacha, tradicionalmente considerados como variedades, y actualmente como grupos de cultivares (Nottingham, 2004): el grupo *conditiva* (la remolacha hortícola, en algunos países llamada betarraga o betabel); el grupo *altissima* (la remolacha azucarera) y el grupo *crassa* (la remolacha forrajera) (figura 1). A pesar de que los diferentes grupos de cultivares pertenecen a la misma subespecie botánica, y aunque el órgano de interés es el mismo, las remolachas conforman tres cultivos muy diferentes en cuanto a sus características agronómicas y a los productos que se obtienen de ellos.

La elevada adaptabilidad de las remolachas a condiciones ambientales subóptimas, en un contexto de cambio climático, sumada a las posibilidades de su utilización para diversos propósitos, las constituyen en cultivos potencialmente aptos para vastas regiones del planeta. El renovado interés que ha despertado a nivel global en las remolachas plantea la necesidad de revisar su ecofisiología, de modo de disponer de herra-

mientas que permitan optimizar la productividad y la calidad del producto obtenido para los distintos fines. Los distintos tipos de remolacha han sido tradicionalmente estudiados por separado, y los conocimientos disponibles son aún fragmentarios y desbalanceados. La remolacha azucarera ha recibido la mayor atención, pero solo una parte de la información acerca de ella es extrapolable a los otros tipos de remolacha. Por ejemplo, existen novedosas aplicaciones productivas de la remolacha hortícola para las cuales la información ecofisiológica disponible es muy escasa. Identificar los huecos (*gaps*) en el conocimiento, los aspectos comunes y extrapolables entre las distintas remolachas, y los aspectos diferenciales entre ellas permitiría definir líneas de investigación que aborden estos vacíos en el conocimiento.

En la presente revisión se analiza de un modo integrado la información actualmente disponible sobre los distintos tipos de remolacha. Se reseñan las nuevas posibilidades de utilización, se analiza su ecofisiología a lo largo del ciclo de cultivo, y se evalúan los aspectos críticos de la producción y calidad para cada uso, incluyendo los tradicionales y los de reciente desarrollo. Finalmente, se discuten los estudios que podrán ser necesarios para maximizar los logros, y en última instancia, facilitar la difusión y adopción de los cultivos para diferentes propósitos.

UN NUEVO ESCENARIO PARA LAS REMOLACHAS

Los usos de los tres tipos de remolacha han sido históricamente bien definidos. La remolacha hortícola es una hortaliza consumida masivamente, cruda o cocida, a nivel mundial, de particular importancia en toda Europa, China y Norteamérica (Tridge, 2020). La remolacha azucarera se ha destinado casi exclusivamente a la extracción de azúcar y es especialmente importante en Rusia, Francia, Estados Unidos y Alemania (Knoema, 2020), representando aproximadamente el 30% de la producción mundial de azúcar (Asgharipour *et al.*, 2012).



Figura 1. Remolacha hortícola (A-B), remolacha azucarera (C-D) y remolacha forrajera (E-F).

La remolacha forrajera es de especial importancia en Nueva Zelanda (Dairynz, 2020) y en el norte de Europa, utilizándose para pastoreo directo o como suplemento, en cuyo caso se cosechan las raíces que se ofrecen frescas o ensiladas. Sin embargo, las últimas décadas han presentado un escenario renovado para las remolachas. La creciente preocupación por la salud humana, la calidad de la alimentación y el cuidado del medioambiente han incentivado a escala global el interés por su cultivo.

En concordancia con este nuevo escenario, los estudios acerca de posibles usos no tradicionales, especialmente de las remolachas hortícola y azucarera, se han multiplicado. Se reseñan a continuación los principales:

- **Preparación de alimentos funcionales:** estos alimentos son aquellos que tienen un efecto positivo sobre la salud humana más allá de su contribución a la nutrición. Debido a que las remolachas acumulan diversos compuestos bioactivos, muchos de ellos de alto interés medicinal (Baião *et al.*, 2020; Hadipour *et al.*, 2020; Kumar y Su-Ling, 2018; Mirmiran *et al.*, 2020), varios productos de la industria alimentaria elaborados a partir de la remolacha hortícola, como sopas, encurtidos, jugos y sándwiches, pueden ser considerados como alimentos funcionales.
- **Obtención de compuestos nutraceuticos:** se definen así aquellos que poseen un rol preventivo de enfermedades y pueden ser consumidos en concentración relativamente alta (Valenzuela *et al.*, 2014). Entre estos se cuenta la betaina (trimetilglicina), obtenida a partir de melazas del procesamiento de la remolacha azucarera, y empleada como aditivo nutricional, contribuyendo al control de la presión arterial y prevención de enfermedades cardíacas (Craig, 2004). Asimismo, las betalainas (pigmentos rojos y amarillos obtenidos de la remolacha hortícola) son una importante herramienta de la industria alimentaria y cosmética, reemplazando a los colorantes sintéticos con el beneficio de sus propiedades antioxidantes, hepatoprotectoras y anticancerígenas (Azeredo, 2009; Khan, 2016). El material fibroso remanente luego de la extracción de los pigmentos es asimismo efectivo en la reducción de lesiones hepáticas en animales que sugieren la presencia en la remolacha hortícola de otros compuestos anticancerígenos, que aún necesitan ser identificados (Lechner y Stoner, 2019).
- **Fabricación de bioenvases:** la industria alimentaria demanda el desarrollo de materiales de envasado bioactivos, con capacidad de disminuir la tasa de deterioro de los alimentos por efectos de la oxidación (Schieber *et al.*, 2001, Siracusa *et al.*, 2008, Wu *et al.*, 2013). Para ello se han desarrollado películas de hidroxipropil metilcelulosa con agregado de polvo de remolacha hortícola, aprovechando la alta capacidad antioxidante de las betalainas, y cuyo color rojo sirve además para controlar la fotooxidación de ácidos grasos poliinsaturados (Akhtar *et al.*, 2012).
- **Obtención de bioplásticos:** se han desarrollado como coproductos de la industria de la remolacha azucarera biopolímeros de propiedades semejantes a los derivados del petróleo, pero biodegradables (Page, 1989, 1992; Wang *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2005).
- **Producción de bioenergía:** como consecuencia del procesamiento de la raíz de remolacha azucarera se obtiene un jugo concentrado que puede ser utilizado tanto para la producción de bioetanol mediante fermentación, destilación y deshidratación (Duraisamy *et al.*, 2017). La utilización de los coproductos de la producción de azúcar o etanol tam-

bién ha sido sugerida como fuente de energía a través de su transformación en biogás o biohidrógeno (Tomaszewska *et al.*, 2018). También es posible la utilización de remolacha forrajera para estos fines, aunque suele ser menos ventajosa debido a la menor concentración de sacarosa (Cruz y Dierig, 2014).

Cabe mencionarse que, si bien el principal órgano de interés agronómico de las remolachas es la raíz engrosada, también las hojas poseen un importante potencial productivo para diferentes propósitos. Este tema ha sido revisado recientemente por Nutter *et al.* (2020) y no será abordado en la presente revisión.

Tanto la cantidad del producto obtenido como la calidad al momento de su cosecha se definen durante el ciclo de vida de la planta a través de los procesos ecofisiológicos que tienen lugar en el cultivo. El conocimiento adecuado de estos procesos es esencial para la implementación exitosa de los cultivos de remolacha con diferentes propósitos.

ECOFISIOLOGÍA DE LA PRODUCCIÓN

Germinación e implantación de los cultivos

La germinación sincronizada de las semillas resulta crítica para la obtención de stands de plantas homogéneas que permitan alcanzar altos rendimientos comerciales. Esto es válido especialmente para la remolacha hortícola y la azucarera. Las particularidades botánicas de las semillas de remolacha han representado tradicionalmente una dificultad para sortear para lograr un stand de plantas homogéneo. Las remolachas producen naturalmente racimos de frutos secos que pueden constar de una sola o varias (2 a 4) semillas. Las llamadas vulgarmente semillas corresponden en realidad a los frutos, que pueden ser monogermen, es decir, que contienen una única semilla (aquenios que derivan de las flores solitarias ubicadas en la parte apical de la espiga), o multigermen (utrículos que derivan de flores en glomérulos, ubicados en las partes media y basal de la espiga). El tamaño de las semillas es menor en frutos multigermen que en los monogermen, y esto determina diferencias en el tamaño inicial de las plántulas. El hecho de que los frutos sembrados como semilla produzcan una única planta o un grupo de plantas que compiten entre sí, constituye una fuente adicional de heterogeneidad en el inicio del cultivo y por lo tanto, en el canopeo obtenido. Este problema pudo ser en buena medida resuelto en la década de 1940 a partir del hallazgo, por parte del genetista ruso V. F. Savitsky, de plantas de remolacha azucarera que tenían fijado el carácter monogermen, a partir de las cuales y tras sucesivos retro-cruzamientos se han obtenido la mayor parte de los cultivares comerciales actuales (Harveson, 2015). El mejoramiento de la remolacha hortícola, aunque más reciente, también ha logrado la obtención de genotipos monogermen (Jagosz, 2018). Si bien el mejoramiento ha permitido lograr cultivos extensivos con un canopeo homogéneo, el carácter monogermen hace necesario un muy alto poder germinativo y vigor de las semillas para minimizar la pérdida de plantas, requerimiento que hasta el momento ha resultado difícil alcanzar (Orzeszko-Rywka y Podlaski, 2003; Farzaneha *et al.*, 2016).

Parte de las dificultades en la germinación homogénea de genotipos monogermen es atribuible al hecho de que los pericarpios de los aquenios representan una barrera al ingreso de agua y oxígeno (Heydecker *et al.*, 1971; Coumans *et al.*, 1976). La semilla de remolacha requiere condiciones hídricas bastante restrictivas para su germinación. Heydecker *et al.*

(1971) demostraron que los mucílago presentes en los pericarpios dificultan el acceso de oxígeno al embrión. Existe un único poro en la pared esclerificada del fruto, ubicado en el punto de fijación a la planta madre, que constituye la ruta para la absorción de oxígeno y el agua a la semilla. Perry y Harrison (1974) sugirieron, a través de cálculos teóricos de flujo, que el suministro de oxígeno sería insuficiente para sostener la germinación cuando el poro se llena de agua. El sellado del poro, redujo la tasa de respiración y consecuentemente, la germinación, mientras que la abrasión de las cubiertas la favoreció (Vital dos Santos y Pereira, 1989). El mencionado mucílago contiene inhibidores de la germinación que pueden ser removidos por lavado de los frutos (Heydecker *et al.*, 1971; Taylor *et al.*, 2003). La práctica común de pelletizado de los frutos destinada a facilitar la siembra mecanizada de precisión y la aplicación de agroquímicos suele desfavorecer la germinación debido a que los pellets causan una menor difusión del oxígeno, un menor lavado de los inhibidores, y aumentan la fuerza requerida para la emergencia de la radícula (Duan y Burris, 1997; Podlaski *et al.*, 2019). La homogeneidad en la germinación también depende de un adecuado contacto entre el suelo y la semilla que favorezca su hidratación, para lo cual influyen propiedades físicas del suelo (textura, densidad aparente, porosidad) (Blunk *et al.*, 2017; 2018).

Los requerimientos térmicos para la germinación y emergencia han sido estudiados tanto en la remolacha azucarera como en la hortícola. Según Campbell y Enz (1991), la temperatura óptima de germinación de la remolacha azucarera se encuentra entre 20° y 25 °C; bajo estas condiciones se logra una germinación rápida y se maximiza la uniformidad en la emergencia. Analizando el comportamiento de 14 híbridos de remolacha azucarera en una placa de termogradiante, estos autores encontraron un requerimiento medio de 136 °C día por sobre una temperatura base de 4,4 °C para lograr un 50% de emergencia. Por su parte, Hoffmann y Kluge-Severin (2011) en una serie de ensayos a campo empleando un único genotipo comercial de remolacha azucarera, sembrado en distintas fechas y localidades, calcularon requerimientos de entre 100 y 250 °C día por sobre una temperatura base de 3 °C para lograr

el 50% de emergencia. Con respecto a la remolacha hortícola, Mc Cormick *et al.* (2014) determinaron en un ensayo en condiciones controladas en el rango 5–40 °C las temperaturas cardinales: 4,2; 35,9 y 44,4 °C (base, óptima y máxima, respectivamente) para la germinación. Si bien la remolacha puede germinar con temperaturas de alrededor de 5 °C, propias de siembras tempranas, bajo estas condiciones las plantas acumulan horas de frío y pueden llegar a florecer anticipadamente debido a que la especie tiene un requerimiento de vernalización, con una temperatura crítica de 8 °C (Lasa Dolhagaray y López, 1977). No obstante, como se trata más abajo, en la última década ha habido importantes progresos en el desarrollo de cultivares resistentes a la vernalización.

Con el propósito de mejorar la rapidez y uniformidad de la germinación y emergencia se ha estudiado el efecto de diversos tratamientos presiembra sobre las semillas, tales como la hidratación (*priming*) (Orzeszko-Rywka y Podlaski, 2003; Chomontowski *et al.*, 2019; Capron *et al.*, 2000) en remolacha azucarera (Jagosz, 2018), en remolacha hortícola o tratamientos hormonales (Hermann *et al.*, 2007) que hasta el momento no han sido totalmente efectivos.

Las diez semanas posteriores a la germinación son críticas para lograr un stand de plantas homogéneo, debido a la elevada susceptibilidad de las plantas jóvenes de remolacha a situaciones de estrés abiótico por baja humedad y alta salinidad, y también por la competencia impuesta por malezas (Mc Grath *et al.*, 2008). El mejoramiento genético para lograr alto vigor inicial de las plántulas se ha dificultado por la baja heredabilidad tradicionalmente observada para este carácter. Sin embargo, se han identificado marcadores metabólicos que podrán ser empleados con ese propósito (De los Reyes *et al.*, 2003; Pestsova *et al.*, 2008; Peukert *et al.*, 2016).

Desarrollo del área foliar

El desarrollo inicial del área foliar en las remolachas suele ser lento. Sin embargo, una vez superado el período inicial del cultivo, este puede alcanzar altos valores de interceptación de radiación merced a la posición de las hojas y a la estructura general del canopeo (Tei *et al.*, 1996). El tamaño final de las hojas depende de su posición en el tallo. A medida que la planta se desarrolla, el área final de cada hoja se incrementa sucesivamente hasta alrededor de la décima hoja, para luego disminuir en forma paulatina, tanto en remolacha azucarera (Milford *et al.*, 1985) como en la remolacha hortícola (Barrera, 2017). Si bien los patrones son similares, los valores de tamaño foliar son sustancialmente menores en la remolacha hortícola que en la azucarera (figura 2).

El desarrollo foliar de las remolachas depende fuertemente de los factores ambientales. En ausencia de otras limitaciones ambientales, la tasa de expansión del área foliar de remolacha azucarera depende fuertemente de la temperatura; la temperatura base para este proceso es de 3 °C (Milford *et al.*, 1985). Milford y Riley (1980) observaron que los incrementos de temperatura entre 7 y 20 °C aumentaron la tasa de iniciación foliar y los tamaños foliares como consecuencia de un mayor efecto sobre la tasa de expansión (aumento) que sobre el desarrollo (acortamiento de la fase). Abayomi y Wright (2002) observaron que el déficit hídrico temprano no afecta la tasa de aparición ni el número final de hojas por planta, pero sí la expansión y el tamaño foliar final en remolacha azucarera. Entre los nutrientes, el nitrógeno mostró un efecto promotor tanto sobre el

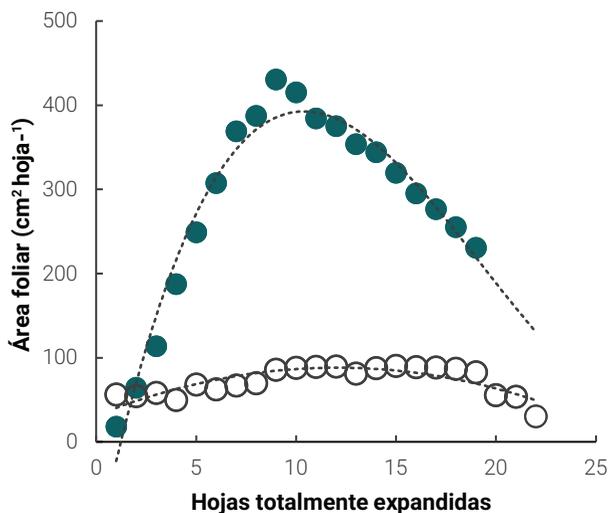


Figura 2. Tamaño final de hojas en cultivos de remolacha azucarera (●) (adaptado de Milford *et al.*, 1985) y hortícola (○) (adaptado de Barrera, 2017).

tamaño (Milford *et al.*, 1985) como sobre la tasa de aparición de hojas (Starke y Hoffmann, 2014a).

El índice de área foliar crítico (IAFc) que permite captar el 95% de la radiación fotosintéticamente activa varió entre 3 (Malnou *et al.*, 2008) y 3,5 (Hoffmann y Kluge-Severin, 2010, 2011) para la remolacha azucarera. Malnou *et al.* (2006) encontraron que para alcanzar estos valores de IAFc los cultivos requieren acumular aproximadamente 900 °C día desde la emergencia. Es por esto que el IAFc se suele alcanzar más rápidamente en los cultivos iniciados en otoño que en aquellos iniciados en primavera (que son los más frecuentes), y la razón es que, en siembras primaverales, la expansión de hojas es lenta debido a las bajas temperaturas. Por esto se ha especulado que las siembras tempranas otoñales permitirían aprovechar las temperaturas aún altas del año para favorecer el desarrollo foliar (Jaggard *et al.*, 2009). Similarmente, en ensayos con remolacha hortícola realizados en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina), Barrera (2017) encontró que tanto el tamaño final como la tasa relativa de expansión foliar eran menores en un cultivo primaveral que en uno de verano-otoño. Sin embargo, en estos ensayos, el índice de área foliar no alcanzó el IAFc; los valores máximos logrados de IAF fueron 1,3 y 2,4 para las siembras primaveral y estival, respectivamente.

La densidad de siembra de la remolacha azucarera actualmente oscila alrededor de las 100.000 plantas ha⁻¹ (Çakmakçı *et al.*, 1998; Jaggard *et al.*, 2011; Ramazan, 2002; Bhullar *et al.*, 2010; Brar *et al.*, 2015). La densidad de siembra de la remolacha hortícola suele ser superior (180.000 plantas ha⁻¹) debido a su menor tamaño por planta. El hecho de no alcanzar el IAFc a estas densidades mostrado por Barrera (2017) sugiere que sería posible incrementar la densidad de siembra de la remolacha hortícola por encima de los valores actuales.

Formación de la raíz de reserva

La raíz de reserva deriva de un tejido de cambium secundario y consiste en anillos concéntricos periféricos al periciclo de la raíz primaria. Estos anillos son estructuras esenciales para el almacenamiento de azúcares y consisten en zonas vasculares

inmersas en zonas de células parenquimáticas, cuya separación, en general, disminuye desde el centro de la raíz hacia la región distal (Hoffmann y Kluge-Severin, 2011). Su proceso de formación ha sido estudiado con detenimiento en la remolacha azucarera donde, según Milford (1973), el cambium secundario se forma en rápida sucesión, por lo que en unos pocos milímetros de diámetro se pueden tener todas las zonas de crecimiento anular que se han desarrollado simultáneamente (Milford, 1973; Milford *et al.*, 1988). La mayoría de los anillos del cambium se forman entre 1.000 y 1.500 °C día desde la siembra, independientemente del sitio y época del año en que se establezca el cultivo (Hoffmann y Kluge-Severin, 2011). De acuerdo con estos autores, el número de anillos de cambium no depende de las condiciones ambientales imperantes durante el cultivo (Hoffmann y Kluge-Severin, 2011). La tasa de acumulación de sacarosa en la remolacha azucarera alcanza un máximo entre 16 y 20 semanas después de la siembra (Hoffmann, 2010a). Los resultados de Schnepel y Hoffmann (2015) muestran que la concentración de azúcar alcanza su máximo valor entre 3.400 y 5.000 °C día y luego disminuye.

La acumulación de peso fresco de las raíces es posterior a la acumulación del área foliar (figura 3). Se ha propuesto que el crecimiento de las raíces presenta dos fases:

Temprana: la tasa de acumulación de biomasa es baja y la partición de materia seca a las raíces de almacenamiento, pequeña y constante.

Tardía: la tasa de crecimiento absoluto de la planta es alta y constante y la proporción de materia seca particionada hacia las raíces aumenta con el tiempo (Green *et al.*, 1986).

De acuerdo con Green *et al.* (1986) en remolacha azucarera la transición entre ambas fases sería rápida y se produciría más tempranamente para la acumulación de materia seca total que para la acumulación de sacarosa. Esto implica que las estructuras que han de acumular azúcares se desarrollan antes de que se produzca dicha acumulación (Milford *et al.*, 1988). El desarrollo del cambium secundario determinaría una abundancia inicial de células pequeñas y un incremento en la concentración de sacarosa. La expansión de estas cé-

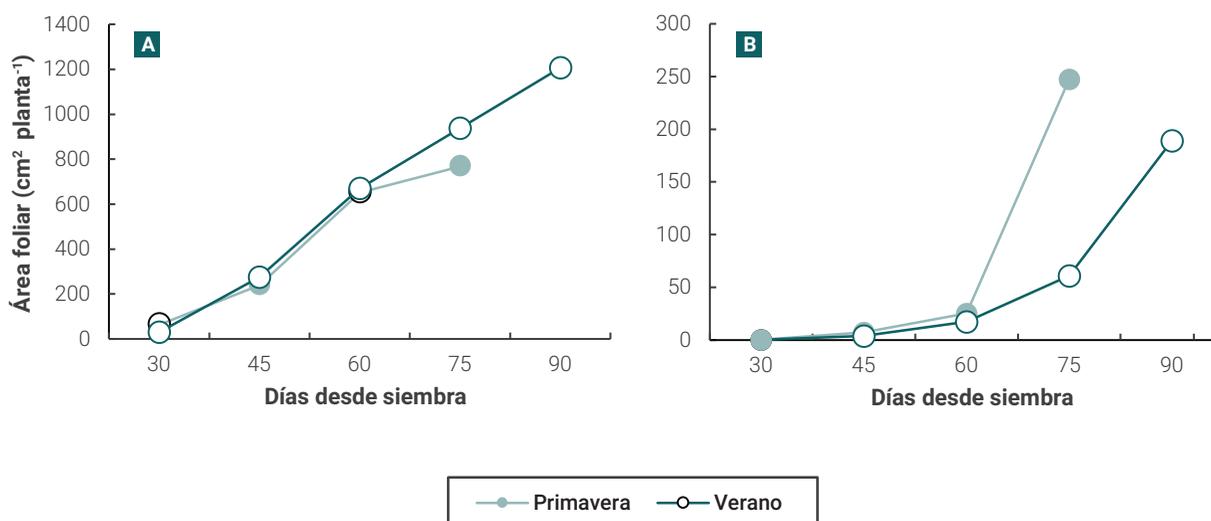


Figura 3. Cambios en el área foliar (A) y el peso fresco de raíces (B) durante el ciclo de producción en cultivos de remolacha hortícola iniciados en primavera (●) o en verano (○). Adaptado de Barrera (2017).

lulas sería seguida por la producción de más células pequeñas, manteniendo un rápido crecimiento e incrementando la acumulación de sacarosa. Sin embargo, esta hipótesis ha sido cuestionada por Milford *et al.* (1988), quienes no encontraron diferencias entre el momento en que se incrementaba la materia seca de la raíz y en el que aumentaba la tasa de acumulación de sacarosa. Estos autores proponen que el cambio en la partición de materia seca hacia la raíz es progresivo a medida que la planta incrementa su tamaño, sin una rápida transición en un punto específico en el desarrollo de la raíz. En cualquier caso, independientemente del tipo de remolacha, es claro que el cultivo desarrolla preferentemente follaje hasta que, probablemente al alcanzar cierto nivel de disponibilidad de sacarosa, aumenta la partición de los fotoasimilados hacia la raíz. El cambio en la partición de biomasa en la fase de engrosamiento de la raíz está acompañado de una disminución en la proporción de los recursos destinados al desarrollo foliar, motivo por el cual se incrementa el tiempo térmico requerido para la aparición de cada hoja (Lemaire *et al.*, 2009). Este cambio ha sido representado como el aumento de la relación alométrica entre el peso de la raíz y el de la parte aérea, tanto en remolacha azucarera (Lemaire *et al.*, 2009) como hortícola (Infante Posada, 2010) (figura 4).

El estímulo para la formación de la raíz de reserva está relacionado con el balance de sacarosa y reguladores hormonales en la parte aérea (Das Gupta, 1972). Este autor observó que si se reemplazaba el ápice de crecimiento con cápsulas que contenían auxinas, giberelinas o citocininas, se estimulaba el crecimiento de la raíz de reserva. El doble control nutricional y hormonal del desarrollo de órganos subterráneos de almacenamiento es un mecanismo frecuente en distintas especies vegetales (Tognetti *et al.*, 2013; Martínez Noel y Tognetti, 2018). El análisis transcriptómico realizado por Zhang *et al.*

(2017) mostró que hay cuatro grupos hormonales involucrados en el inicio del engrosamiento y posterior crecimiento de la raíz de reserva de la remolacha: auxinas, citocininas, brassinosteroides y giberelinas. En cambio, el ácido jasmónico, una hormona frecuentemente implicada en el desarrollo de órganos de reserva (Pelacho y Mingo-Castel, 1991; Ravnikar *et al.*, 1993), no tendría un rol significativo en las remolachas ya que la aplicación de jasmonatos a plantas de esta especie cultivadas *in vitro* no promovió el desarrollo de la raíz de reserva (Koda *et al.*, 2001).

El ácido indolacético en concentraciones entre 100 y 2000 ppm incrementó en alrededor del 10% el peso de la raíz de remolacha azucarera sin modificar su concentración de azúcares, posiblemente a través de cambios en la partición de asimilados (Abd El-Kader, 2011). En cambio, la aplicación del ácido giberélico (en el rango 10-200 ppm) promovió el crecimiento de la raíz a expensas de la concentración de azúcares, un efecto indeseable en los cultivos de remolacha azucarera (Schreiber y Ferguson, 1966; Poostch y Schmeck, 1971). En cuanto a las citocininas, en ensayos realizados con remolacha hortícola, se observó que aplicaciones tempranas de 6-bencilaminopurina (5-100 ppm) promovieron el desarrollo del follaje y la fijación de carbono, aumentando la disponibilidad de fotoasimilados y el crecimiento de la raíz de reserva, sin producir efectos sobre la partición (Barrera, 2017). Es posible que los efectos de las citocininas estén mediados por un aumento en la partición del nitrógeno hacia las hojas (Ookawa *et al.*, 2004).

Rendimiento

Análisis integrado

El rendimiento de las remolachas puede estudiarse empleando el denominado análisis integrado (Hardwick, 1984; Di Bene-

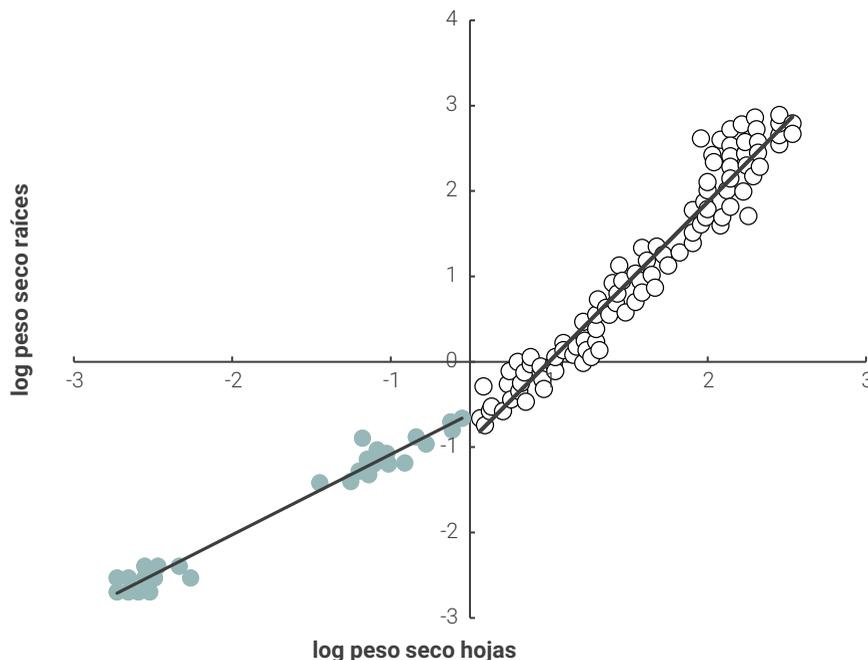


Figura 4. Análisis alométrico entre los pesos secos de raíces y hojas en la remolacha hortícola en las etapas previa (●) y posterior (○) al engrosamiento de la raíz. Las pendientes de las ecuaciones de regresión son: log peso seco raíz Etapa previa = 0,94 log peso seco hojas -0,62 ($r^2 = 0,973$); log peso seco raíz Etapa posterior = 1,87 log peso seco hojas -0,93 ($r^2 = 0,942$). Adaptado de Infante Posadas (2010).

detto y Tognetti, 2016). De acuerdo a este análisis, la cantidad de materia seca (MS) acumulada en el órgano de interés agrícola es proporcional a: la radiación interceptada durante el ciclo de producción; a la eficiencia de conversión de la radiación interceptada en materia seca (RUE, por sus iniciales en inglés); y a la eficiencia de partición de la materia seca hacia el órgano de interés, en este caso la raíz de reserva (índice de cosecha).

A diferencia de lo que ocurre en otros cultivos, el rendimiento de la remolacha hortícola para consumo fresco se mide en peso fresco, por lo que, a igual materia seca cosechada, menores porcentajes de materia seca en la raíz corresponderán a mayores rendimientos. En el caso de la remolacha azucarera el carácter de interés es el rendimiento en azúcar (Biancardi *et al.*, 2010), por lo cual la proporción de sacarosa en la materia seca es un factor importante para tener en cuenta. En el de la remolacha forrajera, el índice de cosecha no es un factor muy importante si el forraje se consume *in situ*, ya que la planta entera suele ser ingerida por el ganado.

Cualquier factor que reduzca la expansión foliar afecta la intercepción de radiación y puede incidir negativamente en la acumulación de materia seca de toda la planta y en última instancia en su rendimiento (Lemaire *et al.*, 2009). Así, por ejemplo, Chakwizira *et al.* (2018) reportaron que el efecto promotor del rendimiento del riego y de la fertilización nitrogenada en cultivos de remolacha forrajera era atribuible fundamentalmente al incremento en la radiación interceptada, siendo menor la contribución del aumento de RUE y mínimos los cambios en la partición hacia la raíz. No obstante, dado que la remolacha posee la capacidad de continuar desarrollando hojas casi indefinidamente, las plantas poseen cierta capacidad de recuperación del área foliar cuando esta es afectada por un estrés temprano. En condiciones normales de cultivo, un equilibrio entre la senescencia y la producción de nuevas hojas mantiene el área foliar relativamente constante durante las etapas avanzadas del cultivo, mientras que la raíz aumenta progresivamente su tamaño (Vandendriessche *et al.*, 1990). Esta renovación constante de la fuente fotosintética permite acumular grandes cantidades de materia seca en la raíz de reserva, que presenta un crecimiento virtualmente indefinido (Tei *et al.*, 1996; Jaggard *et al.*, 2009). Es por esto que frecuentemente se ha considerado que el rendimiento en peso y en azúcar suelen estar limitados por el tamaño de la fuente fotosintética.

Las defoliaciones intensas de la remolacha azucarera, especialmente si son realizadas desde una fecha temprana, suelen reducir el rendimiento (Stallknecht y Gilbertson, 2000) mientras que aumentos en la concentración del CO₂ ambiental incrementaron el rendimiento de manera significativa (Ford y Thorne, 1967; Thomas, 1999; Manderscheid *et al.*, 2009). Sin embargo, no siempre el crecimiento de las raíces se encuentra limitado por el tamaño de la fuente productora de fotoasimilados. Burkart *et al.* (2009) sugirieron que el crecimiento de la remolacha azucarera está influenciado por factores y procesos endógenos que cambian la actividad del destino (es decir, la raíz de reserva) durante la ontogenia de la planta, lo que a su vez influye en la tasa fotosintética. Esto ocurriría cuando el suministro de fotoasimilados generados por las hojas excede la capacidad de acumulación de las raíces, con la consiguiente acumulación de fotoasimilados en otras partes de la planta, incluidas las hojas (Geiger *et al.*, 1969; Manderscheid *et al.*, 2010). A su vez, el aumento en la concentración de azúcar en las hojas controlaría la actividad de la fuente mediante una

retroalimentación negativa sobre la capacidad fotosintética (Paul y Foyer, 2001).

Las remolachas hortícola y azucarera presentan una fuerte respuesta de escape al sombreado. Aun en ausencia de una competencia directa por recursos, la simple presencia de plantas vecinas a través de la luz reflejada determina una fuerte reducción del crecimiento de las raíces, pero el desarrollo foliar es el menos afectado (Schambow *et al.*, 2019). La marcada disminución en el tamaño de las raíces ante incrementos en la densidad (Hills, 1973) tiene fuertes implicancias sobre el rendimiento del cultivo.

La eficiencia de uso de la radiación en términos de radiación fotosintéticamente activa (PAR) está vinculada directamente a la fijación de carbono por el follaje. Las hojas individuales de remolacha azucarera saturan su fotosíntesis con irradiancias de aproximadamente 1.000 μmol fotones PAR $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Vandendriessche *et al.*, 1990), pero se han reportado valores algo superiores (1.300 μmol fotones PAR $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para canopeos cerrados (Shi *et al.*, 2010). Condiciones ambientales que disminuyen la tasa fotosintética (por ejemplo, deficiencias de nitrógeno) causan generalmente una disminución de los valores de RUE (Malnou *et al.*, 2008). Existen pocos estudios acerca de la RUE en remolacha hortícola y en remolacha forrajera, mientras que son numerosos en remolacha azucarera. En el caso de la remolacha hortícola, Tei *et al.* (1996) reportaron un valor de 1,66 g MJ^{-1} PAR interceptado (equivalente a 0,8 g MJ^{-1} de radiación global interceptada, RGI). Para la remolacha forrajera, Chakwizira *et al.* (2018) reportaron valores mayores (de entre 2,2 y 3,6 g MJ^{-1} PAR interceptado, correspondientes a 1,06-1,73 g MJ^{-1} RGI, para cultivos en secano y bajo riego, respectivamente). Estos valores son similares a los usualmente reportados para remolacha azucarera, los que a su vez se consideran altos en comparación con los de otros cultivos C₃ como soja y girasol, aunque algo inferiores a los de plantas C₄ como maíz (Katerji *et al.*, 2008). De acuerdo con Jaggard *et al.* (2009) no solo no ha habido progreso en los valores de RUE en los cultivares desarrollados desde la década de 1980, sino que además se ha registrado una disminución neta de este valor. En los cultivos realizados en esa década, bajo condiciones potenciales, se observaban valores de RUE superiores a 1,75 g MJ^{-1} RGI, mientras que en un ensayo llevado a cabo en 2006 los valores fueron de 1,22 y 1,37 g MJ^{-1} RGI para cultivos de secano y bajo riego, respectivamente (Jaggard *et al.*, 2009). No obstante, en el estudio de Lemaire *et al.* (2009), se reportaron valores de 3,36 g MJ^{-1} PAR interceptado (equivalentes a aproximadamente 1,61 g MJ^{-1} RGI). Rinaldi y Vonella (2006) encontraron valores de RUE algo mayores en los cultivos iniciados en primavera que en los de otoño (1,14 y 1,00 g MJ^{-1} RGI respectivamente), y este resultado fue atribuido a que si bien la producción total de materia seca era similar entre fechas de cultivo, el ciclo fue más corto en la siembra primaveral. En cambio, Hoffmann y Kluge-Severin (2010, 2011) no encontraron diferencias entre cultivos de otoño o primavera, promediando 1,2 g MJ^{-1} de RGI.

Los valores de índice de cosecha (IC) reportados tanto para la remolacha hortícola (Infante Posada, 2010) como forrajera y azucarera (Chakwizira *et al.*, 2018; Laufer *et al.*, 2016) son superiores a los de la mayoría de los cultivos ya que alrededor del 80% de la MS se encuentra en las raíces de reserva al fin del ciclo del cultivo. La remolacha forrajera, por tener en general un menor IAF, puede presentar valores de IC ligeramente superiores a la remolacha azucarera (Laufer *et al.*, 2016). El IC

puede disminuir como consecuencia de niveles excesivos de nitrógeno, que promueven el desarrollo foliar sin un efecto positivo sobre el crecimiento radical (Starke y Hoffmann, 2014a). Por el contrario, el estrés hídrico, que reduce la expansión foliar e incrementa la partición de fotoasimilados hacia órganos subterráneos, tiende a aumentar el IC (Werker *et al.*, 1999).

En ensayos en que se comparó la producción total de materia seca (MS) de la planta, o el rendimiento en términos de MS de la raíz de reserva, la remolacha azucarera presentó valores algo superiores a la remolacha forrajera (Starke y Hoffmann, 2014a; Laufer *et al.*, 2016). Esto ha sido atribuido a diferencias en los avances del mejoramiento de ambos cultivos (Laufer *et al.*, 2016). No existen, en nuestro conocimiento, ensayos comparativos de rendimiento de estos tipos de remolacha con la remolacha hortícola. Es importante tener en cuenta que, en la práctica, solo en la remolacha forrajera el rendimiento se evalúa en términos de MS acumulada en la raíz de reserva, en cambio el rendimiento en peso fresco y en azúcar son las variables de interés en la remolacha hortícola y azucarera, respectivamente. En general, los contenidos de MS de las raíces de la remolacha hortícola son los menores de entre los tres tipos, si bien son bastante variables. El porcentaje de MS varió entre 6 y 15,6% (Raczko *et al.*, 2015; Ugrinović *et al.*, 2012;

Szopińska y Gawęda, 2013; Straus *et al.*, 2012). Petek *et al.* (2012) observaron una variación interanual de más del 100% en el contenido de MS del mismo cultivar relacionada con las precipitaciones caídas durante el ciclo de cultivo. Para la remolacha forrajera se han reportado valores medios de entre 11,5 y 18,6% (Turk, 2010; Starke y Hoffmann, 2014a). Aunque existe alta variabilidad entre raíces individuales, la mayoría de los datos se presentaba en el rango de 15 a 20%. Por una parte, Judson *et al.* (2016) encontraron que la MS tiende a disminuir cuanto mayor es el tamaño de las raíces. Por otra parte, los mayores valores medios de contenido de MS suelen encontrarse en la remolacha azucarera, en un rango que va de 17,1 a 25,6% (Starke y Hoffman, 2014a, b).

El tamaño individual de las raíces disminuye con el aumento en la densidad de siembra. Raíces más chicas tienden a presentar mayores concentraciones de MS y de sacarosa (Hills, 1973; Judson *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017). Como consecuencia de estos efectos, el rendimiento en azúcar es estable en un amplio rango de densidades de siembra, mientras que la producción de biomasa fresca por unidad de superficie alcanza un máximo valor a densidades relativamente bajas (figura 5), lo que tiene implicancias agronómicas para la producción de los distintos tipos de remolacha.

El ordenamiento de los tipos de remolacha en cuanto a contenido de MS de las raíces se corresponde con el de la concentración de azúcar en estas. La proporción de azúcar en la MS de las raíces es menor en la remolacha hortícola, en la que suele representar alrededor del 50% (Szopińska y Gawęda, 2013). En cambio, Starke y Hoffmann (2014a) reportaron concentraciones de sacarosa que representaban 72,6% y 77,3% de la MS de las raíces de las remolachas forrajera y azucarera, respectivamente. La mayor concentración de azúcar en la remolacha azucarera sumada a una mayor producción de MS resulta en un mayor rendimiento en azúcar que la transforma en el tipo de remolacha más apropiado para diversos usos industriales (Laufer *et al.*, 2016).

Limitantes ambientales del rendimiento

La respuesta del rendimiento en relación con la disponibilidad de agua y nutrientes, especialmente nitrógeno, así como la tolerancia a la salinidad y a temperaturas extremas, entre otras limitantes ambientales, son aspectos importantes para analizar, sobre todo teniendo en cuenta que las remolachas suelen ser destinadas a ambientes subóptimos.

- **Disponibilidad hídrica:** la remolacha hortícola se produce generalmente bajo riego (Farnia y Hashemi, 2015; Kiyamaz y Ertek, 2015). Las remolachas azucarera y forrajera se cultivan mayoritariamente en secano; estas últimas recibieron mayor atención en cuanto a sus requerimientos hídricos. Se ha estimado que la remolacha azucarera consume 500-800 mm de agua durante la estación de crecimiento (Rinaldi y Horemans, 2012). Varios estudios han calculado la eficiencia de uso del agua de la remolacha azucarera. Jakli *et al.* (2018) obtuvieron valores entre 6,9 y 7,8 kg m⁻³ en cultivos bajo diferente nivel de fertilización potásica. Asimismo, Katerji y Mastroilli (2009) en un estudio comparativo de diferentes cultivos reportaron valores de EUA entre 6,1 y 7,9 kg m⁻³. Chakwizira *et al.* (2014a) encontraron que la EUA para la remolacha forrajera fue de entre 4,6 y 8,0 kg m⁻³ y que estaba negativamente correlacionada con la disponibilidad de agua en el suelo. Existe por otra parte un vacío

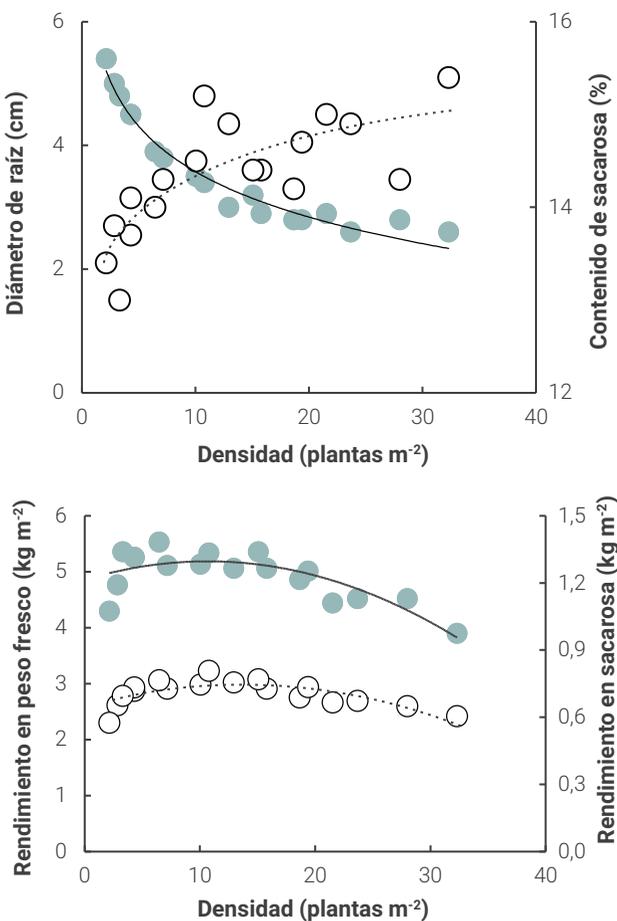


Figura 5. Relación entre la densidad de plantas, el diámetro de la raíz (●) y la concentración de sacarosa (○) (A) y relación entre la densidad de plantas y el rendimiento en peso fresco (●) y en sacarosa (○) (B) en remolacha azucarera. Reelaborado a partir de Hills (1973).

en la información acerca de EUA en remolacha hortícola, cuyas hojas de menor tamaño podrían mostrar diferencias en la eficiencia transpiratoria, y por lo tanto merecen ser explorados y no interpolados a partir de los conocimientos acerca de los otros tipos de remolacha. Cuando la restricción hídrica es moderada, la partición de fotoasimilados en la planta se modifica priorizando el crecimiento de las raíces a expensas del crecimiento foliar, compensando en cierto grado la menor fijación de carbono (Werker *et al.*, 1999). El crecimiento foliar puede recuperarse cuando la provisión de agua mejora (Choluj *et al.*, 2004). Si bien las remolachas muestran una alta plasticidad adaptativa a la baja disponibilidad de agua (Stagnari *et al.*, 2014), el estrés hídrico es el principal factor que afecta el rendimiento de los cultivos en seco (Pidgeon *et al.*, 2001, 2006; Shrestha *et al.*, 2010; Hassanli *et al.*, 2010). El efecto del estrés hídrico sobre la producción depende del nivel de estrés, del estado fenológico del cultivo y de la estación de crecimiento (Choluj *et al.*, 2004; Monti *et al.*, 2006). Tanto el rendimiento de MS como la acumulación de azúcares en la raíz se hallan estrechamente correlacionados con la evapotranspiración del cultivo (Uçan y Gencoulan, 2004). Por esto, un prerrequisito para obtener rendimientos elevados es la combinación de suelos profundos, con buena capacidad de almacenamiento de agua, y un adecuado suministro hídrico (Kenter *et al.*, 2006).

- **Disponibilidad de nitrógeno:** la escasez de nitrógeno retarda el crecimiento foliar (Milford *et al.*, 1985), acelera la senescencia de las hojas (Nouri *et al.*, 2009) y reduce así la cantidad de radiación solar interceptada y el rendimiento (Werker *et al.*, 1999). El nitrógeno en exceso suele causar una excesiva producción de hojas (Milford *et al.*, 1988) que no aumenta significativamente la intercepción de radiación (Scott *et al.*, 1994) y disminuye la proporción de asimilados almacenados como sacarosa en la raíz (Milford y Watson, 1971; Milford, 1973; Stevens *et al.*, 2007; Abdel-Motagally y Attia, 2009). Starke y Hoffmann (2014a) encontraron que el rendimiento de MS de raíz de remolacha forrajera bajo la máxima dosis aplicada (300 kg ha⁻¹) no difirió del logrado con 100 o 200 kg ha⁻¹, mientras que en dos cultivares de remolacha azucarera la máxima dosis de N disminuyó el rendimiento de MS con respecto a las otras dosis. Con respecto a la eficiencia en el uso del nitrógeno, Laufer *et al.* (2016) reportaron valores de 75-130 y de 60-125 kg de peso seco de raíz/kg de N en toda la planta para remolacha forrajera y azucarera, respectivamente. Mele (2019) encontró una fuerte disminución de la EUN con el aumento en el nivel de fertilización nitrogenada en remolacha azucarera.
- **Sales:** si bien el ancestro de las remolachas cultivadas, la *Beta vulgaris* subsp. *maritima* era resistente a la salinidad (Stevanato *et al.*, 2001), esta característica se perdió parcialmente durante el proceso de mejoramiento orientado a incrementar el rendimiento en azúcar (Rozema *et al.*, 2015). Así, se ha observado cierta sensibilidad a la salinidad durante las primeras etapas de crecimiento de las plántulas de remolacha azucarera (Ghoulam y Fares, 2001) para tornarse más tolerantes en estadios posteriores (Katerji *et al.*, 1997; Romano *et al.*, 2013). La tolerancia a la salinidad de los cultivos suele caracterizarse a través de dos parámetros:
 - el umbral de salinidad, valor medido en unidades de conductividad eléctrica (dS m⁻¹) a partir del cual disminuye el rendimiento en MS;

- la pendiente de la respuesta porcentual del rendimiento a la salinidad.
- Basados en datos históricos, Tanji y Kielen (2002) clasifican a la remolacha azucarera como “tolerante” (valores de 9,0 dS m⁻¹ y 5,9% dS⁻¹ m para umbral y pendiente, respectivamente) y a la remolacha hortícola como “moderadamente tolerante” (4,0 dS m⁻¹ y 7,0 dS⁻¹ m para umbral y pendiente, respectivamente). La remolacha forrajera no se encuentra incluida en este documento, pero la información disponible indica que es un cultivo cuya tolerancia es solo ligeramente inferior a la de su ancestro halófito. Niazi (2007) observó que la tasa de crecimiento relativo (RGR) de la remolacha forrajera era superior a la de la planta ancestral independientemente del nivel de salinidad. Asimismo, Rozema *et al.* (2015) observaron que al aumentar la salinidad de 0,4 a 5 dS m⁻¹ en un cultivo hidropónico de remolacha azucarera la tasa de crecimiento relativo se incrementaba aproximadamente un 20% sin alterar la partición de asimilados a la raíz, mientras que en condiciones de campo, Goh y Magat (1989) encontraron que, la aplicación de 295 kg ha⁻¹ fue suficiente para aumentar un 30% la producción de materia seca y azúcar de la raíz. Estos resultados sugieren que niveles moderados de NaCl en el suelo podrían actuar como fertilizantes en el cultivo de remolachas.
- **Temperatura:** tradicionalmente, el riesgo de vernalización con la consecuente pérdida de calidad por inducción floral representó una dificultad para el cultivo de remolachas en condiciones de bajas temperaturas, en tanto el daño por heladas era un problema importante solo en las siembras primaverales tempranas de la remolacha azucarera (Lasa Dolhagaray y López, 1977; Campbell y Enz, 1991). Con el desarrollo de cultivares resistentes a la vernalización, que permiten realizar siembras otoñales, la probabilidad de que las raíces estén expuestas a las heladas ha aumentado, promoviendo el interés por estudiar los factores que condicionan la resistencia al frío en esta especie (Kirchhoff *et al.*, 2012; Loel y Hoffmann, 2014, 2015). Se ha observado que la tolerancia a las heladas depende en gran medida del tamaño de la planta en términos del diámetro de la raíz. Por un lado, Reinsdorf *et al.* (2013) reportaron que las tasas de supervivencia más altas se hallaban en raíces de 1-2,5 cm de diámetro, en las que las plantas toleraron eventos de congelación del tejido de la raíz hasta aproximadamente -4,5 °C, con temperaturas del aire de aproximadamente -15 °C, mientras que las raíces más grandes se dañaron a alrededor de -1,5 °C. Esta mayor tolerancia de las raíces más pequeñas se asoció a una mayor osmolalidad del tejido dada por altas concentraciones de iones K⁺ y Na⁺ y aminoácidos. La respuesta de las remolachas a temperaturas elevadas, por otro lado, ha sido menos explorada. La tasa máxima de acumulación de azúcares de la remolacha azucarera se produce a temperaturas entre 20 y 22 °C, y disminuye fuertemente a temperaturas superiores a 30 °C (Petkeviciene, 2009). La temperatura máxima para la acumulación de sacarosa se encuentra en alrededor de 35 °C, por encima de la cual la acumulación se detiene (Mahmoud y Hill, 1981; Gobin, 2012).

ECOFISIOLOGÍA DE LA CALIDAD

Considerando la calidad de un producto como su aptitud para un uso determinado, los parámetros que definen la calidad de

los distintos tipos de remolachas difieren de acuerdo al propósito de su cultivo y serán por esto abordados por separado.

Remolacha hortícola

La calidad comercial de la remolacha hortícola se ha relacionado tradicionalmente con sus características externas, incluyendo el tamaño, forma, sanidad y ausencia de defectos. Así, se ha evaluado la influencia de distintas variables o prácticas agronómicas sobre estos atributos (Benjamin *et al.*, 1987; Benjamin, 1997; Rantao, 2013; Kaack, 2016). Para las diferentes presentaciones y productos industrializados derivados de la remolacha hortícola que agregan valor a su producción (preparaciones congeladas, enlatadas, encurtidas, pasteurizadas) estos aspectos de calidad son particularmente rigurosos (Featherstone, 2015). La creciente información sobre los efectos benéficos del consumo de la remolacha hortícola sobre la salud humana (Misan *et al.*, 2016; Vasconcellos *et al.*, 2016; Bach *et al.*, 2015; Nizioł-Lukaszewska, 2015) ha incrementado la atención en aspectos de la calidad en términos de la composición química de la raíz.

La calidad de la remolacha hortícola orientada a la preparación de alimentos funcionales para la obtención de compuestos nutraceuticos o para el desarrollo de bioenvases depende en gran medida de la concentración de pigmentos. El tipo y la concentración de estos pigmentos también definen sus propiedades antioxidantes (Czapski *et al.*, 2009; Watari *et al.*, 2017). Las betalaínas, principales pigmentos de las remolachas, pueden clasificarse en dos tipos: betacianinas, que confieren a las raíces el color rojo violáceo, y betaxantinas, de color amarillo. La principal betacianina es la betanina ($C_{24}H_{27}N_2O_{13}$), pigmento rojo soluble en agua registrado como aditivo alimentario en el código E162 (Singh y Bharati, 2014), que comprende 75%-95% del total de los pigmentos rojos (Von Elbe *et al.*, 1972). El color rojo de las raíces en la mayoría de los cultivares se debe a que la concentración de betacianinas

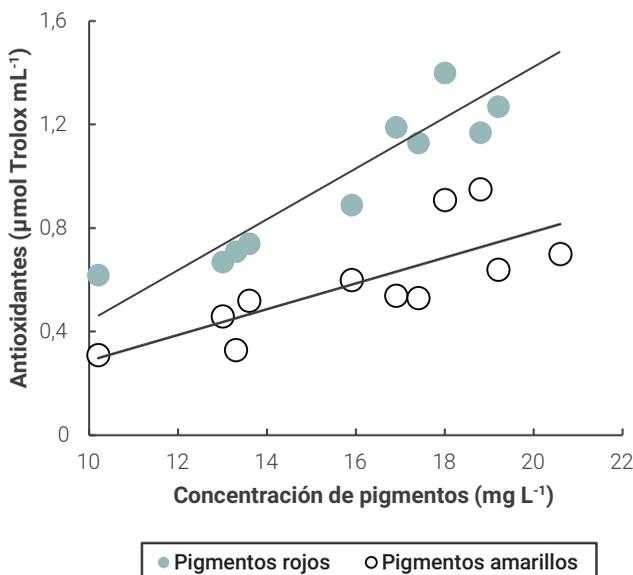


Figura 6. Relación entre la capacidad antioxidante y la concentración de pigmentos rojos y amarillos en once cultivares de remolacha hortícola. La línea cortada representa el ajuste de la siguiente ecuación a los datos experimentales: Contenido de pigmentos rojos = $0,098-0,54$ ($r^2 = 0,879$). Contenido de pigmentos amarillos = $0,050-0,21$ ($r^2 = 0,601$). Adaptado de Czapski *et al.* (2009).

es mayor que la de betaxantinas. En la figura 6 se muestra la correlación entre la concentración de las betalaínas y la capacidad antioxidante de extractos de la raíz de un grupo de 11 cultivares europeos de remolacha analizados por Czapski *et al.* (2009).

La concentración de betalaínas es mucho menor (del orden del 1%) que la de azúcar en la raíz, el cual es un constituyente no deseado en los extractos de colorante. La concentración de pigmentos y la de azúcar se encuentran genéticamente poco correlacionadas. Programas de mejoramiento destinados a la producción de pigmentos han sido exitosos en la obtención de cultivares con mayor concentración de pigmentos, pero no ha sido posible lograr cultivares con baja concentración de azúcares (Goldman y Navazio, 2010). La concentración de pigmentos, que se encuentra por otra parte inversamente correlacionada con el tamaño de la raíz (Wolyn y Gabelman, 1990), es afectada por los factores ambientales durante el crecimiento de la planta, especialmente la luz y la temperatura. En cultivos tardíos (expuestos a mayor radiación y temperatura) se logran mayores concentraciones de pigmentos (Wolyn y Gabelman, 1986). También se encontró que las remolachas cultivadas en el campo presentaban una concentración de betalaína 25% mayor que las cultivadas en invernáculo (Lee *et al.*, 2014), lo que podría atribuirse a diferencias en la radiación incidente en ambas condiciones. Temperaturas altas provocan la formación de anillos concéntricos de color blanco, que disminuyen la calidad de la raíz (Thompson y Kelly, 1959), posiblemente por un desbalance entre el crecimiento y la síntesis de pigmentos. Existe un déficit de información acerca de los efectos del ambiente sobre la concentración de pigmentos.

Las remolachas tienen un aroma y sabor terroso, características dadas por el sesquiterpenoide geosmina. Si bien la concentración de geosmina en la remolacha es baja ($9,7-26,7 \mu\text{g kg}^{-1}$), su bajo umbral para la percepción del olor ($0,01-0,02 \mu\text{g L}^{-1}$) hace que este compuesto tenga un alto impacto en la percepción del aroma y sabor de las raíces (Lu *et al.*, 2003). Dado que la geosmina es sintetizada por microorganismos del suelo, se ha debatido si la presencia del compuesto en las raíces de remolacha, especialmente en los tejidos superficiales, se debe a una absorción desde el suelo, o si la propia raíz es capaz de sintetizarla. Esta última posibilidad fue demostrada por Lu *et al.* (2003) en cultivos realizados en condiciones asépticas. Adicionalmente, la geosmina es un compuesto muy atractivo para el mosquito *Aedes aegypti*, por lo que se ha propuesto elaborar trampas a partir del producto del pelado de las raíces (Melo *et al.*, 2020).

Las remolachas hortícolas contienen cantidades importantes de nitratos (dos Santos Baião *et al.*, 2016) El contenido de nitratos puede ser un atributo de calidad positivo o negativo de acuerdo con el destino del producto. Se encontró que los nitratos de remolacha eran responsables en la reducción de la hipertensión en adultos; sin embargo, las altas dosis de nitratos no son aconsejables en las dietas de los niños (Merreddy *et al.*, 2017). El contenido de nitratos depende de las condiciones ambientales durante el cultivo. Las altas intensidades lumínicas y los días largos tienden a disminuirlos, mientras que los efectos de la temperatura son complejos y dependientes de su interacción con la luz, la humedad del suelo y la disponibilidad de N (Maynard *et al.*, 1976).

Remolacha azucarera

El principal parámetro de calidad de la remolacha azucarera es la concentración de sacarosa en la raíz (Biancardi *et al.*,

2010) junto con una baja concentración de solutos que afectan negativamente la cristalización de sacarosa, entre ellos iones Na^+ , K^+ y aminoácidos (Loel *et al.*, 2014). Existe una fuerte correlación negativa entre el contenido de sacarosa y la suma de solutos no azucarados (Hoffmann, 2010a, b). Aproximadamente el 75% de la MS de las raíces son azúcares, el 20% son componentes insolubles de las paredes celulares, y el 5% restante, componentes solubles (Hoffmann *et al.*, 2005). La sacarosa es el principal azúcar de la remolacha, acompañada de pequeñas cantidades de glucosa y fructosa (Bavec *et al.*, 2010). La sacarosa es almacenada en las vacuolas de las células del parénquima, ubicado entre los anillos de cambium formados tempranamente (Hoffmann, 2010a). Se ha identificado un transportador ubicado en el tonoplasto que intercambia sacarosa con protones (Jung *et al.*, 2015). La acumulación de sacarosa en las células del parénquima es, en parte, regulada por la presión de turgencia celular, que a su vez depende de la rigidez de las paredes de estas células (Wyse *et al.*, 1986; Winzer *et al.*, 1996). El incremento en la concentración de sacarosa logrado por mejoramiento se debe, en parte, a una disminución de la concentración de los componentes de la pared celular asociado a una disminución de su espesor (Hoffmann *et al.*, 2005; Kenter y Hoffmann, 2009). Esta transformación de los carbohidratos estructurales a carbohidratos de almacenamiento puede afectar la estabilidad de la pared celular si se incrementa la acumulación de azúcares y la presión osmótica resultante, por lo que existe un límite fisiológico al incremento en la concentración de azúcares (Hoffmann, 2010b). Los avances logrados tanto en la genética como en las condiciones culturales llevan a plantearse actualmente cuáles son los márgenes remanentes para futuros incrementos en el rendimiento de azúcar de este cultivo (Curcic *et al.*, 2018; Hoffmann y Kenter, 2018). No obstante, parece quedar aún margen para el mejoramiento en este sentido. Gumienna *et al.* (2016) encontraron una importante variación en la concentración de azúcar en el análisis comparativo de 49 híbridos de remolacha. Además de estos avances se han destinado esfuerzos a mejorar la forma de las raíces, transformándolas de cónicas a redondas con el objetivo de facilitar la cosecha y evitar la extracción de suelo durante este proceso (Mesken y Dieleman, 1988; Tsalts y Maslaris, 2010).

El contenido de nitrógeno constituye una particular preocupación en la producción de azúcar. Los principales compuestos nitrogenados en las raíces de remolacha son la betaína y los aminoácidos, comprendiendo cada uno de ellos, aproximadamente un 30% del nitrógeno soluble total (NST) de la raíz (Martínez Arias *et al.*, 2017). En un estudio con 57 genotipos cultivados en 22 ambientes, Hoffmann y Märlander (2005) observaron que la composición del NST, particularmente la glutamina, es más afectada por el ambiente, especialmente por la disponibilidad de nitrógeno, que por el genotipo. Estos resultados concuerdan con los reportados por Pocock *et al.* (1990). La betaína (N, N, N-trimetilglicina) es un compuesto que se acumula en condiciones de salinidad (Hanson y Wyse, 1982) y déficit hídrico (Shaw y Thomas, 2002) produciendo el ajuste osmótico que confiere a las remolachas tolerancia a estos tipos de estrés. Las betaínas han sido consideradas un compuesto indeseable en la remolacha azucarera por afectar negativamente la cristalización de azúcar (Hoffmann y Märlander, 2005). Sin embargo, es actualmente valorizada por sus propiedades nutracéuticas y se han realizado esfuerzos destinados a mejorar su extracción a partir de distintas partes de la planta (Rivoira *et al.*, 2017). Las betaínas están presentes

tanto en los tallos como en las raíces y, a pesar de que la mayor parte de los estudios se refieren a la remolacha azucarera, se encuentra presente en similar o mayor concentración en la remolacha hortícola (Rivoira *et al.*, 2017).

La geosmina en combinación con ácidos grasos volátiles producidos por contaminación con microorganismos del suelo o por la propia planta contribuyen a un aroma terroso del azúcar obtenido a partir de remolacha (Marsili *et al.*, 1994). Este aroma es percibido como un defecto de calidad por paneles de degustación (Urbanus *et al.*, 2014).

La floración puede afectar negativamente la calidad de la remolacha azucarera debido a una disminución en la concentración de azúcares y un aumento en la proporción de MS estructural en las raíces. Más allá de los recientes avances en la comprensión de los mecanismos involucrados en el control de la floración en esta especie (Höft *et al.*, 2018a, b), la sensibilidad a la inducción floral por acumulación de horas de frío limita severamente la posibilidad de siembras otoñales en regiones templado-cálidas.

Remolacha forrajera

La calidad de la remolacha forrajera se asocia fundamentalmente con la concentración de MS en las raíces, la que resulta de muy alta digestibilidad en comparación con otros forrajes (Salama y Zaid, 2017). Existe una correlación inversa entre el contenido de MS de las raíces y su tamaño (Judson *et al.*, 2016). La partición del N de la planta hacia la raíz suele ser mayor que en la remolacha azucarera, ya que al no constituir los compuestos nitrogenados un atributo desfavorable en este caso, no se ha procurado disminuir su concentración en la raíz dentro de los programas de mejoramiento (Laufer *et al.*, 2016).

En cuanto a la morfología, se prefieren aquellas plantas cuyas raíces quedan expuestas en mayor medida por sobre la superficie del suelo de modo de facilitar su consumo por el ganado. Este atributo ha sido abordado en los programas de mejoramiento genético con buenos resultados. Además, la calidad también se encuentra asociada con bajos niveles de ácido oxálico en las hojas, ya que este compuesto le da propiedades descalcificantes y laxantes, para los casos en que la planta es consumida por el ganado *in situ* (Yarza García, 1970).

PERSPECTIVAS FUTURAS Y CONSIDERACIONES FINALES

Es esperable que las remolachas ocupen en un futuro no lejano un lugar relevante en la producción agrícola mundial, incluida América del Sur. Tal como se expone en esta revisión, la especie se adapta favorablemente a vastas zonas de clima templado siendo relativamente poco exigente en requerimientos agroclimáticos y edáficos, con alta productividad basada en su muy alto índice de cosecha, pero también en una elevada eficiencia de uso de la radiación (Katerji *et al.*, 2008) y cuyos usos, en sus diferentes tipos, son múltiples y crecientes debido a que cubren variadas demandas de la población en cuanto a calidad de vida y cuidado del medioambiente. No obstante, para hacer posible la implementación a gran escala de estos cultivos será necesario abordar algunos vacíos en el conocimiento, especialmente en aquellas regiones donde no es un cultivo tradicional.

Muchos de los nuevos usos y aplicaciones corresponden a la remolacha hortícola. Como destacan Babarykin *et al.*

(2019), en la última década hubo un crecimiento explosivo del interés en la remolacha hortícola vinculado a sus propiedades beneficiosas para la salud humana. Sin embargo, la remolacha es aún subproducida y subconsumida a nivel mundial (Meredy et al., 2017). La información ecofisiológica acerca de este tipo de remolacha es muy inferior a la disponible acerca de la remolacha azucarera; los alcances y las limitaciones de la extrapolación de la información disponible entre tipos de remolacha deberán ser cuidadosamente analizados. Asimismo, existe un déficit de información acerca de los efectos ambientales y de prácticas de manejo sobre la concentración de compuestos que constituyen atributos de calidad.

Durante los últimos años se ha puesto el foco sobre la sostenibilidad e impacto ambiental de los cultivos en general. Entre las remolachas, solo la azucarera ha sido objeto de análisis de sostenibilidad de su producción y uso. Se ha concluido que este cultivo es altamente sustentable, habiéndose llegado a este nivel por avances graduales, tanto en el mejoramiento genético como en el manejo agronómico (Stevanato et al., 2019). No obstante, estos autores señalan que queda un importante margen para mejorar la estabilidad del rendimiento, la resistencia a estreses bióticos y abióticos y la adaptabilidad a condiciones subóptimas de manejo. Analizando distintas rotaciones de cultivos, Gotze et al. (2017) reportaron que la inclusión de alfalfa en las rotaciones mejoraba la producción de materia seca y de azúcar, mientras que el monocultivo las reducía. Jaggard et al. (2004) concluyeron que este cultivo consume relativamente baja cantidad de agroquímicos. En un ranking comparativo, la ecotoxicidad por pesticidas de la remolacha azucarera fue de alrededor de un orden de magnitud menor que la de los cultivos de papa, y también menor que las de trigo, cebada, arvejas y colza. Estos autores también calcularon que su contribución al calentamiento global es relativamente baja, ya que su consumo de energía es escaso y se encuentra mayormente relacionado con la necesidad de transporte de los grandes volúmenes de raíces cosechadas a las plantas de procesamiento. Acerca de los efectos sobre el suelo, Gotze et al. (2016a) reportaron que en un ensayo de 41 años de duración donde se evaluaron distintas rotaciones de remolacha azucarera con trigo y maíz no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en cuanto a materia orgánica total o microbiana, aunque el contenido de humus tendió a reducirse con el monocultivo. Tampoco se observaron impactos negativos sobre distintos parámetros relacionados con la estructura del suelo, excepto para la compactación ejercida por el proceso de cosecha, que pudo ser resuelta disminuyendo la carga de las tolvas y reduciendo la presión de los neumáticos (Gotze et al., 2016b). Claramente, existe una necesidad de evaluar la sustentabilidad del cultivo de los otros tipos de remolacha, especialmente de remolacha hortícola cultivada de modo extensivo con fines industriales.

Con el fin de conocer el posible impacto del cambio climático sobre la producción de remolacha, por un lado, se evaluó el efecto de aumentos de la concentración de CO₂ y temperatura sobre el rendimiento de remolacha azucarera, con resultados neutros. Así, en un conjunto de tres años de ensayos, Demmers-Derks et al. (1998) reportaron que mientras la elevación de los niveles de CO₂ a 600 o 700 ppm incrementaba la producción total de materia seca, el incremento en la temperatura (+3 °C respecto de la temperatura ambiente) tendía a disminuirla, siendo estos efectos independientes. Por otra parte, observaron que no hubo cambios significativos en la concentración de azúcar dentro de la materia seca. Jones et

al. (2003) concluyeron que el cambio climático podría promover pequeños incrementos del rendimiento en azúcar en el norte de Europa, pero disminuciones de similar magnitud en regiones centrales, en última instancia resultando en una estabilidad del rendimiento a nivel global.

En este contexto favorable, el cultivo de las remolachas ha ido ganando progresivamente espacio en Sudamérica. En el caso particular de la Argentina, durante el último lustro se han conducido experimentos promisorios con remolacha azucarera (Rivas, 2017) y forrajera (Marinissen, 2017), aunque estos cultivos no se han difundido aún en el país. En cuanto a la remolacha hortícola, solo se cultiva para uso tradicional en los cinturones hortícolas de las grandes ciudades, y prácticamente no se la industrializa, por lo que los pigmentos (betalaínas) empleados en la industria alimentaria deben ser importados (Lecker Argentina S.A., comunicación personal). Para concretar la expansión de estos cultivos en la región es necesario disponer de los conocimientos básicos que permitan evaluar la factibilidad regional para, a partir de ello, generar información local que permita maximizar la producción y la calidad de los productos logrados. El desarrollo de las tecnologías de producción, uso y transformación de las remolachas podrán posicionar a estos cultivos como una alternativa valiosa para el desarrollo de las economías regionales del Cono Sur.

BIBLIOGRAFÍA

- ABAYOMI, Y.A.; WRIGHT, D. 2002. Sugarbeet leaf growth and yield response to soil water deficit. *African Crop Science Journal* 10 (1), 51-66.
- ABDEL-KADER, E.M.A. 2011. Effect of nitrogen fertilizer rates and some growth regulators treatments on sugar beet. *Mansoura Journal of Plant Production* 2, 1693-1702.
- ABDEL-MOTAGALLY, F.M.; ATTIA, K.K. 2009. Response of sugar beet plants to nitrogen and potassium fertilization in sandy calcareous soil. *International Journal of Agriculture and Biology* 11 (6), 695-700.
- AKHTAR, M.J.; JACQUOT, M.; JASNIEWSKI, J.; JACQUOT, C.; IMRAN, M.; JAMSHIDIAN, M.; PARIS C.; DESOBRY, S. 2012. Antioxidant capacity and light-aging study of HPMC films functionalized with natural plant extract. *Carbohydrate Polymers* 89(4), 1150-1158.
- ALONSO, J.M. 1964. Remolacha azucarera. Antecedentes para la República Argentina. Buenos Aires. Argentina. 182 p.
- ASGHARIPOUR, M.R.; MONDANI, F.; RIAHINIA, S. 2012. Energy use efficiency and economic analysis of sugar beet production system in Iran: A case study in Khorasan Razavi province. *Energy* 44 (1), 1078-1084.
- AZEREDO, H.M.C. 2009. Betalains: properties, sources, applications, and stability - a review. *International Journal of Food Science and Technology* 2009 (44), 2365-2376.
- BABARYKIN, D.; SMIRNOVA, G.; PUNDINSH, I.; VASILJEVA, S.; KRUMINA, G.; AGEJCHENKO, V. 2019. Red Beet (*Beta vulgaris*) impact on human health. *Journal of Biosciences and Medicines* 7 (3), 61-79.
- BACH, V.; MIKKELSEN, L.; KIDMOSE, U.; EDELENBOS, M. 2015. Culinary preparation of beetroot (*Beta vulgaris* L.): the impact on sensory quality and appropriateness. *Journal of Science of Food and Agriculture* 95 (9), 1852-1859.
- BAIÃO, D.D.S.; DA SILVA, D.V.T.; PASCHOALIN, V.M.F. 2020. Beetroot, a remarkable vegetable: its nitrate and phytochemical contents can be adjusted in novel formulations to benefit health and support cardiovascular disease therapies. *Antioxidants* 9 (10), 960.
- BARRERA, H.L. 2017. Mecanismos de control hormonal sobre la acumulación de reservas en remolacha (*Beta vulgaris* var. *esculenta*). Tesis Maestría en Producción Vegetal, FCA, UNMP, 64 p.
- BAVEC, M.; TURINEK, M.; GROBELNIK-MLAKAR, S.; SLATNAR, A.; BAVEC, F. 2010. Influence of industrial and alternative farming systems on contents of sugars, organic acids, total phenolic content, and the antioxidant activity of red beet (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* Rote Kugel). *Journal of Agricultural Food Chemistry* 58 (22), 11825-11831.
- BENJAMIN, L.R. 1987. The relative importance of cluster size, sowing depth, time of seedling emergence and between-plant spacing on variation

in plant size in red beet (*Beta vulgaris* L.) crops. The Journal of Agricultural Science 108 (1), 221-230.

BENJAMIN, L.R.; MC GARRY, A.; GRAY D. 1997. The root vegetables: Beet, Carrot, Parsnip and Turnip. En: WIEN, H.C. (Ed.). The physiology of vegetable crops. Cab International, 553-580.

BHULLAR, M.S.; UPPAL S.K.; KAPUR, M.L. 2010. Influence of planting density and nitrogen dose on root and sugar yield of beet (*Beta vulgaris* L.) under sub-tropical semi-arid conditions of Punjab. Journal of Research Punjab Agricultural University 47 (1/2), 14-17.

BIANCARDI, E.; MCGRATH, J.M.; PANELLA, L.W.; LEWELLEN, R.T.; STEVANATO, P. 2010. Sugar beet. En: BRADSHAW, J.E. (Ed.) Root and Tuber Crops. Springer, Nueva York. 173-219 pp.

BIANCARDI, E.; PANELLA, L.W.; LEWELLEN, R.T. 2012. *Beta maritima*. The origin of beets. Springer. 294 p.

BLUNK, S.; DE HEER, M.I.; STURROCK, C.J.; MOONEY, S.J. 2018. Soil seedbed engineering and its impact on germination and establishment in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) as affected by seed-soil contact Seed Science Research Volume 28, Special Issue 3 (Seeds as Systems), 236-244.

BLUNK, S.; MALIK, A.H.; DE HEER, M.I.; EKBLAD, T.; BUSSELL, J.; SPARKES, D.; FREDLUND, K.; STURROCK, C.J.; MOONEY, S.J. 2017. Quantification of seed-soil contact of sugar beet (*Beta vulgaris*) using X-ray computed tomography. Plant Methods Volume 13 (1, 1-14).

BRAR, N.S.; DHILLON, B.S.; SAINI, K.S.; SHARMA, P.K. 2015. Agronomy of sugarbeet cultivation-A review. Agricultural Reviews, 36 (3), 184-197.

BURKART, S.; MANDERSCHIED, R.; WEIGEL, H.J. 2009. Canopy CO₂ exchange of sugar beet under different CO₂ concentrations and nitrogen supply: results from a free-air CO₂ enrichment study. Plant Biology 11 (1), 109-123.

ÇAKMAKÇI, R.; ORAL, E.; KANTAR, F. 1998. Root Yield and Quality of Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) in Relation to Plant Population. Journal of Agronomy and Crop Science, 180, 45-52.

CAMPBELL, L.G.; ENZ, J.W. 1991. Temperature effects on sugarbeet seedling emergence. Journal of Sugar Beet Research 28 (3), 129-140.

CAPRON, I.; CORBINEAU, F.; DACHER, F.; JOB, C. 2000. Sugarbeet seed priming: Effects of priming conditions on germination, solubilization of 11-S globulin and accumulation of LEA proteins. Seed Science Research 10 (3), 243-254.

CHAKWIZIRA, E.; DE RUITER, J.M.; MALEY, S. 2014. Growth, nitrogen partitioning and nutritive value of fodder beet crops grown under different application rates of nitrogen fertiliser. New Zealand Journal of Agricultural Research 57 (2), 75-89.

CHAKWIZIRA, E.; DE RUITER, J.M.; MALEY, S.; DELLOW, S.J.; GEORGE, M.J.; MICHEL, A.J. 2014. Water use efficiency of fodder beet crops Proceedings of the New Zealand Grassland Association 76, 125-134.

CHAKWIZIRA, E.; TEIXEIRA, E.; MEENKEN, E.; MICHEL, A.J.; MALEY, S. 2018. Radiation use efficiency and biomass partitioning to storage roots in fodder beet crops. European Journal of Agronomy 92, 63-71.

CHOLUJ, D.; KARWOWSKA, R.; JASINSKA, M.; HABER, G. 2004. Growth and dry matter partitioning in sugar beet plants (*Beta vulgaris* L.) under moderate drought. Plant Soil and Environment 50 (6), 265-272.

CHOMONTOWSKI, C.; WZOREK, H.; PODLASKI, S.J. 2019. Impact of sugar beet seed priming on seed quality and performance under diversified environmental conditions of germination, emergence and growth. Journal of Plant Growth Regulation 39, 183-189.

COUMANS, M.; COME, D.; GASPAR, T. 1976. Stabilized Dormancy in Sugarbeet Fruits. I. Seed Coats as a Physicochemical Barrier to Oxygen. Botanical Gazette. 137 (3), 274-278.

CRAIG, S. A.S. 2004. Betaine in human nutrition. American Journal of Clinical Nutrition 80 (3), 539-549.

CRUZ, V.M.V.; DIERIG, D.A. 2014. Industrial Crops: Breeding for BioEnergy and Bioproducts. Springer.

CURCIC, Z.; CIRIC, M.; NAGL, N.; TASKI-AJDUKOVIC, K. 2018. Effect of sugar beet genotype, planting and harvesting dates and their interaction on sugar yield. Frontiers in Plant Science 9, 1041.

CZAPSKI, J.; MIKOŁAJCZYK, K.; KACZMAREK, M. 2009. Relationship between antioxidant capacity of red beet juice and contents of its betalain pigments. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences 59 (2), 119-122.

DAIRYNZ. 2020. Fodder beet considerations. (Disponible: <https://www.dairynz.co.nz/feed/crops/fodder-beet/fodder-beet-considerations-verificado>: marzo de 2021).

DAS GUPTA, D.K. 1972. Developmental physiology of sugar beet. Effects of growth substances and differential root and shoot on subsequent growth of sugar beet. Journal of Experimental Botany 23 (1), 103-113.

DE LOS REYES, B.G.; MYERS, S.J.; MCGRATH, J.M. 2003. Differential induction of glyoxylate cycle enzymes by stress as a marker for seedling vigor in sugar beet (*Beta vulgaris*). Molecular Genetics and Genomics 269, 692-698.

DEMERS-DERKS, H.; MITCHELL, R.A.C.; MITCHELL, V.J.; LAWLOR, D.W. 1998. Response of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield and biochemical composition to elevated CO₂ and temperature at two nitrogen applications Plant Cell Environ 21 (8), 829-836.

DI BENEDETTO, A.; TOGNETTI, J. 2016. Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. Revista de Investigaciones Agropecuarias INTA 42 (3), 258-282.

DOS SANTOS BAIÃO, D.; CONTE-JUNIOR, C.A.; FLOSI PASCHOALIN, V.M.; SILVEIRA ALVARES, T. 2016. Quantitative and Comparative Contents of Nitrate and Nitrite in *Beta vulgaris* L. by Reversed-Phase High-Performance Liquid Chromatography-Fluorescence. Food Analytical Methods (9), 1002-1008.

DUAN, X.; BURRIS FILM, J.S. 1997. Coating Impairs Leaching of Germination Inhibitors in Sugar Beet Seed. Crop Science 37 (2), 515-520.

DURAISAMY, R.; SALELGN, K.; BEREKETE, A.K. 2017. Production of Beet Sugar and Bio-ethanol from Sugar beet and it Bagasse: A Review. International Journal of Engineering Trends and Technology 43 (4), 222-233.

FAO. 2012. Irrigation and drainage paper 66. Food and agriculture organization of the united nations, Roma.

FARNIA, A.; HASHEMI, G. 2015. Correlation between yield and other traits in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under application of different biofertilizers and irrigation. International Journal of Biosciences 6 (3), 146-152.

FARZANEHA, S.; KAMKARB, B.; GHADERI-FARB, F.; CHEGINI, V. 2016. Effects of pollinator line characteristics on quantity and quality of monogerm hybrid seed production in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). International Journal of Plant Production 10 (1), 13-28.

FEATHERSTONE, S. 2015. A Complete Course in Canning and Related Processes. Fourteenth Ed. Volume 3. Woodhead Publishing Series in Food Science Technology and Nutrition 282. Elsevier Cambridge, Reino Unido.

FORD, M.A.; THORNE, G.N. 1967. Effect of CO₂ concentration on growth of sugar beet, barley, kale, and maize. Annals of Botany 31 (4), 629-644.

GEIGER, D.R.; SAUNDERS, M.A.; CATALDO, D.A. 1969. Translocation and accumulation of translocate in the sugar beet petiole. Plant Physiology 44 (12), 1657-1665.

GHOULAM, C.; FARES, K. 2001. Effect of salinity on seed germination and early seedling growth of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). Seed Science and Technology 29 (2), 357-364.

GOBIN, A. 2012. Impact of heat and drought stress on arable crop production in Belgium. Natural Hazards and Earth System Sciences 12 (6), 1911-192.

GOH, K.M.; MAGAT, S.S. 1989. Sodium chloride increases the yield of fodder beet (*Beta vulgaris* L.) in two New Zealand soils. New Zealand Journal of Agricultural Research 32: 133-137.

GOLDMAN, I.L.; NAVAZIO, J.P. 2010. History and breeding of table beet in the United States. Plant Breeding Reviews 22, 357-388.

GÖTZE, P.; RÜCKNAGEL, J.; JACOBS, A.; MÄRLÄNDER, B.; KOCH, H.J.; HOLZWEIßIG, B.; STEINZ, M.; CHRISTEN, O. 2016a. Sugar beet rotation effects on soil organic matter and calculated humus balance in Central Germany. European Journal of Agronomy 76, 198-207.

GÖTZE, P.; RÜCKNAGEL, J.; JACOBS, A.; MÄRLÄNDER, B.; KOCH, H.-J.; CHRISTEN, O. 2016b. Environmental impacts of different crop rotations in terms of soil compaction. Journal of Environmental Management 181: 54-63.

GÖTZE, P.; RÜCKNAGEL, J.; WENSCH-DORENDORF, M.; MÄRLÄNDER, B.; CHRISTEN, O. 2017. Crop rotation effects on yield, technological quality and yield stability of sugar beet after 45 trial years. European Journal of Agronomy 82: 50-59.

GREEN, C.F.; VAIDYANATHAN, L.V.; IVINS, J.D. 1986. Growth of sugar beet crops including the influence of synthetic plant growth regulators. The Journal of Agricultural Science 107 (2), 285-297.

GUMIENNA, M.; SZWENGIEL, A.; SZCZEPAŃSKA-ALVAREZ, A.; SZAMBEŁAN, K.; LASIK-KURDYŚ, M.; CZARNECKI, Z.; SITARSKI, A. 2016. The impact of sugar beet varieties and cultivation conditions on ethanol productivity. Biomass and Bioenergy 85, 228-234.

HADIPOUR, E.; TALEGHANI, A.; TAYARANI-NAJARAN, N.; TAYARANI-NAJARAN, Z. 2020. Biological effects of red beetroot and betalains: A review. Phytotherapy Research 34, 1847-1867.

HANSON, A.D.; WYSE, R. 1982. Biosynthesis, Translocation, and Accumulation of Betaine in Sugar Beet and Its Progenitors in Relation to Salinity. Plant Physiology 70, 1191-1198.

- HARDWICK, R. C. 1984. Some Recent Developments in Growth Analysis - A Review, *Annals of Botany* 54 (6), 807-812.
- HARRIS, P.M. 1972. The effect of plant population and irrigation on sugar beet. *The Journal of Agricultural Science* 78 (2), 289-302.
- HARVESON, R.M. 2015. The story of monogerm sugar beet seed. (Disponible: https://www.starherald.com/farm_ranch/the-story-of-monogerm-sugar-beet-seed/article_80061002-06c1-5420-989b-54434222321a.html verificado: marzo de 2021).
- HASSANLI, A.M.; AHMADIRAD, S.; BEECHAM, S. 2010. Evaluation of the influence of irrigation methods and water quality on sugar beet yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management* 97 (2), 357-362.
- HERMANN, K.; MEINHARD, J.; DOBREV, P.; LINKIES, A.; PESEK, B.; HESS, B.; MACHÁCKOVÁ, I.; FISCHER, U.; LEUBNER-METZGER, G. 2007. 1-Amino-cyclopropane-1-carboxylic acid and abscisic acid during the germination of sugar beet (*Beta vulgaris* L.): a comparative study of fruits and seeds. *Journal of Experimental Botany* 58 (11), 3047-60.
- HEYDECKER, W.; CHETRAM, R.S.; HEYDECKER, J.C. 1971. Water relations of beetroot seed germination II: Effects of the ovary cap and of the endogenous inhibitors *Annals of Botany* 35 (139), 31-42.
- HILLS, E.J. 1973. Effects of spacing on sugar beets in 30 inch and 14-26 inch rows. *Journal of the American Society of Sugar Beet Technologists* 17 (4), 300-308.
- HOFFMANN, C.M. 2010a. Sucrose accumulation in sugar beet under drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science* 196 (4), 243-252.
- HOFFMANN, C.M. 2010b. Root quality of sugar beet. *Sugar Technology* 12 (3-4), 276-287.
- HOFFMANN, C.M.; KENTER, C. 2018. Yield potential of sugar beet - Have we hit the ceiling? *Frontiers in Plant Science* 9, 289.
- HOFFMANN, C.M.; KENTER, C.; BLOCH, D. 2005. Marc concentration of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in relation to sucrose storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 85 (3), 459-465.
- HOFFMANN, C.M.; KLUGE-SEVERIN, S. 2010. Light absorption and radiation use efficiency of autumn and spring sown sugar beets. *Field Crops Research* 119 (2-3), 238-244.
- HOFFMANN, C.M.; KLUGE-SEVERIN, S. 2011. Growth analysis of autumn and spring sown sugar beet. *European Journal of Agronomy* 34 (1), 1-9.
- HOFFMANN, C.M.; MÄRLÄNDER, B. 2005. Composition of harmful nitrogen in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) -amino acids, betaine, nitrate- as affected by genotype and environment. *European Journal of Agronomy* 22 (3), 255-265.
- HÖFT, N.; DALLY, N.; HASLER, M.; JUNG, C. 2018. Haplotype variation of flowering time genes of sugar beet and its wild relatives and the impact on life cycle regimes. *Frontiers in Plant Science* 8, 2211.
- HÖFT, N.; DALLY, N.; JUNG, C. 2018a. Sequence variation in the bolting time regulator *BTC1* changes the life cycle regime in sugar beet. *Plant Breeding* 137 (3), 412-422.
- INFANTE POSADA, P.A. 2010. Determinación y efecto del tiempo térmico sobre el comportamiento fisiológico de la remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L. spp. *vulgaris*) en la región del alto chicamocha. (Disertación Doctoral, Universidad Nacional de Colombia). 140 p.
- JAGGARD, K.; TZILIVAKIS, J.; WARNER, D.; LEWIS, K. 2004. Beet and the environment. *British Sugar Beet Review* 72 (2), 32-35.
- JAGGARD, K.W.; QI, A.; MILFORD, G.F.J.; CLARK, C.J.A.; OBER, E.S.; WALTERS, C.; BURKS, E. 2011. Determining the optimal population density of sugarbeet crops. *England International Sugar Journal* 113, 12-17.
- JAGGARD, K.W.; QI, A.; OBER, E.S. 2009. Capture and use of solar radiation, water, and nitrogen by sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Experimental Botany* 60 (7), 1919-1925.
- JAGOSZ, B. 2018. Priming improves germination of monogerm red beet (*Beta vulgaris* L.) clusters. *The Journal of Animal & Plant Sciences* 28 (3), 770-777.
- JAKLI, B.; HAUER-JAKLI, M.; BÖTTCHER, F.; MEYER ZUR MÜDEHORST, J.; SENBAYRAM, M.; DITTERT, K. 2018. Leaf, canopy and agronomic water-use efficiency of field-grown sugar beet in response to potassium fertilization. *Journal of Agronomy and Crop Science* 204 (1), 99-110.
- JONES, P.D.; LISTER, D.H.; JAGGARD, K.W.; PIDGEON, J.D. 2003. Future Climate Impact on the Productivity of Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) in Europe. *Climatic Change* 58: 93-108.
- JUDSON, H.G.; MCKENZIE, S.; ROBINSON, S.; NICHOLLS, A.; MOORHEAD, A.J.E. 2016. Measurement techniques and yield estimates of fodder beet in Canterbury and Southland. *Journal of New Zealand Grasslands* 78, 177-180.
- JUNG, B.; LUDEWIG, F.; SCHULZ, A.; MEINER, G.; WÖSTEFELD, N.; FLÜGGE, U.I.; POMMERENIG, B.; WIRSCHING, P.; SAUER, N.; KOCH, W.; SOMMER, F.; MÜHLHAUS, T.; SCHRODA, M.; CUIN, T.A.; GRAUS, D.; MARTEN, I.; HEDRICH, R.; NEUHAUS, E. 2015. Identification of the transporter responsible for sucrose accumulation in sugar beet taproots. *Nature Plants* 1 (1), 14001-14006.
- KAACK, K. 2016. Raw Materials for Processing of Sour-Sweet Slices of Red Beetroot. *International Journal of Forestry and Horticulture* 2 (3), 19-30.
- KATERJI, N.; MASTRORILLI, V. 2009. The effect of soil texture on the water use efficiency of irrigated crops: Results of a multi-year experiment carried out in the Mediterranean region. *European Journal of Agronomy* 30, 95-100.
- KATERJI, N.; VAN HOORN, J.W.; HAMDY, A.; MASTRORILLI, M.; MOUKARZEL, E. 1997. Osmotic adjustment to sugar beets in response to soil salinity and its influence on stomatal conductance, growth and yield. *Agricultural Water Management* 34 (1), 57-69.
- KATERJI, N.; VAN HOORN, J.W.; MASTRORILLI, M.; HAMDY, A. 2008. Effect of soil texture on water relationship and radiation use efficiency of six cultivated species. En: SORENSEN, M. (Ed.). *Agricultural Water Management Research Trends*. Chapter 8. Nova Science Publishers Inc. 273-289 pp.
- KENTER, C.; HOFFMANN, C.M. 2006. Seasonal patterns of sucrose concentration in relation to other quality parameters of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86 (1), 62-70.
- KENTER, C.; HOFFMANN, C.M. 2009. Changes in the quality of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) during long-term storage under controlled conditions. *International Journal of Food Science and Technology* 44 (5), 910-917.
- KENTER, C.; HOFFMANN, C.M.; MÄRLÄNDER, B. 2006. Effects of weather variables on sugar beet yield development (*Beta vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy* 24 (1), 62-69.
- KHAN, M.I. 2016. Plant Betalains: Safety, antioxidant activity, clinical efficacy, and bioavailability. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 15, 316-330.
- KIRCHHOFF, M.; SVIRSHCHEVSKAYA, A.; HOFFMANN, C.; SCHECHERT, A.; JUNG, C.; KOPISCH OBUCH, F.J. 2012. High degree of genetic variation of winter hardiness in a panel of *Beta vulgaris* L. *Crop Science* 52 (1), 179-188.
- KIYMAZ, S.; ERTEK, A. 2015. Water use and yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under drip irrigation at different water regimes. *Agricultural Water Management* 158, 225-234.
- KNOEMA. 2020. Cantidad (toneladas) de remolacha azucarera. (Disponible: <https://knoema.es/atlas/topics/Agricultura/Produccion%20de%20Cultivos-Cantidad-toneladas/Remolacha-Azucarera> verificado: marzo de 2021).
- KODA, Y.; OHKAWA-TAKAHASHI, K.; KIKUTA, Y. 2001. Stimulation of root thickening and inhibition of bolting by jasmonic acid in beet plants. *Plant Production Science* 4 (2), 131-135.
- KUMAR, S.; BROOKS SU-LING, M. 2018. Use of Red Beet (*Beta vulgaris* L.) for Antimicrobial Applications—a Critical Review. *Food and Bioprocess Technology* 11 (2), 17-42.
- LANGÉ, W.; BRANDENBURG, W.A.; DE BOCK, T.S. 1999. Taxonomy and cytology of beet (*Beta vulgaris* L.). *Botanical Journal of the Linnean Society* 130 (1), 81-96.
- LASA DOLHAGARAY, J.M.; LÓPEZ, A.S. 1977. Factores que influyen en el espigado de la remolacha azucarera *Beta vulgaris* L. *Fundación Juan March, Serie Universitaria* 38. Madrid, España.
- LAUFER, D.; NIELSEN, O.; WILTING, P.; KOCH, H.J.; MÄRLÄNDER, B. 2016. Yield and nitrogen use efficiency of fodder and sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in contrasting environments of northwestern Europe. *European Journal of Agronomy* 73, 124-132.
- LECHNER, J.F.; STONER, G.D. 2019. Red Beetroot and Betalains as Cancer Chemopreventive Agents. *Molecules* 24 (8), 1602.
- LEE, E.J.; AN, D.; NGUYEN, C.T.T.; PATIL, B.S.; KIM, J.; YOO, K.S. 2014. Betalain and betaine composition of greenhouse- or field-produced beet root (*Beta vulgaris* L.) and inhibition of HepG2 cell proliferation. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 62 (6), 1324-1331.
- LEMAIRE, S.; MAUPAS, F.; COURNEDE, P.H.; DE REFFYE, P. 2009. A morphogenetic crop model for sugar beet (*Beta vulgaris* L.). En: CAO, W.; WHITE, J.W.; WANG, E. (Eds.). *Crop Modeling and Decision Support*. Springer, Berlin, Heidelberg, 116-129.
- LIU, L.-S.; FISHMAN, M.L.; HICKS, K.B.; LIU, C.-K. 2005. Biodegradable Composites from Sugar Beet Pulp and Poly (lactic acid) *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53 (23):9017-22.
- LOEL, J.; HOFFMANN, C.M. 2014. Importance of growth stage and weather conditions for the winter hardiness of autumn sown sugar beet. *Field Crops Research* 162, 70-76.

- LOEL, J.; HOFFMANN, C.M. 2015. Relevance of osmotic and frost protecting compounds for the winter hardiness of autumn sown sugar beet. *Journal of Agronomy and Crop Science* 201 (4), 301-311.
- LOEL, J.; KENTER, C.; MÄRLÄNDER, B.; HOFFMANN, C.M. 2014. Assessment of breeding progress in sugar beet by testing old and new varieties under greenhouse and field conditions. *European Journal of Agronomy* 52, 146-156.
- LU, G.; EDWARDS, C.G.; FELLMAN, J.K.; MATTINSON, D.S.; NAVAIZO, J. 2003. Biosynthetic Origin of Geosmin in Red Beets (*Beta vulgaris* L.). *J. Agric. Food Chem.* 51 (4), 1026-1029.
- MAHMOUD, E.A.; HILL, M.J. 1981. Salt tolerance of sugar beet at various temperatures. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 24 (1), 67-71.
- MALNOU, C.S.; JAGGARD, K.W.; SPARKES, D.L. 2006. A canopy approach to nitrogen fertilizer recommendations for the sugar beet crop. *European Journal of Agronomy* 25 (3), 254-263.
- MALNOU, C.S.; JAGGARD, K.W.; SPARKES, D.L. 2008. Nitrogen fertilizer and the efficiency of sugar beet crop in late summer. *European Journal of Agronomy* 28 (1), 47-56.
- MANDERSCHIED, R.; PACHOLSKI, A.; FRÜHAUF, C.; WEIGEL, H.J. 2009. Effects of free air carbon dioxide enrichment and nitrogen supply on growth and yield of winter barley cultivated in a crop rotation. *Field Crops Research* 110 (3), 185-196.
- MANDERSCHIED, R.; PACHOLSKI, A.; WEIGEL, H.J. 2010. Effect of free air carbon dioxide enrichment combined with two nitrogen levels on growth, yield and yield quality of sugar beet: evidence for a sink limitation of beet growth under elevated CO₂. *European Journal of Agronomy* 32 (3), 228-239.
- MARINISSEN, J. 2017. Remolacha forrajera en el valle bonaerense del Río Colorado. (Disponible: <https://inta.gov.ar/noticias/remolacha-forrajera-en-el-valle-bonaerense-del-rio-colorado> verificado: marzo de 2021).
- MARSILI, R.T.; MILLER, N.; KILMER, G.J.; SIMMONS, R.E. 1994. Identification and quantitation of the primary chemicals responsible for the characteristic malodor of beet sugar by purge and trap GC-MS-OD techniques. *Journal of Chromatographic Science* 32: 165-171.
- MARTÍNEZ-ARIAS, R.; MÜLLER, B.U.; SCHECHERT, A. 2017. Near-Infrared Determination of Total Soluble Nitrogen and Betaine. *Sugar Beet. Sugar Technology* 19, 526-531.
- MARTÍNEZ-NOËL, G.; TOGNETTI, J. 2018. Sugar signaling under abiotic stress in plants. En: PARVAIZ, A.; AHANGER, M.A.; SINGH, V.P.; TRIPATHI, D.K.; ALAM, P.J.; ALYEMENI M.N. (Eds.). *Plant Metabolites and Regulation under Environmental Stress*. Elsevier, Academic Press, 397-406.
- MAYNARD, D.N.; BARKER, A.V.; MINOTTI, P.L.; PECK, N.H. 1976. Nitrate Accumulation in Vegetables. En: BRADY, N.C. (Ed.). *Advances in Agronomy*. Academic Press 28, 71-118.
- MCCORMICK, J.I.; GOODGER, R.A.; CHYNOWETH, R.J. 2014. Cardinal temperatures and vernalization requirements for a selection of vegetables for seed production. *Agronomy New Zealand*, 44, 71-83.
- MCGRATH, J.M.; ELAWADY, A.; EL-KHISHIN, D.; NAEGELE, R.P.; CARR, K.M.; DE LOS REYES, B. 2008. Sugar beet germination: Phenotypic selection and molecular profiling to identify genes involved in abiotic stress response. *Acta Horticulturae* 782, 35-49.
- MELE, A. 2019. Water use efficiency and nitrogen use efficiency in drip and deficit drip irrigated sugar beets (*Beta vulgaris*). Master of Science in Plant Science thesis. Jordan College of Agricultural Sciences and Technology California State University, Fresno, EUA.
- MELO, N.; WOLFF, G.H.; COSTA DA-SILVA, A.L.; ARRIBAS, R.; FERNANDEZ TRIANA, M.; GUGGER, M.; RIFFELL, J.A.; DEGENNARO, M.; STENSMYR, M.C. 2020. Geosmin attracts *Aedes aegypti* mosquitoes to oviposition sites. *Current Biology* 30 (1), 127-134.
- MEREDDY, R.; CHAN, A.; FANNING, K.; NIRMAL, N.; SULTANBAWA, Y. 2017. Betalain rich functional extract with reduced salts and nitrate content from red beetroot (*Beta vulgaris* L.) using membrane separation technology. *Food Chemistry* 215, 311-317.
- MESKEN, M.; DIELEMAN, J. 1988. Breeding sugar beets with globe-shaped roots: selection and agronomical performance. *Euphytica* 39, 37-44.
- MILFORD, G.F.; WATSON, D.J. 1971. The effect of nitrogen on the growth and sugar content of sugar beet. *Annals of Botany* 35 (2), 287-300.
- MILFORD, G.F.J. 1973. Growth and development of the storage organ of sugar beet. *Annals of Applied Biology* 75 (3), 427-38.
- MILFORD, G.F.J.; POCOCK, T.O.; JAGGARD, K.W.; BISCOE, P.V.; ARMSTRONG, M.J.; LAST, P.J.; GOODMAN, P.J. 1985. An analysis of leaf growth in sugar beet. iv. The expansion of leaf canopy in relation to temperature and nitrogen. *Annals of Applied Biology* 107 (2), 335-347.
- MILFORD, G.F.J.; POCOCK, T.O.; RILEY, J. 1985. An analysis of leaf growth in sugar beet. *Annals of Applied Biology* 106, 163-172.
- MILFORD, G.F.J.; RILEY, J. 1980. The effects of temperature on leaf growth of sugar-beet varieties. *Annals of Applied Biology* 94 (3), 431-443.
- MILFORD, G.F.J.; TRAVIS, K.Z.; POCOCK, T.O.; JAGGARD, K.W.; DAY, W. 1988. Growth and dry-matter partitioning in sugar beet. *Journal of Agricultural Science* 110 (2), 301-8.
- MIRMIRAN, P.; HOUSHALSADAT, Z.; GAEINI, Z.; BAHADORAN, Z.; AZIZI, F. 2020. Functional properties of beetroot (*Beta vulgaris*) in management of cardio-metabolic diseases. *Nutrition & Metabolism* 17 (1), 1-15.
- MISAN, A.; SAKAČ, M.; MEDIĆ, D.; TADIĆ, V.; MARKOVIĆ, G.; GYURA, J.; PANGAN, E.; IZZO, A.A.; BORRELLI, F.; ŠARIĆ, B.; VAN MILOVANOVIĆ, I.; MILIĆ, N. 2016. Antioxidant and physicochemical properties of hydrogen peroxide-treated sugar beet dietary fibre. *Phytotherapy Research* 30 (5), 855-860.
- MONTI, A.; BRUGNOLI, E.; SCARTAZZA, A.; AMADUCCI, M.T. 2006. The effect of transient and continuous drought on yield, photosynthesis and carbon isotope discrimination in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Experimental Botany* 57 (6), 1253-1262.
- NAIAZI, B.H., 2007. The response of fodderbeet to salinity. Introduction of a nonconventional fodder crop to salt affected fields in Pakistan. PhD Thesis. Vrije Universiteit. 199 p.
- NOTTINGHAM, S. 2004. Beetroot e-book. (Disponible: <http://stephennottingham.co.uk> verificado: marzo de 2021).
- NOURI, H.; AMIN, MSM; RAZAVI, S.J.; ANUAR, A.R. 2009. Precision agriculture concept: distribution pattern of selected soil and crop characteristics influenced by fertigation. *European Journal of Scientific Research* 32 (2), 231-240.
- NUTTER, J.; FERNÁNDEZ, M.V.; JAGUS, R.J.; AGÜERO, M.V. 2020. Revisión bibliográfica sobre alternativas para la revalorización de hojas de remolacha (*Beta vulgaris* L.). *Horticultura Argentina* 39 (100), 249-271.
- OOKAWA, T.; NARUOKA, Y.; SAYAMA, A.; HIRASAWA, T. 2004. Cytokinin effects on Ribulose-1, 5-Bisphosphate Carboxylase/Oxygenase and nitrogen partitioning in rice during ripening. *Crop Science* 44: 2107-2115.
- ORZESZKO-RYWKA, A.; PODLASKI, S. 2003. The effect of sugar beet seed treatments on their vigor. *Plant Soil and Environment* 49 (6), 249-254.
- PAGE, W.J. 1989. Production of poly-p-hydroxybutyrate by *Azotobacter vinelandii* strain UWD during growth on molasses and other complex carbon sources. *Applied Microbiology and Biotechnology* 31, 329-333.
- PAGE, W.J. 1992. Production of polyhydroxyalkanoates by *Azotobacter vinelandii* UWD in beet molasses culture. *FEMS Microbiology Reviews* 103, 149-158.
- PAUL, M.J.; FOYER, C.H. 2001. Sink regulation of photosynthesis. *Journal of Experimental Botany* 52 (360), 1383-1400.
- PELACHO, A.M.; MINGO-CASTEL, A.M. 1991. Jasmonic acid induces tuberization of potato stolons cultured in vitro. *Plant Physiology* 97 (3), 1253-1255.
- PERRY, D.A.; HARRISON, J.G. 1974. Studies on the sensitivity of monogerm sugar beet germination to water. *Annals of Applied Biology* 77: 51-60.
- PESTSOVA, E.; MEINHARD, J.; MENZE, A.; FISCHER, U.; WINDHÖVEL, A.; WESTHOFF, P. 2008. Transcript profiles uncover temporal and stress-induced changes of metabolic pathways in germinating sugar beet seeds. *BMC Plant Biology* 8 (1), 1-21.
- PETEK, M.; ČUSTIĆ, M.H.A.; TOH, N.; SLUNJSKI, S.; ČOGA, L.; PAVLOVIĆ, I.; AR AŽIJA, T.K.; LAZAR EVIĆ, B.; CVETKOVIĆ, S. 2012. Nitrogen and Crude Proteins in Beetroot (*Beta vulgaris* var. *conditiva*) under Different Fertilization Treatments. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici* 40 (2), 215-219.
- PETKEVICIENE, B. 2009. The effects of climate factors on sugar beet early sowing timing. *Agronomy Research* 7, 436-43.
- PEUKERT, M.; DITTBRENNER, A.; MEINHARD, J.; FISCHER, U.; MOCK, H.P. 2016. Metabolic variability of seed material from diverse sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genotypes and of different germination capacities. *Seed Science Research* 26, 57-66.
- PIDGEON, J.D.; OBER, E.S.; QI, A.; CLARK, C.J.; ROYAL, A.; JAGGARD, K.W. 2006. Using multi-environment sugar beet variety trials to screen for drought tolerance. *Field Crops Research* 95 (2-3), 268-279.
- PIDGEON, J.D.; WERKER, A.R.; JAGGARD, K.W.; RICHTER, G.M.; LISTER, D.H.; JONES, P.D. 2001. Climatic impact on the productivity of sugar beet in Europe, 1961-1995. *Agricultural and Forest Meteorology* 109 (1), 27-37.

- POCOCK, T.; MILFORD, G.F.J.; ARMSTRONG, M. 1990. Storage root quality in sugar beet in relation to nitrogen uptake. *Journal of Agricultural Science* 115 (3), 355-362.
- PODLASKI, S.Z.; WZOREK, H.; CHOMONTOWSKI, C.M. 2019. Effects of the physicochemical properties of pellets on the germination of pelleted sugar beet seeds. *International Agrophysics* 33 (2), 175-183.
- POOSTCHI, I.; SCHMEHL, W.R. 1971. Effect of gibberellic acid, several growth retardants and nitrogen levels on yield and quality of sugarbeets. *Journal of the American Society of Sugar Beet Technology* 16 (4), 323-331.
- RACZKÓ, V.; RUBÓCZKI, T.; BORBÉLYNÉ VARGA, M.; TAKÁCSNÉ HÁJOS, M. 2015. The change of the inner content parameters of table beet (*Beta vulgaris* L. ssp. *esculenta* Gurke var. *rubra* L.) as a result of storage. *Acta Agraria* 63.113-119.
- RAMAZAN, C. 2002. Root yield and quality of sugar beet in relation to sowing date, plant population and harvesting date interactions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 26 (3), 133-139.
- RANTAO, G. 2013. Growth, yield and quality response of beet (*Beta vulgaris* L.) to nitrogen. Doctoral dissertation, University of the Free State. 117 p.
- RAVNIKAR, M.; ŽEL, J.; PLAPER, I.; ŠPACAPAN, A. 1993. Jasmonic acid stimulates shoot and bulb formation of garlic in vitro. *Journal of Plant Growth Regulation* 12 (2), 73-77.
- REINOSO, L.; MARTÍNEZ, R.S.; MARGIOTTA, F.A.; MARTÍNEZ, R.M. 2008. Estudios de adaptación de cultivos comerciales de remolacha azucarera (*Beta vulgaris* var. *saccharata*) al valle inferior del Río Negro. Memoria técnica 2013-2015. EEA Valle Inferior. Convenio Provincia de Río Negro - INTA. 165 p.
- REINSDORF, H.E.; KOCH, J.; MÄRLÄNDER, B. 2013. Phenotype related differences in frost tolerance of winter sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Field Crops Research* 151, 27-34.
- RINALDI, M.; HOREMANS, S. 2012. Sugar beet. En: STEDUTO, P.; HSIAO, T.C.; FERERES, E.; RAES, R. (eds.). *Crop yield response to water*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- RINALDI, M.; VONELLA, A.V. 2006. The response of autumn and spring sown sugar beet (*Beta vulgaris* L.) to irrigation in Southern Italy: water and radiation use efficiency. *Field Crops Research* 95 (2-3), 103-114.
- RIVAS, J.C. 2017. Comportamiento de la remolacha azucarera *Beta vulgaris* L. en el sur de la provincia de Buenos Aires. Informe Técnico N.º 55. Estación Experimental Agropecuaria Hilario Ascasubi, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 10 p.
- RIVOIRA, L.; STUDZIŃSKA, S.; SZULTKA-MŁYŃSKA, M.; BRUZZONITI, M.C.; BUSZEWSKI, B. 2017. New approaches for extraction and determination of betaine from *Beta vulgaris* samples by hydrophilic interaction liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 409 (21), 5133-5141.
- ROMANO, A.; SORGONÀ, A.; LUPINI, A.; ARANITI, F.; STEVANATO, P.; CACCIO, G.; ABENAVOLI, M.R. 2013. Morpho-physiological responses of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genotypes to drought stress. *Acta Physiologiae Plantarum* 35 (3), 853-865.
- ROZEMA, J.; CORNELISSE, D.; ZHANG, Y.; LI, H.; BRUNING, B.; KATSCHNIG, D.; BROEKMAN, R.; JI, B.; VAN BODEGOM, P. 2015. Comparing salt tolerance of beet cultivars and their halophytic ancestor: consequences of domestication and breeding programmes. *AoB Plants* 7, plu083.
- SALAMA, H.S.A.; ZEID, M.M. 2017. Fodder Beet (*Beta Vulgaris* L.) yield and quality attributes as affected by sowing date, age at harvest and boron application. *Alexandria Science Exchange Journal* 38, 2-12.
- SCHAMBOW, T.J.; ADJESIWOR, A.T.; LORENT, L.; KNISS, A.R. 2019. Shade avoidance cues reduce *Beta vulgaris* growth. *Weed Science* 67 (3), 311-317.
- SCHIEBER, A.; STINTZING, F.C.; CARLE, R. 2001. By-products of plant food processing as a source of functional compounds - recent developments. *Trends in Food Science & Technology* 12 (11), 401-413.
- SCHNEPEL, K.; HOFFMANN, C.M. 2015. Effect of extending the growing period on yield formation of sugar beet. *Journal of Agronomy and Crop Science* 202 (6), 530-541.
- SCHREIBER, K.; FERGUSON A.C. 1966. Effect of growth regulators on yield and quality of sugar beets. *Journal of the American Society of Sugar Beet Technologists* 14 (1), 67-74.
- SCOTT, R.K.; JAGGARD, K.W.; SYLVESTER-BRADLEY, R. 1994. Resource capture by arable crops. En: MONTEITH, J.L.; SCOTT, R.K.; UNSWORTH, M.H. (Eds.). *Resource capture by crops*. Nottingham University Press. Nottingham, Reino Unido. 279-302.
- SHAW, B.T.H.; THOMAS D.T. 2002. Cooke Responses of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) to drought and nutrient deficiency stress. *Plant Growth Regulation* 37 (1), 77-83.
- SHI, Y.; LOU, K.; LI, C. 2010. Growth and photosynthetic efficiency promotion of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) by endophytic bacteria. *Photosynthesis Research* 105 (1), 5-13.
- SHRESTHA, N.; GEERTS, S.; RAES, D.; HOREMANS, S.; SOENTJENS, S.; MAUPAS, F.; CLOUET, P. 2010. Yield response of sugar beets to water stress under Western European conditions. *Agricultural Water Management* 97 (2), 346-350.
- SINGH, H.B.; BHARATI, K.A. 2014. *Handbook of natural dyes and pigments*, Woodhead Publishing India Pvt. Ltd. Nueva Delhi, India.
- SIRACUSA, V.; ROCCULI, P.; ROMANI, S.; DALLA ROSA, M. 2008. Biodegradable polymers for food packaging: A review. *Trends in Food Science & Technology* 19, 634-643.
- STAGNARI, F.; GALIENI, A.; SPECA, S.; PISANTE, M. 2014. Water stress effects on growth, yield and quality traits of red beet. *Scientia Horticulturae* 165, 13-22.
- STALLKNECHT, G.F.; GILBERTSON, K.M. 2000. Defoliation of sugarbeet: Effect on root yield and quality. *Journal of Sugar Beet Research* 37 (2), 1-9.
- STARKE, P.; HOFFMANN, C.M. 2014a. Yield parameters of Beta beets as a basis to estimate the biogas yield. *Sugar Industries* 139 (3), 169-176.
- STARKE, P.; HOFFMANN, C. 2014b. Dry matter and sugar content as parameters to assess the quality of sugar beet varieties for anaerobic digestion. *Sugar Industry* 139 (4), 232-240.
- STEVANATO, P.; BIAGGI, M.D.; SKARACIS, G.N.; COLOMBO, M.; MANDOLINO, G.; BIANCARDI, E. 2001. The sea beet (*Beta vulgaris* L. ssp. *maritima*) of the Adriatic coast as source of resistance for sugar beet. *Sugar Technology* 3 (3), 77-82.
- STEVANATO, P.; CHIODI, C.; BROCCANELLO, C.; CONCHERI, G.; BIANCARDI, E.; PAVLI, O.; SKARACIS, G. 2019. Sustainability of the sugar beet crop. *Sugar Technology* 21 (5), 703-716.
- STEVENS, W.B.; BLAYLOCK, A.D.; KRALL, J.M.; HOPKINS, B.G.; ELLSWORTH, J.W. 2007. Sugar beet yield and nitrogen use efficiency with preplant broadcast, banded, or point-injected nitrogen application. *Agronomy Journal* 99 (5), 1252-1259.
- STRAUS, S.; BAVEC, F.; TURINEK, M.; SLATNAR, A.; ROZMAN, C.; BAVEC, M. 2012. Nutritional value and economic feasibility of red beetroot (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* Rote Kugel) from different production systems. *African Journal of Agricultural Research* 7, 5653-5660.
- SZOPIŃSKA, A.A.; GAWĘDA, M. 2013. Comparison of yield and quality of red beet roots cultivated using conventional, integrated and organic method. *Journal of Horticultural Research* 21(1), 107-114.
- TANJI, K.K.; KIELEN, N.C. 2002. *Agricultural Drainage Water Management in Arid and Semi-Arid Areas*. FAO Irrigation and drainage paper 61, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- TAYLOR, A.G.; GOFFINET, M.C.; PIKUZ, S.A.; SHELKOVENKO, T.A.; DONOVAN MITCHELL, M.; CHANDLER, K.M.; HAMMER, D.A.; NICOLAS G.; BRADFORD, K.J.; CÔME, D.; PRITCHARD, H.W. 2003. Physico-chemical factors influence beet (*Beta vulgaris* L.) seed germination. The biology of seeds: recent research advances. *Proceedings of the Seventh International Workshop on Seeds, Salamanca, España*. 433-440 pp.
- TEI, F.; SCAIFE, A.; AIKMAN, D.P. 1996. Growth of lettuce, onion, and red beet. 1. Growth analysis, light interception, and radiation use efficiency. *Annals of Botany* 78 (5), 633-643.
- THOMAS, T.H. 1999. Sugar beet. En: SMITH, D.L.; HAMEL, C. (Eds.), *Crop Yield. Physiology and Processes*. Springer Verlag, Berlín, Alemania, 311-332.
- THOMPSON, H.C.; KELLY, W.C. 1959. *Vegetable Crops*. Fifth Edition. McGraw-Hill Book Co. Nueva York, EUA.
- TOGNETTI, J.A.; PONTIS, H.G.; MARTÍNEZ-NOËL, G.M. 2013. Sucrose signaling in plants: a world yet to be explored. *Plant Signaling & Behavior* 8 (3), e23316.
- TOMASZEWSKA, J.; BIELIŃSKI, D.; BINCZARSKI, M.; BERLOWSKA, J.; DZIUGAN, P.; PIOTROWSKI, J.; STANISHEVSKY, A.; WITOŃSKA, I.A. 2018. Products of sugar beet processing as raw materials for chemicals and biodegradable polymers. *RSC Advances* 8, 3161-3177.
- TRIDGE. 2020. Beetroot. Global (HS Code: 070690). Overview of Global Beetroot Market. (Disponible: <https://www.tridge.com/intelligences/beet/production> verificado: marzo de 2021).

- TSIALTAS, J.T.; MASLARIS, N. 2010. Sugar beet root shape and its relation with yield and quality. *Sugar Technology* 12, 47-52.
- TURK, M. 2010. Effects of fertilization on root yield and quality of fodder beet (*Beta vulgaris* var. *crassa* Mansf.). *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 16 (2), 212-219.
- UÇAN, K.; GENCOGLAN, C. 2004. The effect of water deficit on yield and yield components of sugar beet. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 28 (3), 163-172.
- UGRINOVIĆ, K.; KMECL, V.; ĆUSTIĆ, M.H.; ŽNIDARČIČ, D. 2012. Contents of oxalic acid, nitrate and reduced nitrogen in different parts of beetroot (*Beta vulgaris* var. *conditiva* Alef.) at different rates of nitrogen fertilization. *African Journal of Agricultural Research* 7 (20), 3066-3072.
- URBANUS, B.L.; COX, G.O.; EKLUND, E.J.; ICKES, C.M.; SCHMIDT, S.J.; LEE, S.Y. 2014. Sensory differences between beet and cane sugar sources. *Journal of Food Science* 79 (9), S1763-S1768.
- VALENZUELA, B.A.; VALENZUELA, R.; SANHUEZA, J.; MORALES, I.G. 2014. Alimentos funcionales, nutraceuticos y foshu: ¿vamos hacia un nuevo concepto de alimentación? *Revista chilena de nutrición* 41, 198-204.
- VANDENDRIESSCHE, H.; CEULEMANS, R.; FEYEN, J.; IMPENS, I. 1990. Seasonal variations in photosynthetic capacity, growth, leaf development and productivity of sugar beet plants under optimal nitrogen supply. *Photosynthetica* 24 (3), 385-391.
- VASCONCELLOS, J.; CONTE-JUNIOR, C.; SILVA, D.; PIERUCCI, A.P.; PASCHOALIN, V.; ALVARES, T.S. 2016. Comparison of total antioxidant potential, and total phenolic, nitrate, sugar, and organic acid contents in beetroot juice, chips, powder, and cooked beetroot. *Food Science and Biotechnology* 25 (1), 79-84.
- VITAL DOS SANTOS D., PEREIRA, M.F.A. 1989. Restrictions of the tegument to the germination of *Beta vulgaris* L. seeds. *Seed Science Technology* 17 (3), 601-611.
- VON ELBE, J.H.; SY, S.H.; MAING, I.Y.; GABELMAN, W.H. 1972. Quantitative analysis of betacyanins in red beets (*Beta vulgaris*). *Journal of Food Science* 37, 932-934.
- WANG, B.; SHARMA-SHIVAPPA, R.; OLSON, J.W.; ARMAN KHAN, S. 2013. Production of polyhydroxybutyrate (PHB) by *Alcaligenes latus* using sugar-beet juice. *Industrial Crops and Products* 43 (1), 802-811.
- WATARI, M.; IKEURA, H.; TSUGE, K.; MOTOKI, S. 2017. Betalain content of different varieties, growth stages, and parts of beet (*Beta vulgaris* L.). *Horticultural Research* 16 (3), 301-308.
- WERKER, A.R.; JAGGARD, K.W.; ALLISON, M.F. 1999. Modelling partitioning between structure and storage in sugar beet: Effects of drought and soil nitrogen. *Plant and Soil* 207 (1), 97-106.
- WINNER, C. 1993. History of the crop En: COOKE, D.A.; SCOTT, R.K. (Eds.). *The Sugar Beet Crop*, Chapman and Hall, Londres. 1-36 pp.
- WINZER, T.; LOHAUS, G.; HELDT, H.W. 1996. Influence of phloem transport, N-fertilization and ion accumulation on sucrose storage in the taproots of fodder beet and sugar beet. *Journal of Experimental Botany* 47 (7), 863-870.
- WOLYN, D.J.; GABELMAN, W.H. 1986. Effects of planting and harvest date on betalain pigment concentrations in three table beet genotypes. *HortScience* 21(6), 1339-1340.
- WOLYN, D.J.; GABELMAN, W.H. 1990. Selection for Betalain pigment concentrations and total dissolved solids in red table beets. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 115 (1), 165-169.
- WU, J.; CHEN, S.; GE, S.; MIAO, J.; LI, J.; ZHANG, Q. 2013. Preparation, properties and antioxidant activity of an active film from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) skin gelatin incorporated with green tea extract. *Food Hydrocolloid* 32 (1), 42-51.
- WYSE, R.E.; ZAMSKI, E.; TOMOS, A.D. 1986. Turgor regulation of sucrose transport in sugar beet taproot tissue. *Plant Physiology* 81 (2), 478-481.
- YARZA GARCÍA, J.R. 1970. La remolacha forrajera en la alimentación del ganado., *Hojas Divulgadoras* 11 Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. España. 70 p.
- ZHANG, Y.F.; LI, G.L.; WANG, X.F.; SUN, Y.Q.; ZHANG, S.Y. 2017. Transcriptomic profiling of taproot growth and sucrose accumulation in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) at different developmental stages. *PLoS One* 12 (4), e0175454.