

Periodo 06 de marzo al 19 de marzo 2023

RESUMEN DE LAS CONDICIONES DE LA QUINCENA DEL 20 DE FEBRERO AL 05 MARZO 2023

El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) con el apoyo del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar de LAICA (DIECA-LAICA), presenta el boletín agroclimático para caña de azúcar.

En este se incorpora el análisis del tiempo, pronósticos, notas técnicas y recomendaciones con el objetivo de guiar al productor cañero hacia una agricultura climáticamente inteligente.

En la figura 1 se puede observar, a partir de datos preliminares de 104 estaciones meteorológicas, el acumulado quincenal de lluvias sobre el territorio nacional.

Los promedios de lluvia acumulada a nivel diario varían según la región azucarera. Se tuvieron valores acumulados de lluvia diaria entre 0-0.4 mm en la **Región Guanacaste Este**, por su parte **Guanacaste Oeste** registró entre 0-0.6 mm, en la **Región Norte** se reportó entre 0-10.36 mm. La **Región Puntarenas** presentó entre 0-0.4 mm. La **Región Sur** mostró entre 0-0.2 mm, la **Región Turrialba** acumuló lluvias entre 0-8.0mm, mientras la **Región Valle Central** tuvo entre 0-1.6 mm.



Figura 1. Valores acumulados de la precipitación (mm) durante la quincena del 20 de febrero al 05 de marzo del 2023.

PRONÓSTICO PARA LAS REGIONES CAÑERAS DEL 06 DE MARZO AL 12 DE MARZO

De la figura 2 a la figura 8, se muestran los valores diarios pronosticados de las variables lluvia (mm), velocidad del viento (km/h) y temperaturas extremas (°C) para las regiones azucareras. La **Región Norte** mantendrá humedad baja-media; así como viento del Este; además de la tarde cada vez más cálidas entre lunes y miércoles. La **Región Guanacaste (Este y Oeste)** mantendrá humedad baja; viento del Este; y mañanas más frescas entre lunes y jueves. En la **Región Sur** se espera contenido de humedad media-alta por las tardes; además de viento variable (Este-Oeste); con madrugadas más frescas entre lunes y martes. El **Valle Central (Este y Oeste)** tendrá contenido de humedad media-alta principalmente por las tardes; mostrando viento del Este cada vez menos acelerado; con tardes más frescas el fin de semana. Para la **Región Turrialba (Alta y Baja)** se prevé humedad media-alta; además de viento del Este; con tardes cada vez más cálidas de lunes a miércoles y tras un descenso nuevamente se presentará un incremento de jueves a sábado. La **Región Puntarenas** mantendrá humedad media-alta; con viento variable (Este-Oeste), más acelerado en la primera mitad de la semana; con la tarde cada vez más frescas entre lunes y jueves, seguido de tardes cada vez más cálidas.

IMN

www.imn.ac.cr
2222-5616

Avenida 9 y Calle 17
Barrio Aranjuez,
Frente al costado Noroeste del
Hospital Calderón Guardia.
San José, Costa Rica

LAICA

www.laica.co.cr
2284-6000

Avenida 15 y calle 3
Barrio Tournón
San Francisco, Goicoechea
San José, Costa Rica

*“No se prevé afectación por frente frío en la semana.
Sin presencia significativa de polvo Sahariano.”*

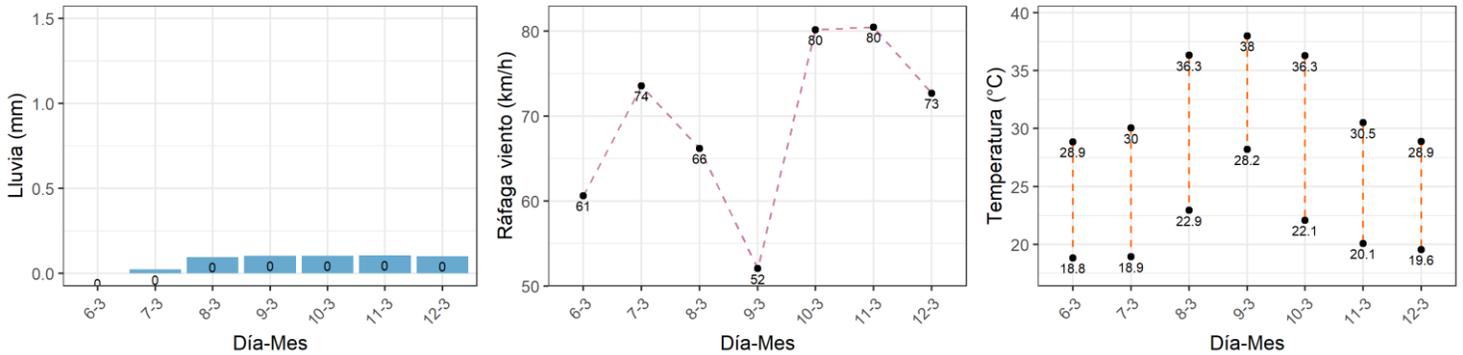


Figura 2. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 06 al 12 de marzo en la región cañera Guanacaste Este.

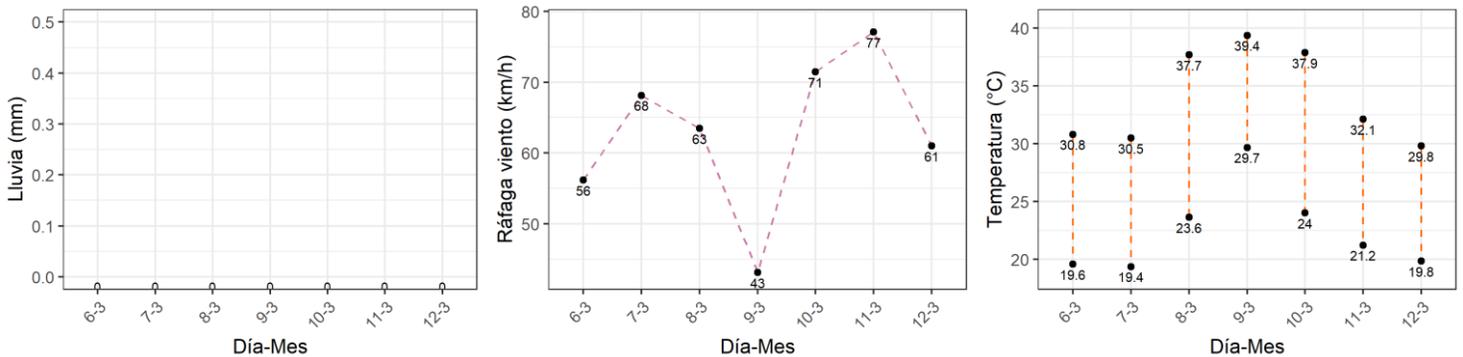


Figura 3 Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 06 al 12 de marzo en la región cañera Guanacaste Oeste.

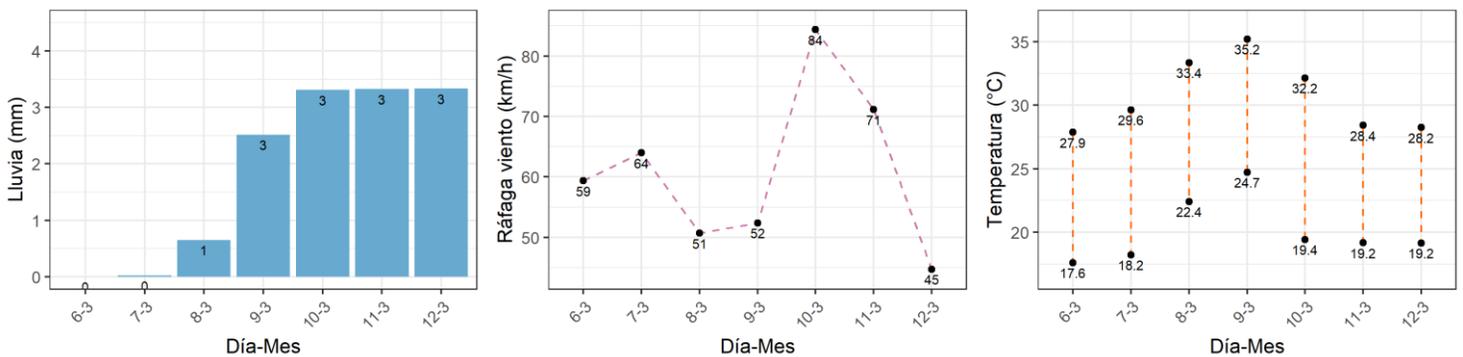


Figura 4. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 06 al 12 de marzo en la región cañera Puntarenas.

Marzo 2023 - Volumen 5 – Número 05

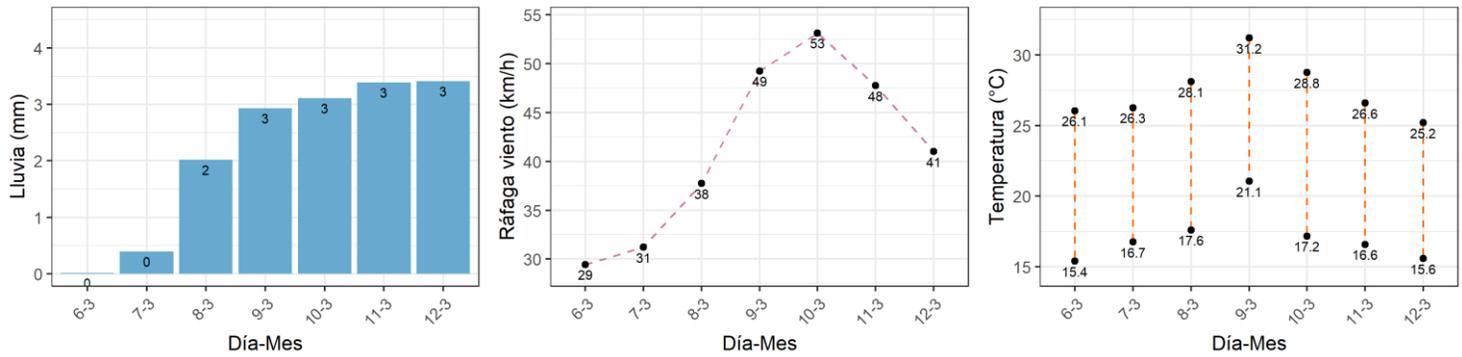


Figura 5. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 06 al 12 de marzo en la región cañera Región Norte.

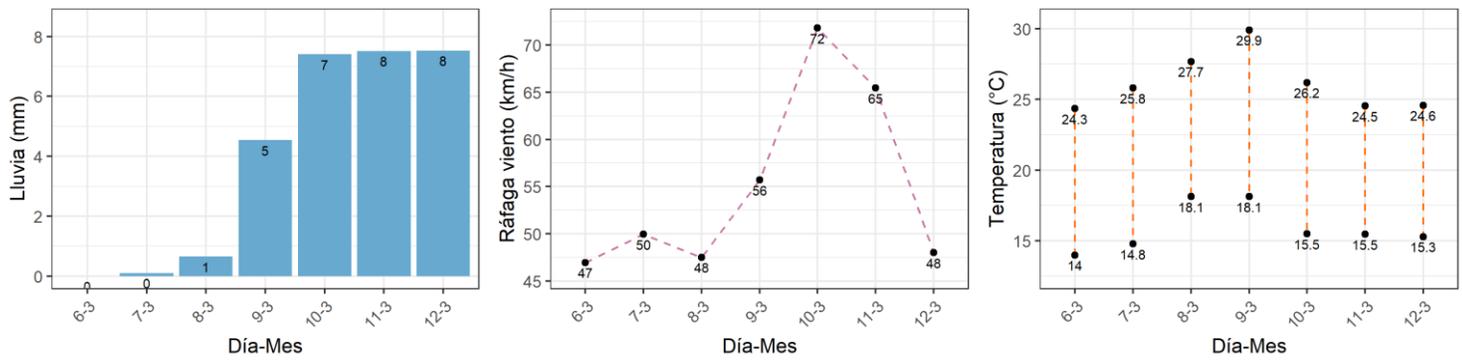


Figura 6. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 06 al 12 de marzo en la región cañera Valle Central (Este y Oeste).

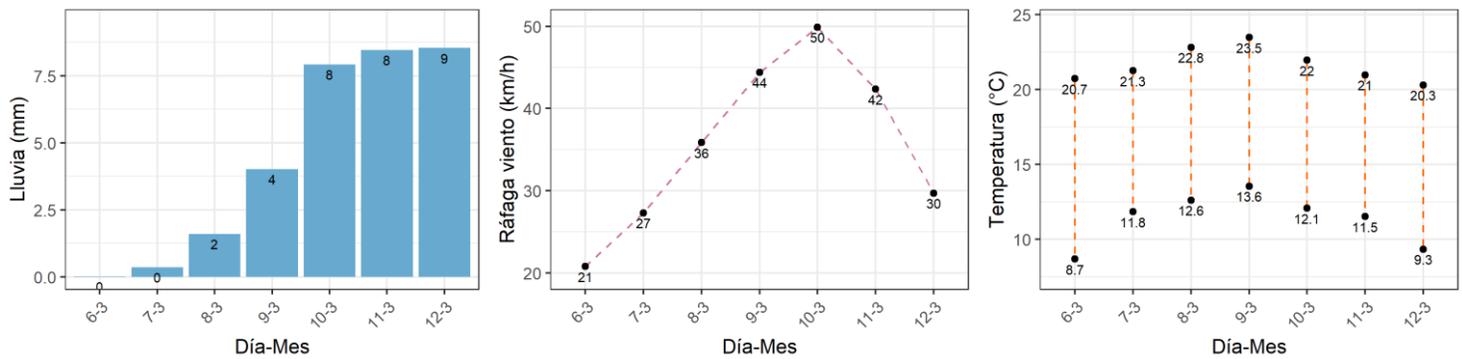


Figura 7. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 06 al 12 de marzo en la región cañera Turrialba (Alta y Baja).

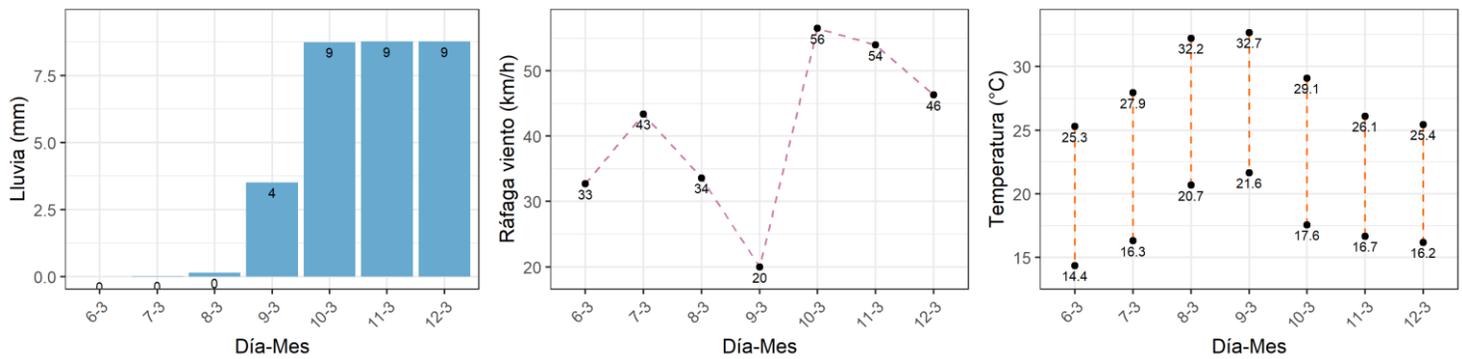


Figura 8. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) del 06 al 12 de marzo en la región cañera Región Sur.

Marzo 2023 - Volumen 5 – Número 05

TENDENCIA PARA EL PERIODO DEL 13 DE MARZO AL 19 DE MARZO

Se incluye un pronóstico diario de lunes a miércoles y una perspectiva de la semana completa para cada región productiva cañera. La **Región Huetar Norte** tendrá humedad media-baja; con viento del Este menos acelerado que la semana previa; así como madrugadas cada vez más frescas entre lunes y miércoles, respecto a la semana previa; en tanto la semana completa condiciones lluviosas normales y viento del Oeste más acelerado de lo normal. La **Región Chorotega (Este y Oeste)** mantendrá humedad media-baja; viento variable (Este-Oeste); con tardes más frescas que la semana previa; en tanto la semana completa evidenciará lluvias normales y viento del Oeste más acelerado de lo normal. En la **Región Sur** evidenciará condiciones de humedad media-alta por las tardes; con viento variable (Este-Oeste); con tardes más frescas que la semana previa entre lunes y miércoles; en tanto la semana completa evidenciará más lluvias de lo normal y viento del Oeste más acelerado. La **Región Valle Central (Este y Oeste)** mostrará humedad alta entre lunes y miércoles; con viento variable (Este-Oeste); con las tardes del martes y miércoles menos cálidas respecto al lunes; en tanto la semana completa presentará condiciones lluviosas normales y viento del Oeste más acelerado de lo normal. La **Región Turrialba (Alta y Baja)** presentará humedad media-baja, viento variable (Este-Oeste); con tardes más cálidas que la semana previa; en tanto la semana completa mantendrá lluvias normales y viento del Oeste más acelerado de lo normal. La **Región Puntarenas** mostrará humedad media-alta; así como viento variable (Este-Oeste) y la tarde del martes como la más fresca entre lunes y miércoles; en tanto la semana completa presentará más lluvia de lo normal y viento del Oeste más acelerado de lo normal.

HUMEDAD DEL SUELO ACTUAL PARA REGIONES CAÑERAS

De acuerdo con Central America Flash Flood Guidance System (CAFFG), el cual estima la humedad en los primeros 30 cm de suelo, durante el periodo del 27 de febrero al 05 de marzo se tuvieron condiciones baja saturación en la mayoría de las regiones cañeras, solamente en las regiones Norte y Turrialba se presentó un porcentaje de humedad mayor.

Como se observa en la figura 09, las regiones Guanacaste Oeste y Guanacaste Este tienen entre 0% y 15% de saturación, pero se puede encontrar zonas con un contenido de humedad un poco mayor. Las regiones Puntarenas y Valle Central Oeste presentan entre 0% y 30%; la Región Valle Central Este está entre 0% y 15%.

La Región Norte tiene entre 0% y 60%, aunque la mayor parte de la región está entre 15% y 30%. Las regiones Turrialba Alta (> 1000 m.s.n.m.) y Turrialba Baja (600-900 m.s.n.m.) presentan entre 15% y 60%. La Región Sur varía entre 0% y 60% de humedad.

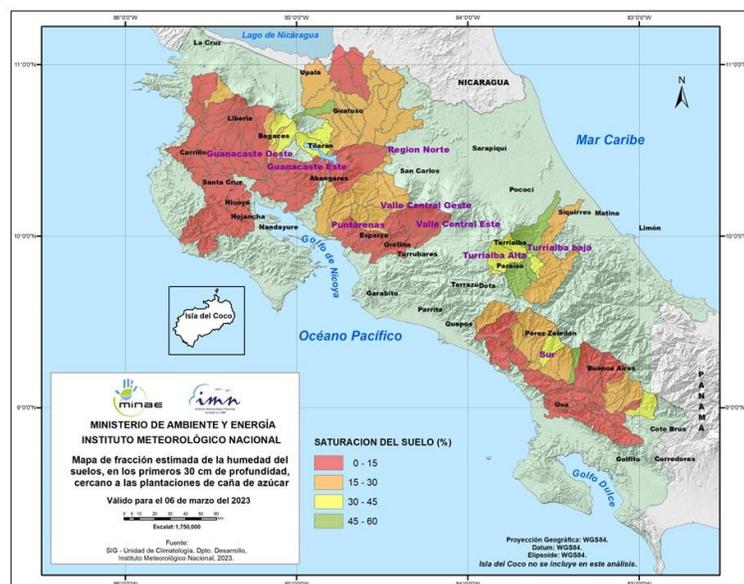


Figura 09. Mapa de fracción estimada de la humedad en porcentaje (%), en los primeros 30 cm de profundidad, cercana a las plantaciones de caña de azúcar, válido para el 06 de marzo de 2023.

LAICA Y EL IMN LE RECOMIENDAN

Mantenerse informado con los avisos emitidos por el IMN en:

- @IMNCR
- Instituto Meteorológico Nacional CR
- www.imn.ac.cr

CRÉDITOS BOLETÍN AGROCLIMÁTICO

Producción y edición del Departamento de Desarrollo

Meteoróloga Karina Hernández Espinoza

Ingeniera Agrónoma Katia Carvajal Tobar

Geógrafa Nury Sanabria Valverde

Geógrafa Marilyn Calvo Méndez

Modelos de tendencia del Departamento de
Meteorología Sinóptica y Aeronáutica

INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL

NOTA TÉCNICA

Sistema fotosintético: motor natural de eficiencia de la caña de azúcar

Ing. Agr. Marco A. Chaves Solera, MSc.

chavessolera@gmail.com

Especialista en el cultivo de la Caña de Azúcar

Por lo general siempre que se habla de agricultura se le reconocen y abonan grandes beneficios a los factores exógenos, elementos tecnológicos y de manejo incorporados a los sistemas de producción y que les aportan, presumiblemente, la capacidad mostrada de superar y mejorar sus índices de productividad y calidad a niveles competitivos. En ese orden se reconocen como factores inductores mejores insumos, semillas, equipos mecánicos, agua, agroquímicos, técnicas de siembra, manejo y cosecha, entre otros. Sin embargo, muy pocas veces se mencionan y reconocen las características, propiedades y atributos naturales que posee el biotipo de planta empleado, para poder admitir, asimilar y potenciar el efecto provocado por esos insumos, sin lo cual, ningún beneficio sería posible.

Con el cultivo de la caña de azúcar pese a constituir sin duda una de las actividades productivas agroindustriales importantes en el mundo comercial y tecnológico, también acontece esta situación tan particular, lo que resulta un tanto paradójico virtud de la cantidad de estudios, textos e investigación científica realizada en el orbe cañero – azucarero. Esta distorsión se ve además alimentada y acrecentada por los grandes intereses comerciales que buscan exponer y posicionar con exclusividad sus productos, como los verdaderos inductores, promotores y gestores de las mejoras logradas por el cultivo; lo cual en la realidad no resulta siempre tan cierto y menos justo desde la perspectiva técnica.

Una valoración objetiva y realista del momento coyuntural y mediático actual de la tecnología agrícola, nos retorna y ubica en una verdadera “Revolución Verde” que fuera promocionada por el connotado científico estadounidense, Norman Borlaug, considerado por algunos como el padre de la agricultura moderna y que transformó la manera de

cosechar y producir (FAO 1996; Romero 2012). Los principios, métodos, objetivos y herramientas empleados en la actualidad son en su dimensión muy similares a su antecesora de los años 40 – 70, con cambios profundos influidos en mucho por el uso intenso de agroquímicos, equipos mecánicos y fertilizantes, solo que ahora disimulados y encubiertos en sofisticadas campañas comerciales que buscan maximizar sus beneficios, pero disimulan y hasta ocultan muchos de sus perjuicios.

Esta circunstancia ocurre muchas veces como se indicó, por influencia comercial con intereses particulares; también por desconocimiento técnico del cultivo y/o desinterés de los involucrados sean productores, técnicos o empresarios, en profundizar sobre elementos propios y particulares de la planta que pueden, bien empleados y orientados, abrir nuevos espacios de mejora que no necesariamente provocan cometer mayores gastos e inversiones sin incurrir en daño e impacto ecológico y ambiental.

Lo anterior motiva, obliga y justifica profundizar y conocer más sobre las excepcionales características genéticas, anatómicas y fisiológicas propias y particulares de la planta de caña de azúcar, con el objeto de contar con mejores elementos para juzgar con propiedad y certeza los factores y posibles efectos positivos (sinérgicos) o negativos (antagónicos) que puedan inducir y favorecer el cambio hacia la ecoeficiencia y la eco-competitividad.

Por tal motivo, se espera con el presente documento abordar y exponer algunas de las capacidades y ventajas naturales que posee la planta de caña de azúcar, como es el disponer de un aparato fotosintético

excepcional, constituido en el verdadero “motor de eficiencia” que posibilita lograr adaptación en condiciones agrestes donde otras plantas no prosperan, mantener resiliencia al impacto de factores incidentes e incrementar significativamente sus niveles de productividad agrícola e industrial sin incurrir en grandes, complejas y onerosas inversiones.

La fotosíntesis como proceso natural

La acepción muy conocida de fotosíntesis significa literalmente “construcción o síntesis por la luz”; sin embargo, en su concepto común y más tradicional se le concibe como el “proceso por medio del cual las plantas sintetizan compuestos orgánicos a partir de materia prima inorgánica en la presencia de agua y luz solar”. Como es sabido, todas las formas de vida conocidas requieren contar con energía para acceder a su crecimiento, desarrollo y manutención.

Las algas, las plantas superiores y algunas bacterias captan esa energía directamente de la radiación solar (autótrofos) y la emplean en la síntesis de los compuestos y alimentos esenciales. Cabe señalar que los animales no pueden usar la luz solar como fuente directa de energía, lo que hacen alimentándose de vegetales y otros animales que consumieron plantas (heterótrofos). No hay duda de que **la fotosíntesis representa indiscutiblemente la fuente primaria de energía metabólica de las plantas**, entre ellas la caña de azúcar.

En todo esto hay un factor común que interviene de manera directa y determinante en los diferentes procesos vinculados con la fotosíntesis, como es la radiación solar, considerado el combustible fundamental del mecanismo metabólico. La radiación solar mediante mecanismos de captura, almacenamiento y descomposición de materiales orgánicos terrestres y acuáticos genera energía, siendo también responsable por la formación del viento, la lluvia, la evapotranspiración y la condición térmica del medio.

El proceso fotosintético consiste genéricamente en su esencia en un proceso de naturaleza química que opera mediante la conversión de dióxido de carbono (CO₂) y agua en carbohidratos y oxígeno (O₂) en tejidos vegetales. Dicha reacción se expresa como sigue:



Por medio de la energía solar los compuestos pobres en energía, como son en este caso el CO₂ y el agua, son convertidos y transformados en compuestos ricos en energía como son los carbohidratos y el O₂. Como información de interés es importante indicar que los niveles energéticos de los diferentes procesos involucrados son expresados en una escala de óxido – reducción (potencial REDOX dado en voltios), mostrando la energía disponible en cada una de esas reacciones.

Mecanismo y factores vinculados

Una planta de amplio y reconocido interés económico, energético y comercial como la caña de azúcar, presenta en su ciclo vegetativo de desarrollo natural diferentes fases, como fue ampliamente expuesto por Chaves (2019a). Dicho ciclo ha sido establecido y concertado en cuatro etapas diferenciadas y sucesivas: 1) desarrollo radical, germinación,

emergencia y brotación de las yemas, 2) formación de macolla e ahijamiento hasta cierre de la plantación, 3) crecimiento acelerado del cultivo y 4) maduración y concentración de sacarosa en los tallos. La literatura ubica en algunos casos el ciclo apenas en tres fases al integrar la 1) y la 2) en una sola.

En lo pragmático y fisiológico, cada una de esas fases requiere disponer y contar con niveles energéticos variables para satisfacer las necesidades metabólicas básicas diferenciadas de los procesos implicados. Al inicio (Fase 1) depende de las reservas naturales que el esqueje – semilla disponga con un crecimiento radical lento; luego con el desarrollo parcial del sistema radicular, la emergencia de las plantas (germinación, brotamiento, amacollamiento, ahijamiento) y el desarrollo de cepa la planta adquiere un rápido crecimiento acompañado por la absorción de agua y nutrimentos del sustrato por medio de la actividad fotosintética. Luego viene una dinámica actividad de producción de biomasa foliar con un activo crecimiento de la planta en cantidad, grosor y tamaño de los tallos (Fases 2 y 3); para avanzar finalmente hacia la floración, reducción de la tasa de crecimiento, disminución en la absorción de agua y nutrimentos especialmente N, concentración y acumulo de sacarosa (energía) en los tallos industrializables (Fase 4). Como se infiere, en toda esa variable pero intensa actividad fisiológica está directamente involucrado el factor energético, y con ella la actividad fotosintética.

Para determinar e identificar con buena certeza los posibles factores vinculados e involucrados en esas actividades, es necesario e imperativo desagregar los mismos en: a) externos y b) internos de la propia planta. Considera Lucchesi (1987) al respecto, que “A través de la Fenología (estudio de los fenómenos periódicos de vida en relación con las condiciones ambientales), se puede observar que el crecimiento y el desarrollo de un organismo son resultantes de la acción conjunta de tres niveles de control: intra, inter y extracelulares.”

Entre los factores de control Intra celulares el autor menciona los vínculos con el componente genético y propiamente con la información génica que gobierna la productividad de la especie vegetal, identificando factores responsables de intervenir los principales mecanismos bioquímicos, como son: a) fotosíntesis (aumentando su eficiencia), b) fijación biológica del nitrógeno (investigando nuevos organismos y aumentando su eficiencia en leguminosas), c) energía (conversión de residuos celulósicos en azúcares fermentables), d) desnitrificación (mejorando la fertilidad del suelo y la calidad del agua) y e) estrés fisiológico (tolerancia a sales, sequía y frío).

El tópic establece y dirige su abordaje al incremento de la biomasa por medio de su Índice de Área Foliar (IAF), como mecanismo para aumentar gradualmente la capacidad del vegetal para aprovechar la energía solar disponible, reconociendo a su vez, las limitantes que puedan surgir por un incremento desmedido del IAF inductor de auto sombreado en la sección inferior del vegetal. Expresa que la interceptación de luz de una superficie está influenciada por el tamaño, forma, ángulo de inserción y orientación azimutal, separación vertical y arreglo horizontal; como también por la capacidad de absorción de las estructuras foliares. Sobre este tema, Chaves (2021b) hizo algunos aportes que permiten conocer con algún detalle el caso particular de la caña de azúcar. Debe

Marzo 2023 - Volumen 5 – Número 05

considerarse que los órganos fotosintéticos corresponden principalmente a la sección foliar (hojas), pero también a sépalos, pétalos, tallos y frutos tiernos que realizan este proceso fisiológico dentro de sus cloroplastos con alguna especialización funcional. Se sugiere y recomienda para lograr efficientizar este importante factor proceder con el mejoramiento genético y la generación de los denominados “cultivares mejorados”.

El factor de control intercelular u hormonal va referido por su parte a las múltiples correlaciones y vínculos que existen y se establecen entre células, tejidos y órganos del vegetal; esto por cuanto el crecimiento y el desarrollo vegetal son regulados por la interacción entre elementos ambientales, las sustancias químicas que hacen parte de la propia constitución de las células, y las hormonas que, en pequeñas concentraciones actúan como catalizadores y activadores de éstas. Entre los principales grupos de hormonas vegetales conocidas que operan en estos procesos se tienen las auxinas, giberelinas, citoquininas, el etileno y los inhibidores; además de los denominados co-factores como proteínas, carbohidratos, vitaminas y otros compuestos que también participan en interacción con esta acción en los procesos fisiológicos.

Como es conocido, la acción hormonal es fuertemente intervenida y afectada por los elementos del clima, en particular la radiación solar y la temperatura, los cuales alteran y modifican muchos de los procesos fisiológicos en el vegetal.

En lo relativo al factor de control extracelular o ambiental mucho puede comentarse, pues el mecanismo opera a través de fuerzas que pueden afectar la morfología, el crecimiento y la fase reproductiva del vegetal. Entre dichos factores se tiene como los más conocidos del medio físico, los:

- Climáticos: altitud (msnm), latitud, nubosidad, gases atmosféricos, viento, agua, temperatura y energía radiante.
- Edáficos: posición geográfica, topografía y material parental de origen del suelo, los cuales pueden influenciar sus propiedades físicas (textura, estructura, profundidad, pedregosidad, permeabilidad) y las propiedades químicas (acidez, fertilidad, salinidad y contenido de materia orgánica).
- Biológicos: se refiere a los organismos que pueden afectar al vegetal como son microorganismos, plagas, patógenos, malezas, nemátodos y el propio hombre.

Como se infiere de lo señalado, son sin lugar a duda los factores biológicos los que pueden ser más fácilmente intervenidos y controlados mediante planes y programas acordes con las necesidades del lugar, la plantación, la condición del medio y el entorno productivo.

Aparato fotosintético

Por aparato fotosintético se conoce aquella sección de la planta, particularmente la foliar, que contiene los elementos y estructuras suficientes y necesarias para absorber la luz y conducir las moléculas del pigmento una vez excitadas por reacciones químicas y enzimáticas. Como está demostrado, las clorofilas contenidas en los plastidios celulares de las algas verdes y plantas superiores conocidos como

cloroplastos, son los pigmentos responsables de la captación de la luz. Los cloroplastos son los organelos encargados de llevar a cabo la fotosíntesis en las plantas superiores. La cantidad de cloroplastos por célula viva en vegetales superiores es muy variable, pues dependiendo del tipo de planta y de las condiciones de crecimiento puede ser de uno a más de cien.

En principio los cloroplastos están constituidos de dos membranas, una interna y otra externa, la grana, los tilacoides (membranas contenidas en el estroma), ADN, ribosomas (estructuras donde se producen proteínas a partir de la información genética) y una sección interior líquida semifluida e incolora conocida como estroma. A lo interno, un cloroplasto se compone de un sistema de lamelas que es una red compleja de discos interconectados entre sí, dónde en algunas áreas verdes densas se disponen en pilas de discos denominados tilacoides que se asemejan a montones de monedas dentro de las paredes de los cloroplastos, y actúan atrapando la energía de la luz solar. Las pilas de tilacoides se llaman grana (Figura 1). Como se infiere los cloroplastos contienen su propio ADN, en el cual se encuentran los genes codificados necesarios para operar su funcionamiento.

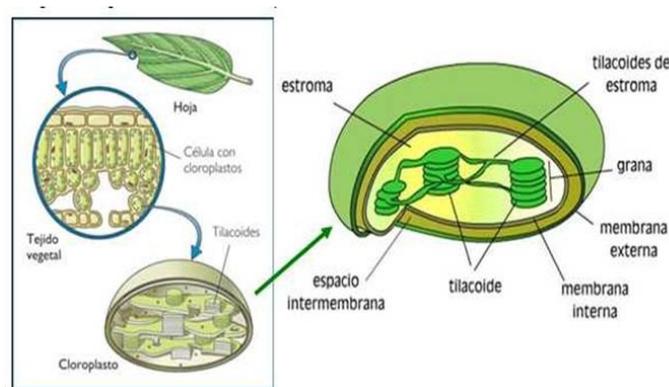


Figura 1. Estructura interna de una hoja y un cloroplasto (Fuente: <https://slideplayer.es/slide/8769228/>)

Se debe considerar que en todo este proceso la energía solar se encuentra presente en la naturaleza en un amplio espectro electromagnético con diferentes longitudes de onda, y que los cloroplastos la absorben por medio de sus pigmentos. Ese espectro de acción donde se establece la eficacia relativa de las radiaciones de las diferentes longitudes de onda para inducir fotosíntesis, debe mantener un estrecho vínculo y relación con la absorción relativa con el espectro de absorción de la luz de diferentes longitudes de onda, en las estructuras fotosintéticas de la planta. Efectivamente, existe una estrecha correlación entre el espectro de acción y el espectro de absorción de la luz solar. Ambos muestran un máximo a 440 nm en la región del azul y a 680 nm en la región del rojo y, por el contrario, baja eficacia de absorción y de fotosíntesis con longitudes de onda entre 500 y 600 nm. La mayor parte de la radiación que llega a la superficie terrestre se ubica entre 300 y 900 nm. Las plantas superiores aprovechan de forma conveniente la radiación entre 400 y 700 nm.

Marzo 2023 - Volumen 5 – Número 05

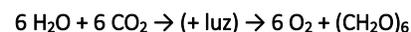
Los pigmentos participantes de la acción fotosintética en las plantas superiores son compuestos capaces de absorber luz en distintas zonas del espectro visible, excepto del verde. Las clorofilas (a y b) y el resto de los componentes necesarios para obtener energía a partir de la luz solar, se encuentran insertados en la membrana de la grana. La clorofila en su caso absorbe intensamente los espectros de luz violeta, azul y roja, pero refleja la verde dando esa coloración a las hojas, lo cual permite entender por qué las hojas de las plantas son verdes, ya que la luz que no absorben es precisamente la luz verde. Los carotenoides por su parte absorben la luz verde y azul y aparecen en coloraciones amarillo y anaranjado, por ejemplo, el carotenoide verde – caroteno produce el color anaranjado de algunos vegetales como la zanahoria.

La clorofila y otras moléculas de las membranas de los tilacoides captan la energía solar convirtiendo parte en energía química, la cual almacenan en moléculas de alta energía (ATP y NADPH), a partir de lo cual se genera y libera oxígeno (O₂) al medio. Es así como durante la fotosíntesis se da un proceso de transporte de electrones a lo largo de la membrana de la grana, que culminan con la formación de ATP y NADPH; moléculas portadoras de energía necesaria para accionar las reacciones químicas del Ciclo de Calvin, en el cual se sintetiza con la participación de las enzimas del estroma glucosa y otras moléculas orgánicas a partir de CO₂. En plantas superiores y otros eucariotas (poseen núcleo bien definido) la fotosíntesis ocurre en los cloroplastos; la cual se divide en procesos dependientes de la luz. En el Ciclo de Calvin-Benson ocurre la fijación del CO₂ (Ciclo del Carbono) y la síntesis de glucosa como producto fotosintético.

Como apuntara De las Rivas (2000) “La fotosíntesis es un proceso biológico complejo en el que pueden distinguirse dos fases bien diferenciadas: una primera de absorción y conversión de la energía, y otra de toma y asimilación biológica de los elementos constitutivos de la materia orgánica (C, H, O, N, S, etc.). La energía luminosa es absorbida por biomoléculas fotosensibles y transformada en una forma de energía bioquímica estable. Los elementos constitutivos se toman de fuentes minerales inorgánicas (agua, H₂O; CO₂; nitratos, NO₃; sulfatos, SO₄²⁻, etc.) y se incorporan a biomoléculas orgánicas metabolizables. Ambas fases, la toma de energía y la toma de elementos, están perfectamente coordinadas e interrelacionadas. Tradicionalmente, estas fases se han denominado fase luminosa y fase oscura.” Agrega el mismo autor, que “La primera fase es un proceso de conversión de energía luminosa en energía electroquímica. Se inicia con la absorción de la luz por ciertos complejos pigmento..... continúa con la canalización de la energía de los fotones hacia los centros de reacción de los fotosistemas, donde la energía se transforma en una corriente de electrones y protones entre moléculas oxidorreductoras. Las reacciones de oxidorreducción producen, en último término, dos biomoléculas estables (NADPH y ATP) que se van acumulando. Estas biomoléculas son útiles como fuente de «energía asimiladora», ya que proporcionan poder de reducción (el NADPH) y poder de enlace (el ATP), necesarios para la siguiente fase.

En la segunda fase de la fotosíntesis se produce toda una serie de reacciones de asimilación de elementos necesarios para la construcción biomolecular: C, H, O, N, S, etc. El elemento esencial y predominante en la materia orgánica es el carbono. En la fotosíntesis, el carbono se toma del dióxido de carbono (CO₂) del aire.”

En este caso, los monosacáridos glucosa y fructosa, el disacárido sacarosa o el polisacárido almidón son algunos de los azúcares producto de la fotosíntesis más frecuentes. El caso más sencillo de síntesis de un monosacárido puede expresarse mediante la siguiente ecuación:



Sistemas fotosintéticos

El carbono es un componente esencial de todos los seres vivos. Esta presente mayoritariamente como dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, los océanos y los combustibles fósiles (carbón, petróleo y otros hidrocarburos). El dióxido de carbono en la atmósfera es absorbido por las plantas y convertido en carbohidratos y tejidos a través de la fotosíntesis, como parte del denominado Ciclo del Carbono. El proceso de asimilación del CO₂ presenta variaciones que se vinculan con el abastecimiento de CO₂ en el entorno.

La fotosíntesis es un proceso muy especial distintivo del reino vegetal, que en buena parte determina los rasgos característicos de la estructura y la fisiología de las plantas. El tipo de fotosíntesis que realizan los vegetales se caracteriza por la formación de oxígeno (O₂) como subproducto que se desprende a la atmósfera. La fotosíntesis de todas las plantas requiere de dióxido de carbono (CO₂), agua (H₂O) y luz; y se lleva a cabo en dos etapas: (1) la fase luminosa en donde participan la luz y el agua para la formación de dos compuestos energéticos necesarios para la formación de carbohidratos para la planta, y (2) la fase oscura

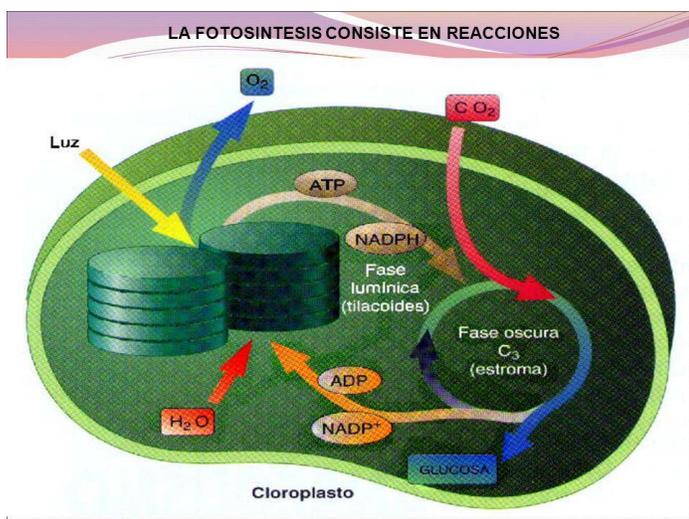


Figura 2. Reacciones a lo interno del cloroplasto (Fuente: <https://slideplayer.es/slide/8769228/>)

La conversión de energía lumínica y las reacciones asociadas con el transporte de electrones de la fotosíntesis ocurre en la lamelas del cloroplasto. En las membranas de los tilacoides es donde se encuentran los fotosistemas (I que genera NADPH y II que genera adenosín trifosfato o ATP) y ocurre la intensa actividad metabólica asociada con ellos.

donde se absorbe, fija y asimila el CO₂ atmosférico y obtienen los productos fotosintéticos finales. El proceso gira como se indicó alrededor del CO₂.

Cuadro 1. Géneros y especies vegetales (62) según tipo de metabolismo fotosintético implicado en la asimilación del dióxido de carbono.

| Metabolismo | Planta | Nombre científico |
|-------------|-----------------------------|--|
| C3 | Aguacate | <i>Persea americana</i> |
| | Alfalfa | <i>Medicago sativa</i> |
| | Algodón | <i>Gossypium hirsutum</i> |
| | Arroz | <i>Oryza sativa</i> |
| | Arboles | Varios |
| | Avena | <i>Avena sativa</i> |
| | Cacao | <i>Theobroma cacao</i> |
| | Café | <i>Coffea spp</i> |
| | Cebada | <i>Hordeum vulgare</i> |
| | Centeno | <i>Secale cereale</i> |
| | Cereza | <i>Prunus avium</i> |
| | Ciruela | <i>Prunus domestica</i> |
| | Chile, Pimiento | <i>Capsicum annum</i> |
| | Diente de León | <i>Taraxacum officinale</i> |
| | Durazno | <i>Prunus persica</i> |
| | Espárrago | <i>Asparagus officinalis</i> |
| | Eucalipto | <i>Eucalyptus spp</i> |
| | Frijol | <i>Phaseolus vulgaris</i> |
| | Frutales | Varios |
| | Girasol | <i>Helianthus annuus</i> |
| | Guayaba | <i>Psidium guajava</i> |
| | Leguminosas | Varias |
| | Limón | <i>Citrus limon</i> |
| | Mandarina | <i>Citrus reticulata</i> |
| | Mango | <i>Mangifera indica</i> |
| | Maní | <i>Arachis hypogaea</i> |
| | Manzana | <i>Malus domestica</i> |
| | Naranja | <i>Citrus x sinensis</i> |
| | Palma Aceitera | <i>Elaeis guineensis</i> |
| | Papa | <i>Solanum tuberosum</i> |
| | Pera | <i>Pyrus communis</i> |
| | Plátano | <i>Musa spp</i> |
| | Sandía | <i>Citrullus lanatus</i> |
| Soya | <i>Glycine max</i> | |
| Toronja | <i>Citrus x paradisi</i> | |
| Trigo | <i>Triticum spp</i> | |
| Tomate | <i>Solanum lycopersicum</i> | |
| Uva | <i>Vitis vinifera</i> | |
| Yuca | <i>Manihot esculenta</i> | |
| C4 | Amaranto | <i>Amaranthus spp</i> |
| | Caña de azúcar | <i>Saccharum officinarum</i> |
| | Coníferas | Varias |
| | Coyolillo | <i>Cyperus rotundus</i> |
| | Eriantus | <i>Erianthus arundinaceus</i> |
| | Maíz | <i>Zea mays</i> |
| | Mijo, Miyo | <i>Panicum spp</i> |
| | Miscantus | <i>Miscanthus spp</i> |
| | Pastos | <i>Andropogom, Brachiaria, Cenchrus, Chloris, Echinochloa, Eleusine, Panicum, Paspalum, Pennisetum, Setaria, etc.</i> |
| | Pasto llorón | <i>Eragrostis curvula</i> |
| | Pata de gallo | <i>Digitaria sanguinalis</i> |
| | Remolacha | <i>Beta vulgaris</i> |
| | Sorgo | <i>Sorghum spp</i> |
| | Verdolaga | <i>Portulaca oleracea</i> |
| | Zacate bermuda | <i>Cynodon dactylon</i> |
| | CAM | Cactus |
| Escarchada | | <i>Mesembryanthemum crystallinum</i> |
| Nopal | | <i>Opuntia ficus-indica</i> |
| Orquídeas | | <i>Orchidaceae spp</i> |
| Piña | | <i>Ananas comosus</i> |
| Sábila | | <i>Aloe vera</i> |
| Suculentas | | <i>Agaváceas, Amaryllidaceae, Apocináceas, Cactáceas, Crasuláceas, Cucurbitaceae, Euphorbiaceae, Geraniaceae, Lamiaceae, Portulacaceae, etc.</i> |
| Vainilla | | <i>Vanilla planifolia</i> |

Fuente: Elaborado por el autor con información diversa.

Dependiendo del tipo y características del mecanismo de fijación del CO₂, las plantas muestran metabolismos distintos, lo que ha llevado a clasificarlas en plantas: C3, C4 y las denominadas CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*). Entre ellas, tanto la eficiencia en el uso de los recursos como la luz, el agua y la tasa de fijación de CO₂ atmosférico es diferente, lo que provoca grados de resiliencia y adaptación variables a las condiciones ecofisiológicas donde se desarrollan. Esa condición anatómico – fisiológica resulta también muy importante y determinante para fines de productividad agrícola e industrial.

La cantidad y diversidad de plantas ubicada de acuerdo con esa clasificación es muy amplia y mayoritaria para el tipo de las C3 que predomina, como se infiere del contenido del Cuadro 1, comprobando a su vez que la caña de azúcar clasifica entre las de tipo C4.

Mecanismos de fijación del CO₂ atmosférico

De acuerdo con el mecanismo de fijación del carbono las plantas superiores se clasifican en C3, C4 y plantas con el Metabolismo Ácido de las Crasuláceas como CAM. La asimilación del CO₂ por un vegetal es un proceso cíclico. En función del proceso metabólico empleado las plantas pueden clasificarse como se anotó en el Cuadro 1, en tres grandes grupos dependiendo del proceso o vía fotosintética que emplean para fijar el CO₂ captado y asimilado de la atmósfera, como son:

- Ciclo de Calvin – Benson en plantas tipo C3
- Ciclo de Hatch Slack en plantas C4
- Metabolismo Ácido de las Crasuláceas o CAM
- Plantas intermedias C3 – C4

Describir, caracterizar y explicar en lo específico cada vía o mecanismo de fijación del carbono atmosférico en la planta resulta complejo virtud del contenido anatómico, bioquímico, biofísico y fisiológico implicados; sin embargo, seguidamente se presenta una sinopsis de los elementos más importantes que los caracterizan y que se resumen en el Cuadro 2. La capacidad y resiliencia que tenga una planta para adaptarse a los distintos ecosistemas y ambientes en los que crecen y evolucionan, y aprovechar sus potenciales naturales, le provee la capacidad de producir en grados comerciales competitivos.

La asimilación del CO₂ atmosférico ocurre a través de las reacciones asociadas con el Ciclo de Calvin – Benson, que es común a todos los organismos fotosintéticos, lo que es importante tener presente. Sin embargo, existen importantes variantes al mecanismo molecular básico de fijación y asimilación del CO₂ que están estrechamente relacionadas y asociadas, con los procesos de adaptación a condiciones disímiles y muy heterogéneas de cultivo. Esas variaciones pueden manifestarse por medio de modificaciones en la anatomía y estructura foliar, también a nivel de cloroplastos de esas especies.

La literatura existente en torno al tema fotosintético es muy vasta y variada en sus enfoques, como lo demuestran los aportes de Dillewijn (1952), Levitt (1972), Alexander (1973), Nasyrov (1978), Hall y Rao (1980), Larcher (1986), Lucchesi (1987), Magalhães (1987), Machado (1987), Rodrigues (1997), Medrano (2000), De las Rivas (2000),

Villalobos (2001), Sage *et al* (2014), SUGARCANE (2014), Castro (2016) y Chaves (2020d, 2022b).

Cuadro 2. Características diferenciales de las diferentes vías de asimilación del carbono.

| Vía | C3 | C4 | CAM |
|--|--|--|---|
| Estructura de la hoja | Mesófilo laminar, vainas parenquimáticas en los haces vasculares | Mesófilo dispuesto radialmente en torno a las vainas clorocromáticas del haz | Mesófilo laminar, vacuólo grande |
| Cloroplastos | Granal | En mesófilo: granal; en las células de la vaina del haz: granal o agranal | Granal |
| Proporción clorofila foliar a/b | Cerca de 3:1 (2,8 ± 0,4) | Cerca de 4:1 (3,9 ± 0,6) | ≤ 3:1 (2,5 ± 3,0) |
| Enzima responsable de la carboxilación inicial | Rubisco | Fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEP) | Ambas: Rubisco y PEP |
| Anatomía | Normal | Kranz | Suculenta |
| Tasa de fotosíntesis | Media | Alta | Baja |
| Inhibición de la fotosíntesis por el oxígeno | Si | No | Si durante el día, no durante la noche (caso de la fijación oscura de CO ₂) |
| Aceptor primario de CO ₂ | RuDP | PEP | En la luz: RuDP En oscuridad: PEP |
| Primer producto de la fotosíntesis | Ácidos C3 (PGA) | Ácidos C4 (malato, aspartato) | En la luz: PGA En oscuridad: PEP |
| Liberación de CO ₂ -Fotorrespiración aparente | Si | No | No |
| Capacidad fotosintética líquida | Leve a Alta | Alta y muy Alta | En la luz: Leve En oscuridad: Media |
| Saturación de luz de la fotosíntesis | A intensidades intermedias | Ninguna saturación a intensidades más altas | A intensidades intermedias a altas |
| Tasa de transpiración (g H ₂ O/g de peso seco ganado) | 450- 950 | 250- 350 | 18- 125 |
| Redistribución de los productos de la fotosíntesis | Lenta | Rápida | Variable |
| Requerimiento de Na ⁺ como micronutriente | No | Si | Si |
| Eficiencia en el uso del agua | Baja | Media | Alta |
| Producción de materia seca | Media | Alta | Baja |
| Distribución geográfica | Amplia | Áreas tropicales abiertas y hábitats áridos | Regiones y hábitats áridos |

Fuente: Medrano *et al* (2000); Larcher (1986).

PEP: Fosfoenol Piruvato; RUBISCO (RuDP): Ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa; PGA: Ácido fosfoglicérico.

A. Plantas tipo C3

Como se anotó con anterioridad, la mayoría de las plantas, sean cultivadas o silvestres pertenecen al tipo C3. Se dice que más del 90% de las plantas del planeta emplean el mecanismo de fotosíntesis tipo C3. En el Ciclo de Calvin o C3 se integran y convierten moléculas inorgánicas de CO₂ en moléculas orgánicas simples, a partir de las cuales se formará el resto de los compuestos bioquímicos que constituyen los seres vivos. Este proceso también se puede nombrar como de asimilación del carbono. En este ciclo ocurren diversas transformaciones de moléculas orgánicas, de manera que por cada seis moléculas de CO₂ fijadas por la planta se forma una molécula de glucosa (azúcar de seis carbonos) y se liberan seis moléculas de O₂ al ambiente (ver ecuación anterior).

La concentración efectiva del CO₂ en el mesófilo de las plantas C3 es baja, puesto que en la atmósfera lo es, y existen además barreras (como, por ejemplo, la resistencia estomática y la resistencia del mesófilo) que limitan el flujo de CO₂ hacia la enzima ribulosa bifosfato (RuBP) carboxilasa (RuBisCO). Además, mantener abiertos los estomas supone un costo elevado en términos de pérdida de agua por transpiración.

Las reacciones de fijación del carbono ocurren en el estroma del cloroplasto, donde el NADPH y el ATP producidos en las reacciones de captura de la energía solar, se usan para reducir un compuesto de tres carbonos, el gliceraldehído fosfato. A esta vía en la que el carbono se fija por medio del gliceraldehído fosfato se la denomina **vía de los tres carbonos o C3. La denominación C3 se debe a que el primer producto de la fotosíntesis es una molécula constituida por tres átomos de**

carbono y sus hojas poseen un solo tipo de cloroplastos. En este caso, la fijación del carbono se lleva a cabo por medio del **Ciclo de Calvin**, en el que la enzima ribulosa bifosfato (RuBisCO) carboxilasa combina una molécula de dióxido de carbono con el material de partida, un azúcar de cinco carbonos llamado ribulosa bifosfato (RuBP). La energía que impulsa al Ciclo de Calvin son el ATP y el NADPH producidos por las reacciones de captura de energía en la primera etapa de la fotosíntesis.

Este ciclo constituye un proceso autocatalítico que involucra 13 etapas, las cuales ocurren en el estroma de los cloroplastos de las células fotosintéticas, y que pueden ser agrupadas en tres fases: *carboxilación*, *reducción* y *regeneración*. La reacción de carboxilación es catalizada por la enzima ribulosa – 1,5 – bisfosfato carboxilasa/oxigenasa (RuBisCO); en la fase reductiva, el compuesto formado es fosforilado y reducido. La regeneración es la fase final del ciclo y requiere energía como ATP.

Este tipo de plantas desenvuelven bien en condiciones de climas favorables para el desarrollo vegetal, por lo que sus estomas se abren y cierran en función de la humedad ambiental (gradiente osmótico) y la concentración de CO₂ presente en su interior. En condiciones con clima extremo los cultivos pueden sufrir una reducción importante en sus rendimientos. Aquí se asocian importantes cultivos nacionales como arroz, banano, cacao, café, frijol, frutales, palma aceitera, papa y tomate entre otros (Cuadro 1).

B. Plantas tipo C4

En la naturaleza se han encontrado más de 3.000 especies de plantas con características C4, pertenecientes a unas 18 familias distintas, todas ellas de angiospermas. Este síndrome es particularmente abundante en especies de gramíneas tropicales y en dicotiledóneas (quenopodiáceas y amarantáceas, entre otras). Importante señalar que se han encontrado plantas C4 tanto en mono como en dicotiledóneas; existiendo además vegetales con características morfológicas y funcionales propias de las C3 como de las C4 por lo que han sido clasificadas como plantas intermedias C3 – C4.

Reciben el nombre de plantas C4 ya que el primer compuesto formado en el proceso es el ácido oxaloacético (compuesto de cuatro carbonos producto de la combinación entre el fosfoenol – piruvato (PEP) con el CO₂) que rápidamente es convertido a otro compuesto llamado malato o aspartato.

El tipo fotosintético C4 normalmente implica un modelo distinto de anatomía foliar, históricamente conocida como la anatomía Kranz, que fue descrita a finales del siglo XIX. Cabe señalar que no todas las plantas C4 presentan anatomía Kranz. A pesar de la gran diversidad de la arquitectura básica foliar en las familias con especies C4, ciertas características anatómicas están normalmente asociadas con este tipo fotosintético y son importantes para que éste se pueda desarrollar.

Como característica distintiva importante, la anatomía foliar de las plantas C4 por lo general se modifica formando dos tipos celulares diferentes implicados en la fotosíntesis, entre otras propiedades, como son: 1) especialización estructural de dos tipos de células fotosintéticas, conocidas como células del mesófilo y células de la vaina, que

conforman la típica anatomía en corona o Kranz y presentan cloroplastos diferentes; 2) configuración espacial de los tejidos foliares que maximiza el contacto entre esos dos tipos celulares, y 3) características que limitan el “escape y pérdida” de CO₂ desde las células de la vaina, lo que eleva su aprovechamiento. En las C4, las células del mesófilo en vez de formar el parénquima en empalizada y el lagunar, se agrupan alrededor de los haces vasculares formando una “corona” espesa de células fotosintéticas grandes con paredes celulares gruesas atravesadas por numerosos plasmodesmos. Entre las células del mesófilo y los haces vasculares se encuentra otro tipo de células fotosintéticas más pequeñas que envuelven el tejido vascular, nombrada como células de la vaina.

En el mesófilo el CO₂ es aceptado por una molécula de tres carbonos llamada fosfoenol piruvato (PEP), por intermediación de la enzima fosfoenol piruvato carboxilasa (PEP carboxilasa), dando como resultado una molécula de oxalacetato de cuatro carbonos que a su vez dará lugar a una molécula de malato o aspartato (también de cuatro carbonos). Estas moléculas son transportadas a otra zona de la hoja, propiamente a las células de la vaina de los haces del floema.

Dependiendo de la enzima empleada en la descarboxilación de las moléculas de cuatro átomos de carbono, se han descrito tres subtipos diferentes; lo que incorpora diferencias morfológicas en la distribución de los cloroplastos en las células de la vaina con respecto al haz vascular.

En la mayoría de las especies vegetales C4 la carboxilación ocurre diferencialmente en el tejido que forman las células del mesófilo y la reducción en el que forman las células de la vaina. Las células de la vaina poseen una pared más gruesa, se distribuyen formando un anillo alrededor de los haces vasculares; en tanto que las del mesófilo se encuentran bajo la epidermis rodeando a las de la vaina. La asimilación del CO₂ por esta vía fotosintética es muy alta ya que el sistema favorece la asimilación de una mayor cantidad del CO₂ que ingresa al mesófilo de las hojas. En las células de la vaina el malato o aspartato se convierte en una molécula de tres carbonos (piruvato), liberando una molécula de CO₂ que entrará a su vez en el Ciclo de Calvin para formar glucosa y liberar O₂.

Sin embargo, todas las versiones identificadas de fotosíntesis tipo C4 cumplen de acuerdo con Sage *et al* (2014), un conjunto común de requisitos que son esenciales para un mecanismo de concentración de carbono que opere por esta vía, como se expone en el Cuadro 3.

| Cuadro 3. Requisitos generales para un mecanismo concentrador de CO ₂ tipo C4 en plantas terrestres. | |
|---|---|
| N° | Requerimientos |
| 1 | Un sistema de captura de CO ₂ centrado alrededor de la PEP carboxilasa |
| 2 | Acoplamiento de energía fotosintética (ATP, NADPH o equivalentes) a una bomba metabólica C4 |
| 3 | Un conjunto de metabolitos intermedios (generalmente orgánicos o aminoácidos) para retener y transportar el CO ₂ capturado |
| 4 | Un mecanismo para liberar CO ₂ del conjunto de metabolitos intermedios |
| 5 | Un compartimento en el que concentrar la liberación de CO ₂ alrededor de la enzima Rubisco |
| 6 | Un medio para reducir la fuga de CO ₂ desde el sitio de aumento de CO ₂ |
| 7 | Modificación de Rubisco para operar en un ambiente alto en CO ₂ |

Fuente: Sage *et al* (2014).

Se dice que las plantas C4 posiblemente evolucionaron en ambientes favorables con presencia de alguna condición estresante como son las altas temperaturas. Se ha encontrado que el cierre de estomas es más recurrente respecto a las C3 para evitar pérdida importante de humedad en el mesófilo y poder conservar con ello el equilibrio osmótico de sus tejidos y células. Esa circunstancia les permitió desarrollar una enzima más eficiente para asimilar el CO₂ presente en el interior de sus tejidos.

En este grupo fotosintético tan especial hay cultivos importantes para Costa Rica, además de la caña de azúcar, como son el maíz, los pastos, la remolacha y el sorgo.

C. Plantas tipo CAM

La mayoría de los miembros de esta familia poseen hojas que varían desde carnosas a totalmente suculentas. El Metabolismo Ácido de las Crasuláceas (CAM, en Inglés) constituye un mecanismo fotosintético muy especial de concentración y uso óptimo del CO₂, en el cual las células fotosintéticas fijan e incorporan (primera carboxilación) CO₂ durante la noche cuando los estomas están abiertos y la pérdida de agua es baja, permitiendo el intercambio gaseoso acumulándolo en la vacuola como ácidos orgánicos, principalmente málico; la enzima RuBisCO se encuentra inactiva en esa condición. En el período de luz siguiente el malato es liberado de la vacuola y ocurre asimilación en forma de carbohidratos, cuando esos ácidos se transforman en azúcares a través del Ciclo de Calvin. Al final del período lumínico, las reservas de malato se agotan causando una disminución en la concentración intracelular de CO₂ y en la velocidad de fijación. Este metabolismo implica la separación temporal de la fijación primaria del CO₂ en forma de ácidos C4 (usualmente malato) de su asimilación por medio de la RuBisCO, y la posterior incorporación secundaria del carbono en forma de carbohidratos. La acumulación de ácidos orgánicos produce un sabor ácido en algunas Crasuláceas durante las primeras horas de la mañana, circunstancia que motivó su nombre.

La fotosíntesis CAM es definida como un consumo neto de CO₂ que ocurre principalmente durante la noche, el cual es acompañado con fluctuaciones diarias en las concentraciones de ácidos orgánicos. Esta vía metabólica es semejante a la vía C4.

Las reacciones bioquímicas que operan el metabolismo CAM ocurren en un sólo tipo de célula fotosintética, en contraste con la separación espacial que se encuentra en las plantas con fotosíntesis C4. Las células del mesófilo de este tipo de plantas, además de cloroplastos, poseen grandes vacuolas donde se acumulan los ácidos por la noche. El metabolismo CAM está asociado con algunas características anatómicas o morfológicas muy favorables que reducen la pérdida potencial de agua, como son entre otras la presencia de cutículas gruesas, baja relación superficie/volumen, tamaño reducido y/o frecuencia estomática, y suculencia (gran tamaño celular con una prominente vacuola central). Algunas plantas contienen buena cantidad de tejido mesofílico no fotosintético o abundantes células, como las células de reserva de agua, que contribuyen con la supervivencia en períodos de sequía prolongados. Poseen la propiedad de regular la apertura de sus estomas, contrario al cierre que hacen otras plantas durante el día para evitar la pérdida de agua, abriéndolos durante la noche.

Se considera que la mayoría de las plantas con metabolismo CAM evolucionaron a partir de climas secos y desérticos como una forma de evitar la excesiva transpiración inducida por las altas temperaturas; aunque también, se especula, que actuaron en climas no desérticos con poca disponibilidad de agua.

Se considera con buen criterio que las plantas con fotosíntesis CAM son el futuro y serán las últimas en mantenerse activas en el planeta, ya que con la evolución que han experimentado son capaces de sobrevivir en ambientes agrestes y muy poco favorables para cualquier otro organismo.

Comenta Medrano (2000) en torno a los tres mecanismos fotosintéticos y de fijación de CO_2 señalados, que *“En los años cincuenta, estudiando la fotosíntesis en la caña de azúcar, se observó que los primeros productos marcados con ^{14}C no eran el 3 – PGA ni el GAP, sino ácidos como el oxalacético, el málico o el aspártico (moléculas de cuatro átomos de carbono, C4). Al prolongar la incubación con ^{14}C aparecía marcado el 3 – PGA. En los años sesenta, Hatch y Slack aportaron nuevas pruebas, y describieron la existencia de esta vía de asimilación del carbono en la caña de azúcar y en otras plantas, que por ello se denominaron plantas C4, en contraposición con las que presentan el 3 – PGA como primer aceptor del ^{14}C , que pasaron a llamarse plantas C3. Las modificaciones bioquímicas que presentan las plantas C4 están asociadas a cambios morfológicos que permiten aislar, por una parte, los mecanismos de fijación inicial de CO_2 en el mesófilo y, por otra, su definitiva asimilación por la RuBisCo. El resultado es una tasa de fotosíntesis muy superior a la de las plantas C3, sobre todo para conductancias estomáticas bajas, y una mayor eficiencia en el uso del agua.*

Otra modificación importante del CFRC (ciclo fotosintético de reducción del carbono) es la que se encuentra en muchas especies de plantas suculentas, que generalmente habitan en zonas áridas. Esta modificación también supone un aumento de la concentración de CO_2 en el entorno de la RuBisCo, y fue descubierta en plantas de la familia de las crasuláceas, que por ello se denominaron plantas CAM (crassulacean acid metabolism). En estas plantas, los estomas permanecen cerrados durante el día (con el consiguiente ahorro de agua) y están abiertos durante la noche. Así, el primer producto de la fijación nocturna de CO_2 es también un compuesto de cuatro carbonos y, por tanto, el inicio de la asimilación fotosintética de CO_2 tiene lugar por la noche, debido al poder reductor que se ha ido acumulando durante el día.”

Fotorrespiración

Proceso ligado a la fotosíntesis que ocurre en las células de las plantas con cloroplastos, catalogado por Villalobos (2001) como un rasgo único de la fotosíntesis C3, que recibe ese nombre en referencia a la evolución del CO_2 estimulada por la luz; señalando que en el sentido bioquímico no corresponde realmente a un proceso de respiración como tal. Sin embargo, como el proceso ocurre en presencia de luz y el balance es semejante al de la respiración se le denomina *“fotorrespiración”*; aunque a diferencia de la respiración que produce energía, la fotorrespiración no produce energía, sino que por el contrario la consume. Tampoco involucra el uso de energía luminosa, la cual

participa solo en la activación de la enzima RuBisCo, lo que no ocurre en la oscuridad. Es un proceso que sucede en el mesófilo de la hoja, en presencia de luz y en donde la concentración de O_2 es alta.

La fotorrespiración es una vía metabólica alterna generadora de importantes pérdidas de CO_2 durante el proceso metabólico, compitiendo con el Ciclo de Calvin, motivo por el cual merece especial atención. Inicia cuando la enzima RuBisCo que no es específica para el CO_2 , pero si fundamental en la fotosíntesis, al incorporar CO_2 durante el proceso de fijación de carbono a una molécula orgánica en la primera fase de ese ciclo. El problema surge cuando la enzima en lugar de utilizar siempre CO_2 como sustrato, a veces cambia y recoge oxígeno (O_2) del medio, incurriendo en la consecuente pérdida de carbono ya fijo como CO_2 .

La fotorrespiración es concebida como la pérdida por liberación de CO_2 con la luz, proceso ligado funcional y metabólicamente con la fotosíntesis. Durante la fotosíntesis las plantas toman dióxido de carbono del aire y liberan oxígeno, sin embargo, la fotorrespiración es un sistema contrario y negativo para las plantas, pues la fotorrespiración desperdicia energía y disminuye consecuentemente la síntesis de azúcares.

Cuando una planta tiene sus estomas abiertos, el CO_2 se difunde hacia su interior, mientras que el O_2 y el vapor de agua se difunden por el contrario hacia fuera; en cuyo caso la fotorrespiración se reduce al mínimo. Sin embargo, cuando una planta cierra sus estomas para controlar y disminuir la pérdida de agua por transpiración el O_2 de la fotosíntesis se acumula entonces internamente. En estas condiciones, la fotorrespiración (a la luz) aumenta debido a la mayor proporción O_2/CO_2 .

La fotorrespiración se aumenta conforme se incrementa la temperatura ambiente, lo que sucede especialmente en días claros y soleados. A mayor temperatura, mayor tasa de fotorrespiración, llegando a igualar en ocasiones la tasa de fotosíntesis. En esos momentos el ritmo de crecimiento de las plantas se interrumpe. Se tiene por cierto y demostrado que cuando las condiciones del entorno productivo son cálidas y secas la fotorrespiración se incrementa, a menos que la planta posea atributos y características especiales que le permitan reducir el problema, como acontece con los mecanismos C4 y CAM. Se considera que las plantas C4 como la caña de azúcar, al carecer de fotorrespiración y poseer una temperatura óptima más alta para fotosíntesis, les permite sobrevivir exitosamente en condiciones donde las C3 pueden tener serios problemas de adaptación.

Algunos autores argumentan, sin embargo, que la fotorrespiración puede tener efectos favorables al actuar como fotoprotector al prevenir el daño inducido por la luz en las moléculas implicadas en la fotosíntesis, y contribuir por ello con el equilibrio redox en las células y las defensas inmunitarias de la planta.

En resumen, las plantas de ciclo C4 como la caña de azúcar, poseen una mayor eficiencia fotosintética debido, probablemente, a la compartimentación de las enzimas y las características anatómicas que poseen sus hojas, lo que favorece una tasa de fotorrespiración baja o

ausente; lo que provoca que en ausencia de O₂ la fotosíntesis no se vea incrementada.

Fisiología y metabolismo de la caña

Como se ha expresado en múltiples oportunidades, la caña de azúcar es una gramínea tropical semiperenne excepcional, de amplia y reconocida adaptación a condiciones diversas, algunas extremas, que han favorecido su amplia distribución mundial, como referencia Chaves (2019c) al apuntar que *“Comercialmente la caña se ha históricamente cultivado y cultiva en la actualidad en cuatro continentes: Asia, América, África, Europa y Oceanía, desde latitudes de 37° Norte a 31° Sur [...], que representan los “límites geográficos del cultivo comercial de la caña de azúcar” marcando con ello una amplia escala de adaptación que involucra todo tipo de condiciones, algunas favorables para aprovechar el potencial de la planta; otras no.”*

En torno al sobresaliente potencial y capacidad de adaptación de la planta de caña, comenta el mismo autor, que *“Las regiones cañeras más distantes de los trópicos de Cáncer y Capricornio, situados a 23° 26' de Latitud de los Hemisferios Norte y Sur, respectivamente, están más expuestas a padecer la influencia negativa de las bajas temperaturas; mientras que las próximas al Ecuador y la Zona Tropical, por el contrario, a las altas temperaturas, vientos y lluvia. También a las constantes e inclementes distorsiones climáticas caracterizadas por cambios bruscos inductores de tormentas y huracanes, con sus impactos por fuertes vientos y alta precipitación. Como apuntara Chaves (2019e), “La caña virtud de sus atributos y condiciones como planta tipo C – 4 (cuatro átomos de Carbono), ha demostrado tener una elevada tolerancia y capacidad de adaptación a la temperatura, habiendo reportado aceptación a extremos inusitados, como son ámbitos entre 0 y 50°C, como indicara Chaves (2019d); pese a lo cual se ubica el ámbito entre 16 y 33°C como óptimo con extremos de 14 a 38°C como aceptables para fines productivos y comerciales, pues fuera de ellos hay inconvenientes e indeseables impactos negativos sobre el metabolismo (enzimas, proteínas, estomas) y la anatomía (crecimiento, desarrollo, quemaduras de tejidos), obligando a la planta a consumir reservas acumuladas para acompañar la respiración celular para su supervivencia y manutención vital.”*

Como fue visto y comentado anteriormente, la planta de caña de azúcar es clasificada por su metabolismo fotosintético entre las C₄; circunstancia por la cual es ubicada entre las plantas de alta eficiencia en la conversión de energía lumínica en energía química, con tasas fotosintéticas estimadas en hasta 100 mg de CO₂ fijado por dm² de área foliar por hora. Esa elevada actividad fotosintética, no mantiene, sin embargo, una relación directa con respecto a la alta producción de biomasa que genera. La gran capacidad productiva de la planta de caña reside en su elevada tasa de fotosíntesis por unidad de superficie de terreno, que es influenciada a su vez de manera importante por el alto Índice de Área Foliar (IAF) que posee. Adicionalmente, también al prolongado ciclo vegetativo de crecimiento de la planta, ubicado para el caso particular de Costa Rica entre 11 y 24 meses (Chaves 2019a), el cual se traduce en elevadas producciones de materia verde y seca.

Como es conocido y está suficientemente comprobado, las características de las variedades sembradas definen el número de tallos, la altura (m) y el diámetro del tallo (cm), el largo y el ancho de las hojas (cm) y la arquitectura de la sección aérea; siendo la expresión de estos caracteres muy influenciados por el clima, por las prácticas culturales utilizadas en el manejo agronómico de la plantación. El componente genético asociado y vinculado con el tema ambiental y los elementos del clima, resulta indiscutiblemente determinante en la expresión satisfactoria o no, del potencial productivo agrícola e industrial de la caña de azúcar, como lo expresaran Larcher (1986), Lucchesi (1987), Castro y Angelini (1987), Chaves (2018, 2019bc, 2020abcf, 2021a).

Las características anatómicas y genéticas particulares de los cultivares de caña sembrados para uso comercial en el país, influyen de buena manera la eficiencia fotosintética de la planta; aun considerando las importantes y significativas variaciones climáticas y sistemas de producción que existen en los diferentes ambientes y entornos de producción del cultivo durante su desarrollo, como lo demostrara Chaves (2019bc, 2020fg, 2022a).

Se ha comprobado que la fotosíntesis correlaciona de manera negativa con el largo de las hojas, pero positivamente con su grosor. Asimismo, una posición más vertical de la hoja en el tallo se traduce en una mayor eficiencia fotosintética, particularmente en plantaciones de alta productividad agrícola con presencia de poblaciones de alta densidad, debido a la penetración más eficiente de la luz en el dosel de la plantación. La actividad fotosintética se ha encontrado que varía significativamente con la edad de las hojas, alcanzando valores de fijación de plantas Ciclo C₄ solo en las hojas recién expandidas; mientras que en las hojas más viejas y las más jóvenes, la fotosíntesis opera en niveles similares al de las plantas C₃ (Rodrigues 1995). El auto sombreado presente en la sección foliar inferior de la planta de caña, opera en sentido negativo con la fotosíntesis.

Los mecanismos de bioconversión de energía en la caña de azúcar son afectados más efectivamente por los siguientes indicadores ambientales: luz (intensidad y cantidad), concentración de CO₂, temperatura, disponibilidad de agua y nutrientes. El incremento de la irradiación eleva la tasa fotosintética, ocurriendo la saturación en valores arriba de 0,9 cal/cm² /minuto. Un incremento en la concentración de CO₂ atmosférico en el medio eleva la capacidad fotosintética. Por su parte, el viento presente en velocidades moderadas favorece y eleva la fotosíntesis por aumento en la disponibilidad de CO₂ de las plantas; con baja velocidad del viento, ocurre depresión en el nivel de fotosíntesis al rededor del medio día.

La temperatura es considerada entre los factores climáticos el más importante para la producción de caña de azúcar. La planta, generalmente, es tolerante a las altas temperaturas, produciendo en regiones con temperatura media de verano de 47°C, utilizando irrigación. Temperaturas más bajas (menores de 21°C), disminuyen el crecimiento de los tallos y promueven el acúmulo de sacarosa. Como apuntara Chaves (2019de), la planta de caña puede operar con limitaciones aun en valores extremos de temperatura que van de 0 a 50°C.

Es imperativo y muy necesario lograr un mejor entendimiento sobre la fisiología y el metabolismo del proceso fotosintético, como lo demuestran las tentativas fallidas e ineficaces que se han obtenido al procurar asociar y correlacionar la tasa de fotosíntesis/unidad de área foliar con la de productividad económica/unidad de superficie de terreno. Es por ello necesario conocer con mayor profundidad y mejor comprensión la fotosíntesis y el sistema de transporte y acúmulo de los productos metabólicos generados, principalmente sacarosa, como representante del más valioso producto de la caña de azúcar. En función de esto, el proceso de maduración y acúmulo de sacarosa y las formas de conseguir incrementar y anticipar ese proceso, debe ser cuidadosamente analizado, sobre todo actualmente cuando los reguladores vegetales asumen un papel importante en este proceso.

Como apuntara Machado (1987) con visión integral *“La caña de azúcar como sistema productivo está constituido básicamente por un sitio de producción, representado por las hojas fotosintéticamente activas, un sistema de transporte y distribución del producto fotosintetizado, varios sitios de consumo (raíces, tallos, hojas jóvenes, tejidos meristemáticos y órganos reproductores), y un sitio de acúmulo y almacenamiento de sacarosa, representado por los vacuólos de las células de los internodos de los tallos.*

La eficiencia en la integración de esos sistemas determina la productividad del cultivo. Sin embargo, como sistema biológico su dinámica es influenciada, tanto por factores intrínsecos de la planta (genéticos y fisiológicos), como por el ambiente.”

En torno al mismo tema Castro (2016) expresa, que *“La caña de azúcar posee un perfecto funcionamiento del sistema de producción asociado a las características morfo – genéticas. Este sistema está constituido por un centro de producción (fuente), representado por el área foliar fotosintéticamente activa, un sistema de eliminación del producto final (sacarosa) y un centro de acúmulo (drenaje), representado por los vacuólos de las células de los entrenudos.”*

Atributos y ventajas de la planta de caña

El rendimiento agrícola e industrial del cultivo de la caña de azúcar como está ampliamente demostrado depende en gran medida, entre otros factores, de la radiación solar interceptada por la planta, de la eficiencia de conversión de esta en biomasa, de la disponibilidad de agua y nutrimentos y también de los gastos respiratorios que tenga la planta por su actividad metabólica.

Virtud del contenido temático y materia abordada y por la pertinencia del tópico, resulta de mucho valor reiterar lo anotado oportunamente por Chaves (2022b) en torno al tema anatómico – fisiológico y metabólico, por medio del cual caracterizó la caña de azúcar desde esa perspectiva, como se transcribe seguidamente:

“La caña de azúcar es una conocida y provechosa planta de origen tropical que se adapta y desenvuelve bastante bien en condiciones edáficas y climáticas adversas y disímiles, donde otras plantas por lo general no prosperan, lo que le provee una gran capacidad de resiliencia

a las divergencias que puedan existir en elementos y condiciones naturales o inducidas de carácter biótico y abiótico. La planta se adapta a condiciones calientes y secas, como también frías y húmedas; zonas de alta y baja luminosidad, suelos ácidos y también alcalinos, topografías planas y quebradas, entre otras igualmente contrastantes. Por su importancia y complejidad constituye una de las plantas más estudiadas a nivel mundial en materias vinculadas con su anatomía y fisiología, como lo demuestran los clásicos documentados por Dillewijn (1952), Alexander (1973), Magalhães (1987), Castro (2016), Castro y Angelini (2017), SUGARCANE (2014), atribuyéndole características, condiciones y atributos especiales que la tipifican como “excepcional” entre las plantas con proyección y empleo comercial, como lo expresara de manera sucinta Chaves (1988, 2018), al señalar con gran detalle (Chaves 2020d), que:

“...la caña es una planta excepcional entre las plantas de uso comercial en consideración de poseer varias ventajas y atributos de índole anatómico y fisiológico que la tipifican y caracterizan, entre las cuales pueden citarse como sobresalientes las siguientes:

- 1) *Dispone de un elevado Índice de Área Foliar (IAF \approx 4 – 12 m²/m²) asimilador de luz que favorece y hace más eficiente la absorción de radiación solar (Barbieri 1993).*
- 2) *Produce una gran cantidad de Materia Orgánica la cual reside en su alta Tasa de Fotosíntesis por unidad de superficie de terreno, que es influenciada a su vez por su alto IAF. Su producción máxima teórica de Materia Seca se reporta en 280 TM/ha/año.*
- 3) *La disposición vertical de sus hojas durante gran parte de su periodo de crecimiento contribuye significativamente con los puntos anteriores.*
- 4) *Fotosintéticamente es una planta altamente eficiente que pertenece al grupo privilegiado de las Ciclo C4 (Vía Ácido Dicarboxílico).*
- 5) *Posee estructuralmente dos juegos de cloroplastos (Células del Mesófilo y Células de la Vaina Vascular) que promueven su alta eficiencia fotosintética en la captura y uso del CO₂, la cual se da por dos vías: a) Vía Normal C3 de Calvin y, b) Vía alternativa C4.*
- 6) *Es capaz de incrementar su Tasa Fotosintética por aumento de la luminosidad, por lo que califica como una planta típicamente de sol y de luz.*
- 7) *Posee un alto Punto de Saturación de Luz estimado en 6,5 a 150 Klux (\approx 65 a 1.500 Wm²).*
- 8) *Posee un alto Punto de Compensación lo que le permite alcanzar altos valores de fijación de CO₂, lo que corresponde a eficiencias del 5 – 6% de conversión de energía solar.*
- 9) *Su velocidad de Fotosíntesis es cerca de 2 – 3 veces superior al de las gramíneas del tipo C3, presentando una capacidad fotosintética estimada en 100 mg de CO₂/dm²/hr.*
- 10) *Tolera condiciones extremas (altas y bajas) de temperatura. Se reporta alta tolerancia a temperaturas extremas de hasta 47*

°C y capacidad productiva, siempre que se utilice riego eficiente. Se estima que los 27 °C constituyen la óptima para absorción de nutrimentos, por cuanto temperaturas debajo de 21 °C retardan el crecimiento de las raíces, el cual se paraliza a los 10 °C.

- 11) Tolera como está demostrado una condición hídrica extrema por varios días consecutivos (sequía, inundación).
- 12) Tiene capacidad y ventaja de poder fotosintetizar con los Estomas prácticamente cerrados, lo que duplica su eficiencia en el uso del agua y su transpiración relativa, en comparación con otras gramíneas del tipo C3.
- 13) No posee Respiración Aparente por lo que no “desperdicia energía metabólica potencial”.
- 14) Dispone de una enorme y reconocida capacidad para producir masa verde (Biomasa) compuesta fundamentalmente por almidones, azúcares (Reductores y No Reductores), compuestos lignocelulósicos y agua.
- 15) Dispone de un poderoso sistema radicular compuesto de tres tipos de raíces diferentes: a) Superficiales – ramificadas y absorbentes, b) de Fijación más profundas y c) Cordones que profundizan hasta 6 m. que le dan una enorme capacidad de exploración (vertical, horizontal) en el suelo y con ello absorción nutricional y de agua (Chaves 2020e).
- 16) Posee una rusticidad y capacidad de adaptación (climática, edáfica y de manejo) a toda prueba, tal como está suficientemente demostrado a nivel de uso comercial.
- 17) Sus elevados requerimientos nutricionales son satisfechos en alto grado virtud de sus ventajas (puntos N° 13 y 14) anotadas anteriormente. Este atributo resulta sin embargo contraproducente virtud de que “agota los suelos” cuando no son complementariamente convenientemente fertilizados.
- 18) Posee la capacidad demostrada de Fijar Nitrógeno Atmosférico, con aportes importantes a su nutrición.
- 19) Para uso pecuario la caña posee y mantiene en periodos secos valores nutritivos y energéticos importantes que le proveen una interesante potencial de uso forrajero.
- 20) Su condición de planta Perenne le permite generar materia prima por retoñamiento luego de cada corte, por lo que no requiere inversiones y siembras sucesivas, sólo mantenimiento.
- 21) Los parámetros ambientales que afectan de manera más marcada e incidente la Bioconversión de Energía en la caña de azúcar son: 1) Luz (intensidad y calidad); 2) Concentración de CO₂; 3) Disponibilidad de agua; 4) Disponibilidad de nutrimentos y 5) Temperatura, entre otras.

A lo anterior puede agregarse otro atributo muy importante y aplicado a nuestras condiciones, como es:

- 22) La caña posee la capacidad de formar aerénquima, tejido especializado que le permite el transporte de oxígeno

atmosférico a las raíces y órganos sumergidos en condiciones de exceso de agua, lo que admite tolerar estrés provocado por hipoxia o falta de oxígeno y con ello la supervivencia de la planta en zonas de alta humedad. No se encuentran diferencias entre variedades (Unigarro et al 2013; Cadet 2019).”

Efecto de los factores ecológicos

El rendimiento de la fotosíntesis está dado y depende de la condición y estado en que se encuentren algunos factores internos y externos a la planta. El crecimiento, el desarrollo general y el grado de productividad agroindustrial de la caña de azúcar están estrechamente vinculados y son dependientes del clima, el suelo y las condiciones particulares del entorno donde se encuentre cultivada la planta; motivo y razón por la cual el ambiente es determinante en los resultados comerciales finales que pueda tener un emprendimiento agroproductivo empresarial.

Como señalaran Hall y Rao (1980) y Chaves (2022b), la productividad final de un cultivo depende de:

- a) Estructura de la hoja.
- b) Contenido hídrico de la planta y los tejidos.
- c) Contenido de clorofila.
- d) Temperatura ambiente.
- e) Concentraciones de CO₂ y O₂ en la atmósfera circundante alrededor de la hoja.
- f) Cantidad de energía solar incidente.
- g) Cantidad de energía solar interceptada y absorbida (excitación electrónica).
- h) Cantidad de energía solar convertida (fijación de CO₂).
- i) Acción e influencia de las enzimas protoplasmáticas.
- j) Contenido mineral en la planta.
- k) Acúmulo de productos de la fotosíntesis dentro de los cloroplastos.
- l) Cantidad de energía transportada para las secciones útiles de la planta (participación de fotoasimilados).
- m) Metabolismo en las secciones útiles de la planta (eficiencia en la utilización).

Como se infiere de lo apuntado, la condición ambiental manifestada principalmente por la temperatura ambiente, el grado de luminosidad del lugar y la concentración de CO₂, resultan determinantes en el accionar y eficiencia del sistema fotosintético de la caña de azúcar; como también lo hacen las características anatómicas, genéticas y fisiológicas propias y particulares de la variedad empleada, en lo cual hay que reconocer, que la “caña de azúcar es sin lugar a duda una campeona”.

Conclusión

Mucho se comenta en la actividad cañero – azucarera sobre la importancia y dependencia del cultivo y sus rendimientos, de los denominados factores de la producción (clima, suelo, planta, hombre, tiempo) como requerimientos básicos, obligados y necesarios para poder aspirar a lograr producciones elevadas que satisfagan las más estrictas demandas de calidad, rentabilidad y competitividad (Chaves

2020f). Sin embargo, paradójicamente muy poco se conoce, aún entre profesionales, sobre los potenciales y capacidades particulares intrínsecas que posee la planta de caña, que le aportan y proveen condiciones favorables para poder adaptarse y desarrollarse satisfactoriamente aún en condiciones de cultivo difíciles donde otras plantas no prosperan, o lo hacen con grandes muy limitantes.

Es común y recurrente escuchar procedente de personas externas a la actividad cañera emplear con fines degradantes y despectivos, calificar y referirse al cultivo de la caña de azúcar como “una maleza dulce”. En el fondo ese epígrafe es válido y hasta aceptado, pero la pregunta importante de fondo es responder ¿Por qué se hace esa insinuación y ocurre esa situación? Las razones son tal vez poco conocidas, pero eso sí muy deseadas por todos, pues son generadoras de grandes beneficios para el cultivo que no implican necesariamente inversiones ni gastos onerosos por ser inherentes e intrínsecas a la planta.

Como fue ampliamente informado a través del texto, la planta de caña de azúcar, a diferencia de otros cultivos importantes (Cuadro 1), posee un sistema fotosintético y metabólico muy eficiente propio de las plantas con Ciclo C4 que hace que la captación de luz, fijación de CO₂ atmosférico, conversión, acúmulo, transporte y redistribución de los productos finales de la fotosíntesis sea muy eficiente; lo cual sumado a no poseer fotorrespiración aparente importante le provee grandes ventajas fisiológicas. No cabe duda de que las características anatómicas, genéticas y fisiológicas propias y particulares de la planta de caña de azúcar, constituyen y conforman “un eficiente motor metabólico” que opera en favor del cultivo, motivo por el cual se adapta, crece y produce en condiciones agrestes y limitantes para otros cultivos; por esa razón, el calificativo de “maleza dulce” es bienvenido. No queda duda en afirmar que el “Sistema fotosintético es un motor natural de eficiencia de la caña de azúcar”.

Debe considerarse y tomarse en cuenta que la actividad fotosintética y su eficacia aumentan con la luz, la temperatura y el CO₂, por lo que, si se quiere conseguir un buen desarrollo del cultivo y un incremento sustantivo de la productividad agrícola e industrial, hay que garantizar como factores primarios una buena temperatura y una correcta iluminación; complementadas con la dotación del recurso hídrico y nutricional requeridos.

Como apuntara Chaves (2020f) en torno al tema “Los potenciales y bondades que intrínsecamente pueda tener y aportar una variedad de caña por la excepcionalidad de su componente anatómico – genético, quedan supeditados e influenciados por los factores del entorno donde se ubica la plantación, motivo por el cual procurar maximizarlos resulta ser una labor de extrema importancia durante la fase de planificación. Es claro que una buena variedad de caña, por mejor potencial genético que posea, no podrá rendir los resultados esperados si no se ubica en el entorno más apropiado y conveniente (Chaves 2018, 2019abc, 2020hi).”

Conocer y entender la importancia, pero sobre todo poder conducir y optimizar la privilegiada dotación natural que en materia anatómica, genética y fisiológica posee la planta de caña, es posibilitar la opción de maximizar los beneficios que ese importante potencial le aporta al cultivo. Esto obliga inexcusablemente conocer las características,

propiedades y atributos naturales de la planta de caña, para que bien orientados, permitan potenciar y traducir la resiliencia ambiental y eficiencia fotosintética en mejores rendimientos agroindustriales con estructuras de costos menores.

Literatura citada

- 1) Alexander, AG. 1973. **Sugarcane Physiology**. Amsterdam: Elsevier. Scientific Publishing Company 752 p.
- 2) Barbieri, V. 1993. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): um modelo matemático-fisiológico de estimativa**. Têse de Mestrado. ESALQ-USP, Piracicaba, Brasil. 142 p.
- 3) Cadet Piedra, E. 2019. **Caracterización, sintomatología y respuesta de la caña de azúcar al estrés por déficit hídrico**. Boletín. Agroclimático (Costa Rica) 1(14): 5–7, octubre.
- 4) Castro, RCP. 2016. **STAB – Fisiologia Aplicada à Cana-de-Açúcar**. Piracicaba, São Paulo. STAB–Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil. Regional Sul. 208 p.
- 5) Castro, P.R.C.; Angelini, B.G. 2017. **Fatores Ecológicos**. STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos, Janeiro/fevereiro Vol. 35 N° 3. p: 16-17.
- 6) Chaves Solera, M.A. 1988. **Efeito de Relações Ca: Mg, utilizando Carbonatos e Sulfatos, sobre o crescimento e a nutrição mineral da cana-de-açúcar**. Tesis Magister Scientiae. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 186 p.
- 7) Chaves Solera, M.A. 2018. **Genética aplicada a la mejora de las plantaciones comerciales de caña de caña de azúcar**. En: Congreso Tecnológico DIECA 2018, 7, Colegio Agropecuario de Santa Clara, Florencia, San Carlos, Alajuela, Costa Rica. Memoria Digital. Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), 29, 30 y 31 de agosto del 2018. 43 p.
- 8) Chaves Solera, M.A. 2019a. **Clima y ciclo vegetativo de la caña de azúcar**. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(7): 5-6, julio.
- 9) Chaves Solera, MA. 2019b. **Entornos y condiciones edafoclimáticas potenciales para la producción de caña de azúcar orgánica en Costa Rica**. En: Seminario Internacional: *Técnicas y normativas para producción, elaboración, certificación y comercialización de azúcar orgánica*. Hotel Condovac La Costa, Carrillo, Guanacaste, Costa Rica, 2019. Memoria Digital. San José, Costa Rica, Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI), 15, 16 y 17 de octubre, 2019. 114 p.
- 10) Chaves Solera, M.A. 2019c. **Ambiente agroclimático y producción de caña de azúcar en Costa Rica**. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 1(18): 5–10, noviembre–diciembre.
- 11) Chaves Solera, MA. 2019d. **Temperatura, desarrollo y concentración de sacarosa en la caña de azúcar**. Boletín Agroclimático. Volumen 1 Número 16, octubre–noviembre. p: 5-9.
- 12) Chaves Solera, MA. 2019e. **Incidencia de las bajas temperaturas en la concentración de sacarosa en la caña de**

- azúcar: el caso de Costa Rica.** Boletín Agroclimático. Volumen 1 Número 17, noviembre–diciembre. p: 6-10.
- 13) Chaves Solera, M.A. 2020a. **Estrés por calor en la caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(5): 5-12, marzo.
 - 14) Chaves Solera, M.A. 2020b. **Estrés hídrico en la caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(8): 5-16, abril.
 - 15) Chaves Solera, M.A. 2020c. **Estrés por viento en la caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(9): 4-15, abril.
 - 16) Chaves Solera, M.A. 2020d. **Atributos anatómicos, genético y eco fisiológicos favorables de la caña de azúcar para enfrentar el cambio climático.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(11): 5-14, mayo.
 - 17) Chaves Solera, M.A. 2020e. **Sistema radicular de la caña de azúcar y ambiente propicio para su desarrollo en el suelo.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(13): 6–18, junio. *También en:* Revista Entre Cañeros N° 17. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, setiembre. p: 51–71.
 - 18) Chaves Solera, M.A. 2020f. **Agroclimatología y producción competitiva de caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(24): 5-13, noviembre.
 - 19) Chaves Solera, M.A. 2020g. **Ambientes climáticos y producción competitiva de la caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(26): 5-12, diciembre–enero.
 - 20) Chaves Solera, M.A. 2020h. **Implicaciones del clima en la calidad de la materia prima caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(1): 5-12, enero.
 - 21) Chaves Solera, M.A. 2020i. **Clima, germinación, ahijamiento y retoñamiento de la caña de azúcar.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 2(14): 6-14, julio.
 - 22) Chaves Solera, M.A. 2021a. **Estrés mineral y caña de azúcar en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 3(11): 5-21, mayo.
 - 23) Chaves Solera, M.A. 2021b. **Fertilización foliar en caña de azúcar: concepto, principios y práctica.** Revista Entre Cañeros N° 22. Revista del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA). San José, Costa Rica, diciembre. p: 65-125.
 - 24) Chaves Solera, M.A. 2022a. **Sistemas agrícolas de producción de caña de azúcar en Costa Rica: primera aproximación.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(20): 5-26, octubre.
 - 25) Chaves Solera, M.A. 2022b. **Zonificación agroecológica del cultivo de la caña de azúcar: elementos básicos para su implementación en Costa Rica.** Boletín Agroclimático (Costa Rica) 4(22): 5-29, octubre.
 - 26) De las Rivas, J. 2000. **La luz y el aparato fotosintético.** En: Fundamentos de Fisiología Vegetal. Coordinado por J. Azcón-Bieto y M. Talón. Madrid, España. McGraw–Hill–Interamericana de España, S.A.U. p: 131–153.
 - 27) Dillewijn, C. Van. 1952. **Botany of Sugarcane.** Chronica Botánica Co. Waltham, Mass. Trad. Español Instituto del Libro. La Habana, Cuba. 460 p.
 - 28) FAO. 1996. **Enseñanzas de la revolución verde: hacia una nueva revolución verde.** Cumbre mundial sobre la alimentación. Roma. *Disponible en:* <http://www.fao.org/3/w2612s/w2612s06.htm>
 - 29) Hall, D.O.; Rao, K.K. 1980. **Fotossíntese.** Tradução e notas de Antonio Lamberti. São Paulo: EPU: Editora da Universidade de São Paulo. 89 p.
 - 30) Larcher, W. 1986. **Ecofisiología Vegetal.** Traducción 4ª edición por Antonio de Pádua Danesi y Hildegard T. Buckup: revisión técnica y notas Antonio Lamberti. São Paulo: EPU. p: 74-161.
 - 31) Levitt, J. 1972. **Responses of plants to environmental stresses.** 2nd ed. New York, San Francisco, London. Academic Press, Inc. 497 p.
 - 32) Lucchesi, A.A. 1987. **Fatores da Produção Vegetal.** Em: Ecofisiologia da Produção Agrícola. Editado por Paulo Roberto C. Castro, Suzana Oellers Ferreira e Tsuioshi Yamada – Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p: 1-11.
 - 33) Machado, E.C. 1987. **Fisiologia de produção de cana-de-açúcar.** Em: Cana-de-Açúcar. Cultivo e utilização. Sergio Bicudo Paranhos, Coordenador. Campinas, São Paulo, Fundação Cargill. p: 56-87.
 - 34) Magalhães, A.C.N. 1987. **Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta.** Em: Ecofisiologia da Produção Agrícola. Editado por Paulo Roberto C. Castro, Suzana Oellers Ferreira e Tsuioshi Yamada – Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p: 113-118.
 - 35) Medrano, H.; Galmés, J.; Flexas, J. 2000. **Fotorrespiración y mecanismos de concentración del dióxido de carbono.** En: Fundamentos de Fisiología Vegetal. Coordinado por J. Azcón-Bieto y M. Talón. Madrid, España. McGraw–Hill–Interamericana de España, S.A.U. p: 227-245.
 - 36) Nasyrov, Y.S. 1978. **Genetic control of photosynthesis and improving of crop productivity.** Annual Review of Plant Physiology, Palo Alto, 29: 215-237.
 - 37) Rodrigues, J.D. 1997. **Fisiologia da cana-de-açúcar.** Botucatu, São Paulo. Campus de Botucatu, Instituto de Biotecnologías, Universidade Estadual Paulista. 99 p.
 - 38) Romero, J. 2012. **La revolución verde.** AGROECOLOGÍA UTN. Ibarra. *Disponible en:* <http://agroecologiautn.blogspot.com/>
 - 39) Sage, R.F.; Melo Peixoto, M.; Sage, T.L. 2014. **Photosynthesis in Sugarcane.** In: SUGARCANE: *Physiology, Biochemistry, and Functional Biology.* Edited by Paul H. Moore, Frederick C. Botha. New York: Ed John Wiley & Sons, Inc. Iowa USA. 693 p: 121–154.
 - 40) **SUGARCANE: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology.** 2014. Edited by Paul H. Moore, Frederick C. Botha. New York: Ed John Wiley & Sons, Inc. Iowa USA. 693 p.

41) Unigarro Muñoz, C.A.; Victoria Kafure, J.I.; Checa Coral, O.E. 2013. **Evaluación del área de aerénquima radical en caña de azúcar (*Saccharum spp.*) como característica de tolerancia a hipoxia.** Acta Agronómica 62(3): 223-231.

42) Villalobos Rodríguez, E. 2001. **Fisiología de la producción de los cultivos tropicales.** 1^{ed}, San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica. p: 18-51.

Recuerde que puede acceder los boletines en
www.imn.ac.cr/boletin-agroclima y en
www.laica.co.cr