

Octubre 2025 - Volumen 2 – Número 10

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.

## 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

## TENDENCIA SEMANAL PARA LAS REGIONES CAÑERAS EN OCTUBRE 2025

La onda tropical #35 se convirtió en el Huracán Jerry para la cual se prevé una trayectoria fuera del Mar Caribe. El siguiente cuadro detalla semana a semana lo esperado para el mes en curso en cada región cañera.

| Región cañera                       | Semana: 6-12                                   | Semana: 13-19                                  | Semana: 20-26                            | Semana: 27-2                  |
|-------------------------------------|--|--|--|-------------------------------|
| <b>Guanacaste (Este y Oeste)</b>    | Lluvioso<br>Fresco<br>Ventoso                  | Lluvioso<br>Fresco<br>Ventoso                  | Lluvia normal<br>Cálido<br>Ventoso       | Lluvioso<br>Cálido<br>Ventoso |
| <b>Puntarenas</b>                   | Lluvioso<br>Fresco<br>Ventoso                  | Lluvia normal<br>Fresco<br>Ventoso             | Lluvia normal<br>Cálido<br>Viento normal | Lluvioso<br>Cálido<br>Ventoso |
| <b>Región Sur</b>                   | Lluvioso<br>Fresco<br>Ventoso                  | Lluvia normal<br>Fresco<br>Ventoso             | Lluvia normal<br>Cálido<br>Viento normal | Lluvioso<br>Cálido<br>Ventoso |
| <b>Región Norte</b>                 | Lluvia normal<br>Fresco<br>Ventoso             | Lluvia normal<br>Fresco<br>Ventoso             | Lluvia normal<br>Cálido<br>Viento normal | Lluvioso<br>Cálido<br>Ventoso |
| <b>Valle Central (Este y Oeste)</b> | Lluvioso<br>Temperatura normal<br>Ventoso      | Lluvia normal<br>Temperatura normal<br>Ventoso | Lluvia normal<br>Cálido<br>Viento normal | Lluvioso<br>Cálido<br>Ventoso |
| <b>Turrialba (Alta y Baja)</b>      | Lluvia normal<br>Temperatura normal<br>Ventoso | Lluvia normal<br>Temperatura normal<br>Ventoso | Lluvia normal<br>Cálido<br>Viento normal | Lluvioso<br>Cálido<br>Ventoso |

*“No se prevé afectación nacional directa por los huracanes Jerry, Priscilla y Octave. Sin incursión de polvo Sahariano al menos hasta mediados de mes.”*

## CONDICIONES DEL MES PREVIO: SEPTIEMBRE 2025

Septiembre registró cinco ondas tropicales afectando el territorio nacional, cuatro en la primera quincena y la quinta en la segunda quincena. **Guanacaste (Este y Oeste)** presentó 6-8 días con lluvia de más de 15 mm, amplitud térmica 8-12 °C, ráfagas 18-43 km/h y radiación solar 20-24 MJ/m<sup>2</sup>; así como evapotranspiraciones 4-6 mm; acumulando 396-399 °C grados día. **Puntarenas** mostró 12 días con lluvia más de 15 mm de los cuales el día 26 registro más de 100, amplitud térmica 6-11 °C, ráfagas 12-30 km/h y radiación solar 17-23 MJ/m<sup>2</sup> y evapotranspiraciones 4-6 mm; acumulando 389 °C grados día.

as con más de 15 mm, amplitud térmica 5-10 °C, ráfagas 10-33 km/h, radiación solar 15-20 MJ/m<sup>2</sup> y mm; acumulando 254 °C grados día. **Región Norte** evidenció 12 días con más de 15 mm, amplitud 5-34 km/h y radiación solar 14-21 MJ/m<sup>2</sup> y evapotranspiraciones 3-6 mm; acumulando 350 °C grados días con lluvia mayor a 15 mm, amplitud térmica 5-12 °C, ráfagas 19-41 km/h y radiación solar 14-21 MJ/m<sup>2</sup> y evapotranspiraciones 3-5 mm; acumulando 256 °C grados día. **Región Turrialba** exhibió 5 días con lluvia superior a 15

Octubre 2025 - Volumen 2 – Número 10

mm, amplitud térmica 5-11 °C, ráfagas 18-33 km/h y radiación solar 13-19 MJ/m<sup>2</sup> y evapotranspiraciones 2-4 mm; acumulando 196 °C grados día.

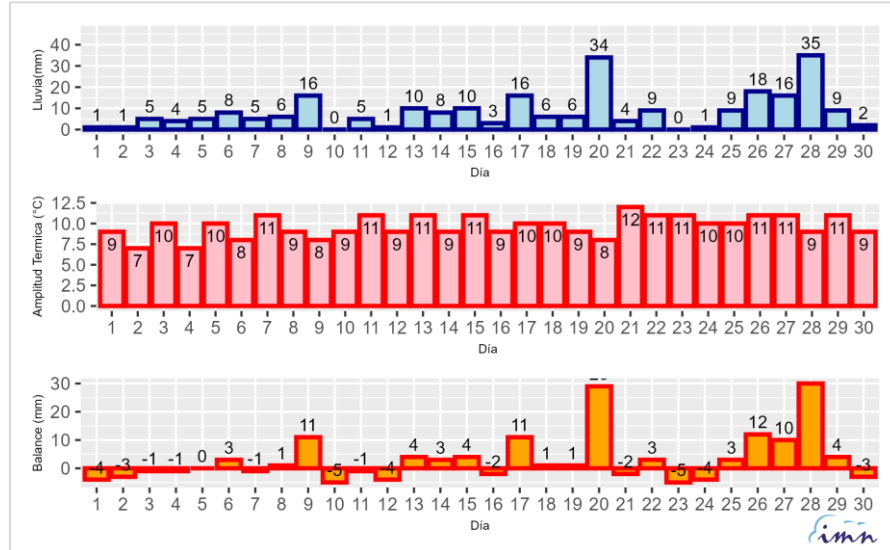


Figura 1.a. Promedio regional diario de precipitación (mm), amplitud térmica (°C), balance hídrico (mm) para septiembre 2025 en la región cañera Guanacaste Este.

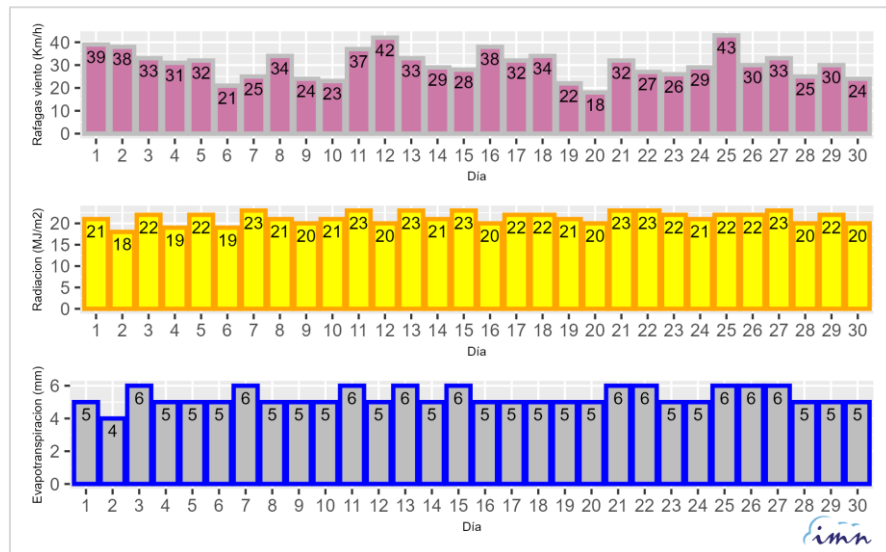


Figura 1.b. Promedio regional diario de viento máximo (km/h), radiación solar (MJ/m<sup>2</sup>) y evapotranspiración referencia (mm) para septiembre 2025 en la región cañera Guanacaste Este.

Octubre 2025 - Volumen 2 – Número 10

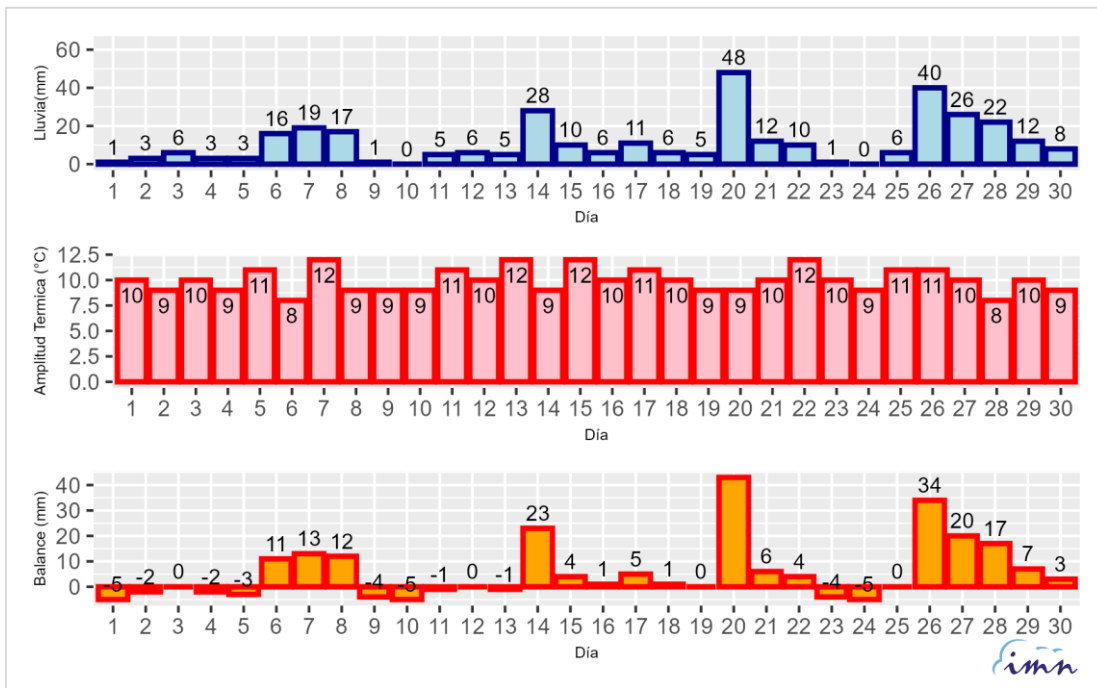


Figura 2.a. Promedio regional diario de precipitación (mm), amplitud térmica (°C), balance hídrico (mm) para septiembre 2025 en la región cañera Guanacaste Oeste.

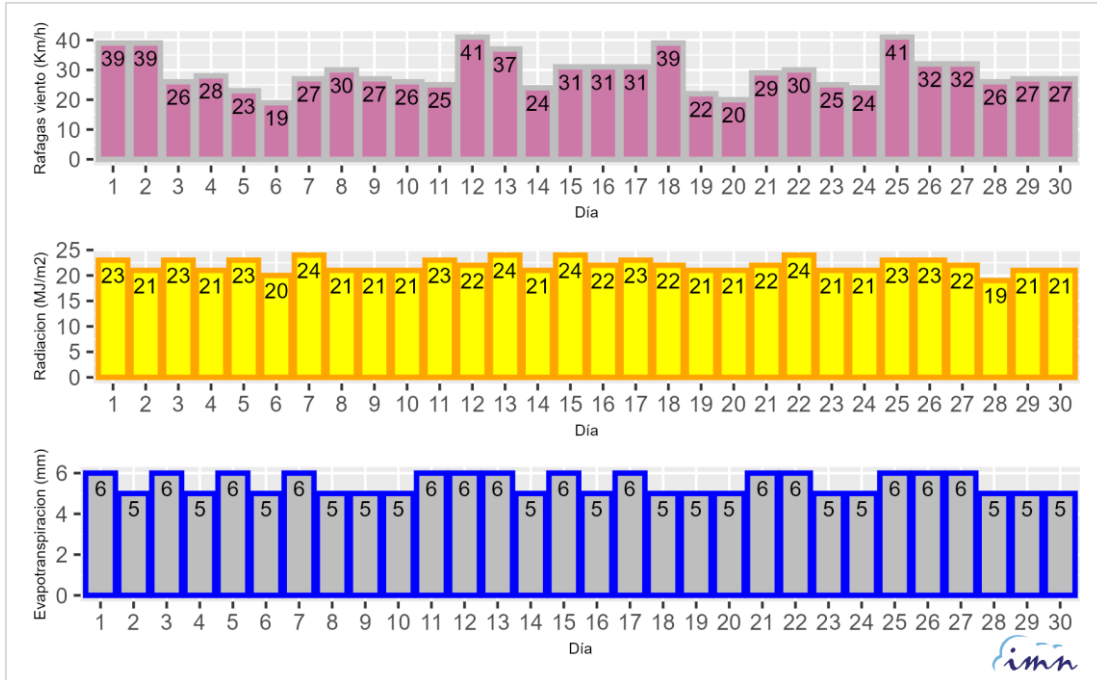


Figura 2.b. Promedio regional diario de viento máximo (Km/h), radiación solar (MJ/m²) y evapotranspiración referencia (mm) para septiembre 2025 en la región cañera Guanacaste Oeste.

Octubre 2025 - Volumen 2 – Número 10

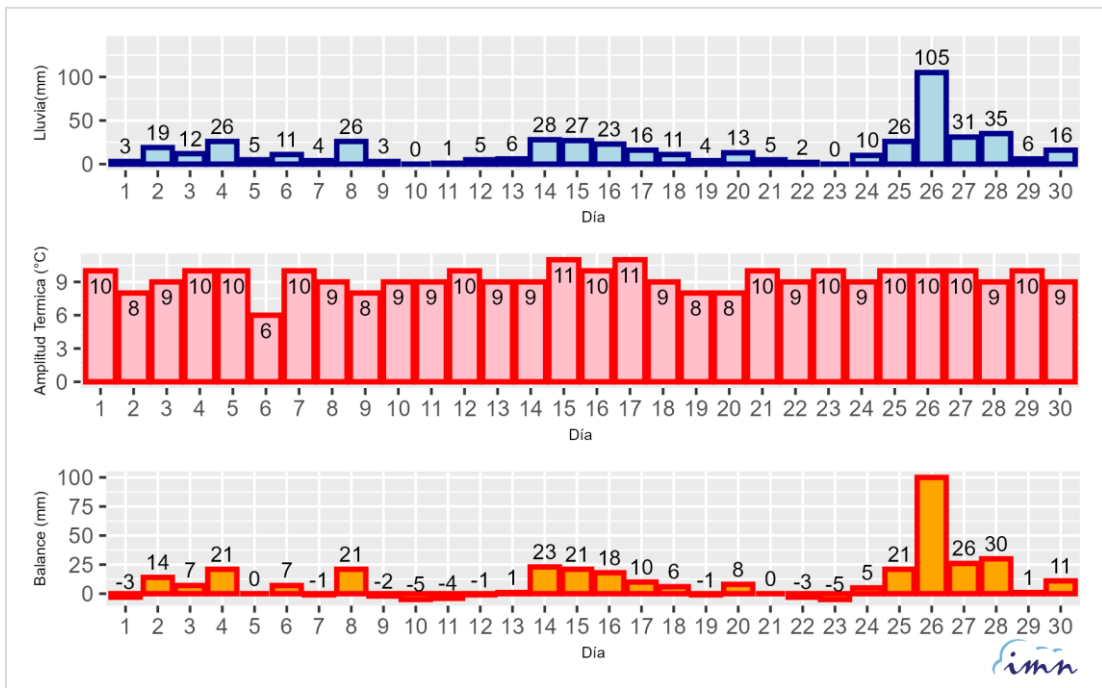


Figura 3.a. Promedio diario de precipitación (mm), amplitud térmica (°C), balance hídrico (mm) para septiembre 2025 en la región cañera Puntarenas.

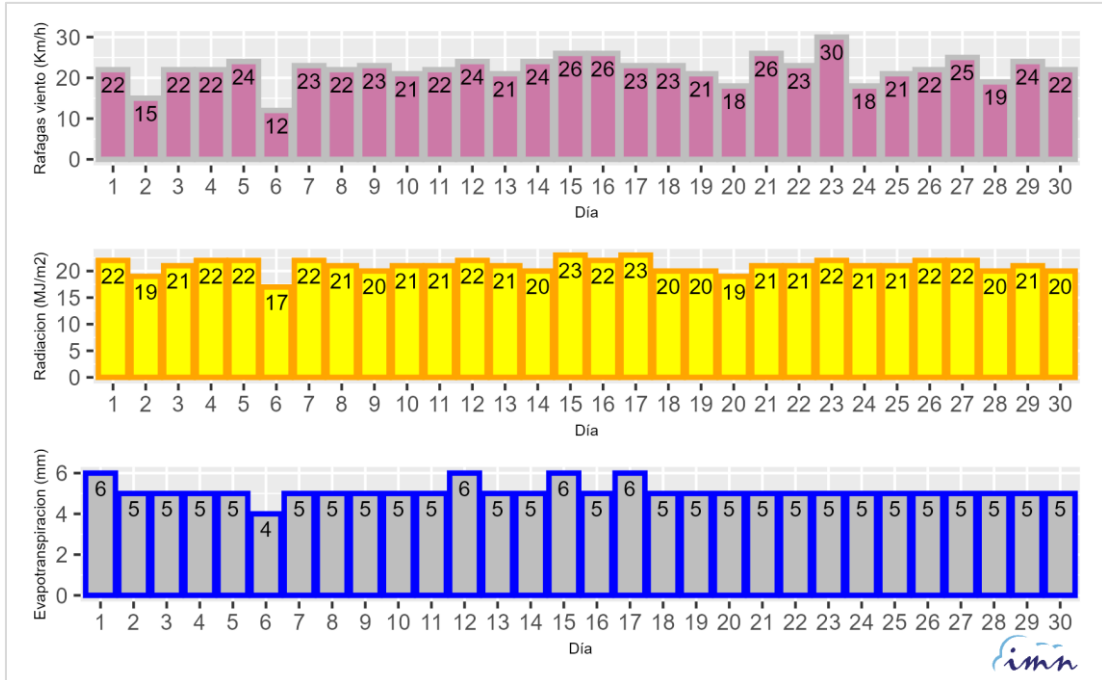


Figura 3.b. Promedio diario de viento máximo (Km/h), radiación solar (MJ/m²) y evapotranspiración referencia (mm) para septiembre 2025 en la región cañera Puntarenas.

Octubre 2025 - Volumen 2 – Número 10

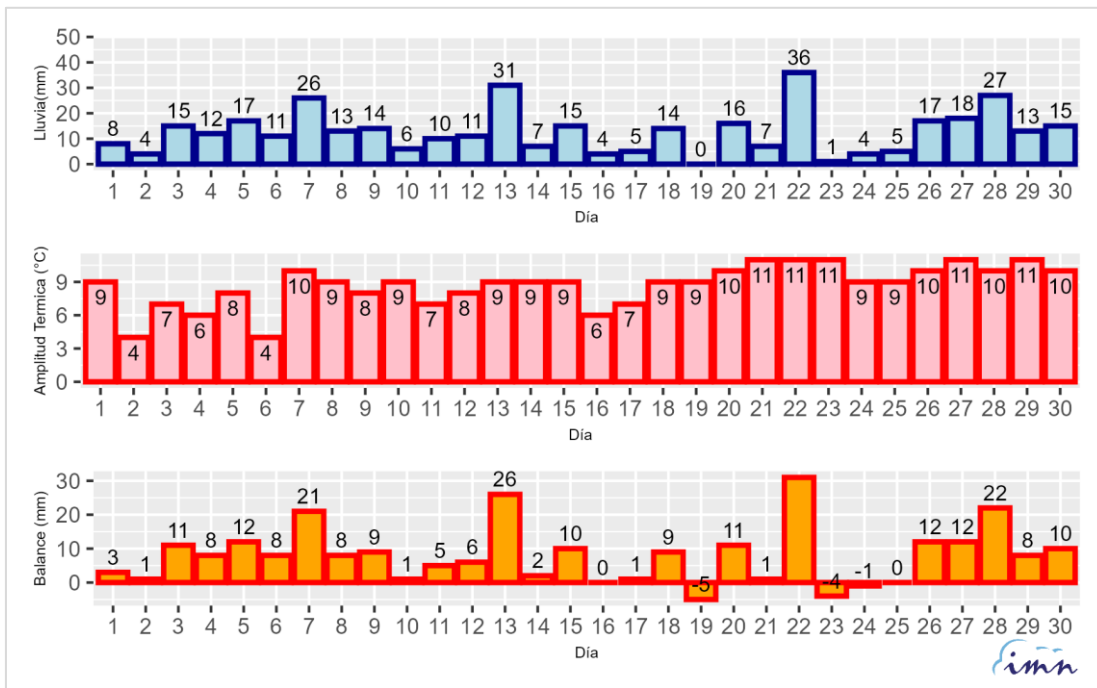


Figura 4.a. Promedio diario de precipitación (mm), amplitud térmica (°C), balance hídrico (mm) para septiembre 2025 en la región cañera **Región Norte**.

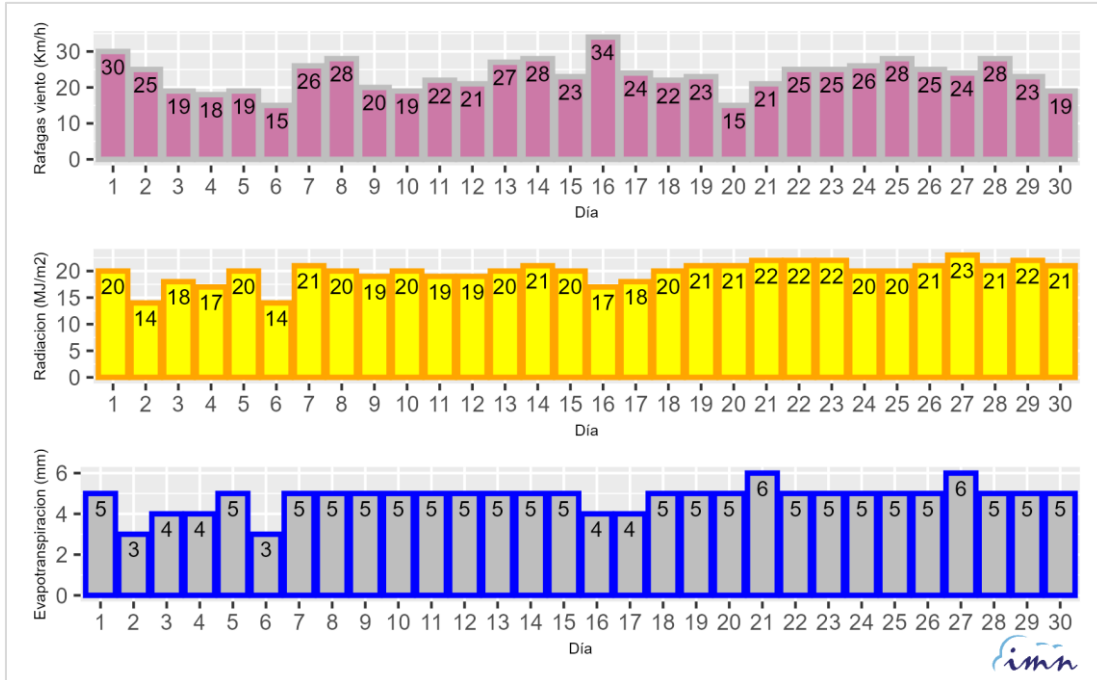


Figura 4.b. Promedio diario de viento máximo (Km/h), radiación solar (MJ/m²) y evapotranspiración referencia (mm) para septiembre 2025 en la región cañera **Región Norte**.

Octubre 2025 - Volumen 2 – Número 10

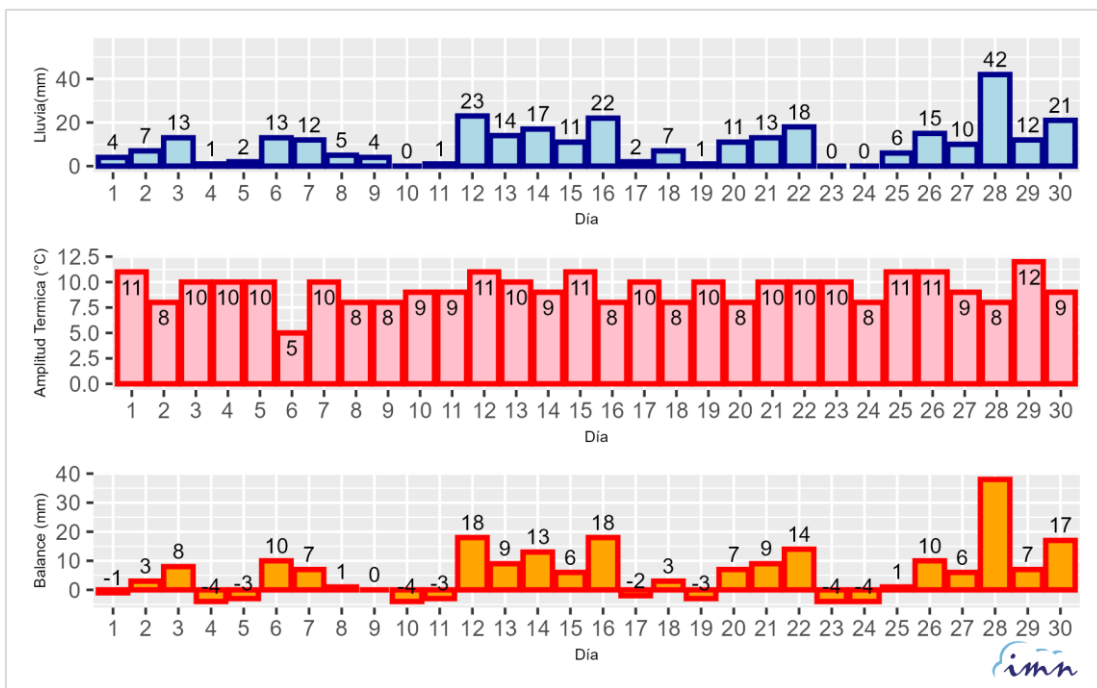


Figura 5.a. Promedio diario de precipitación (mm), amplitud térmica (°C), balance hídrico (mm) para septiembre 2025 en la región cañera Valle Central (Este y Oeste).

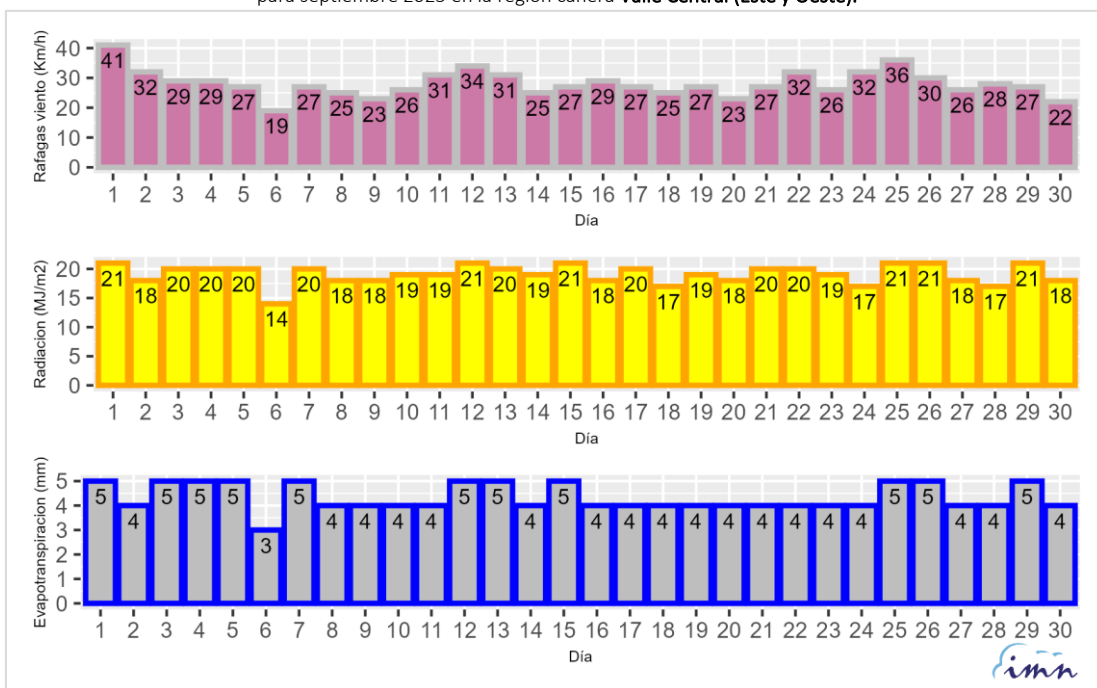


Figura 5.b. Promedio diario de viento máximo (Km/h), radiación solar (MJ/m²) y evapotranspiración referencia (mm) para septiembre 2025 en la región cañera Valle Central (Este y Oeste).

Octubre 2025 - Volumen 2 – Número 10

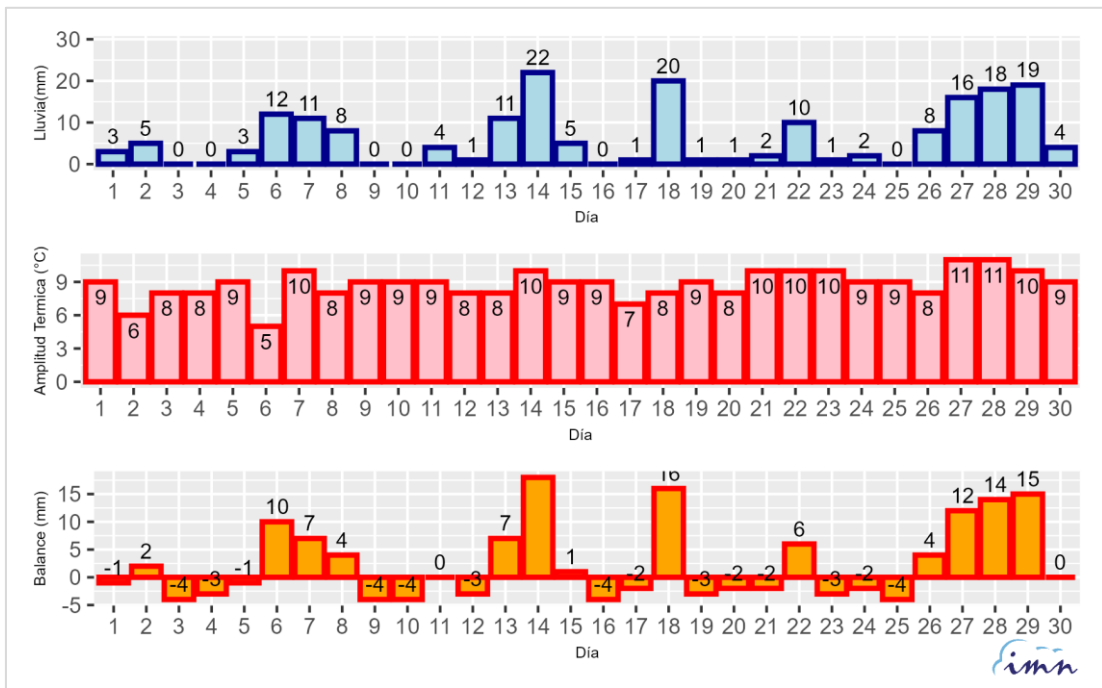


Figura 6. Promedio diario de precipitación (mm), amplitud térmica (°C), balance hídrico (mm) para septiembre 2025 en la región cañera Turrialba (Alta y Baja).

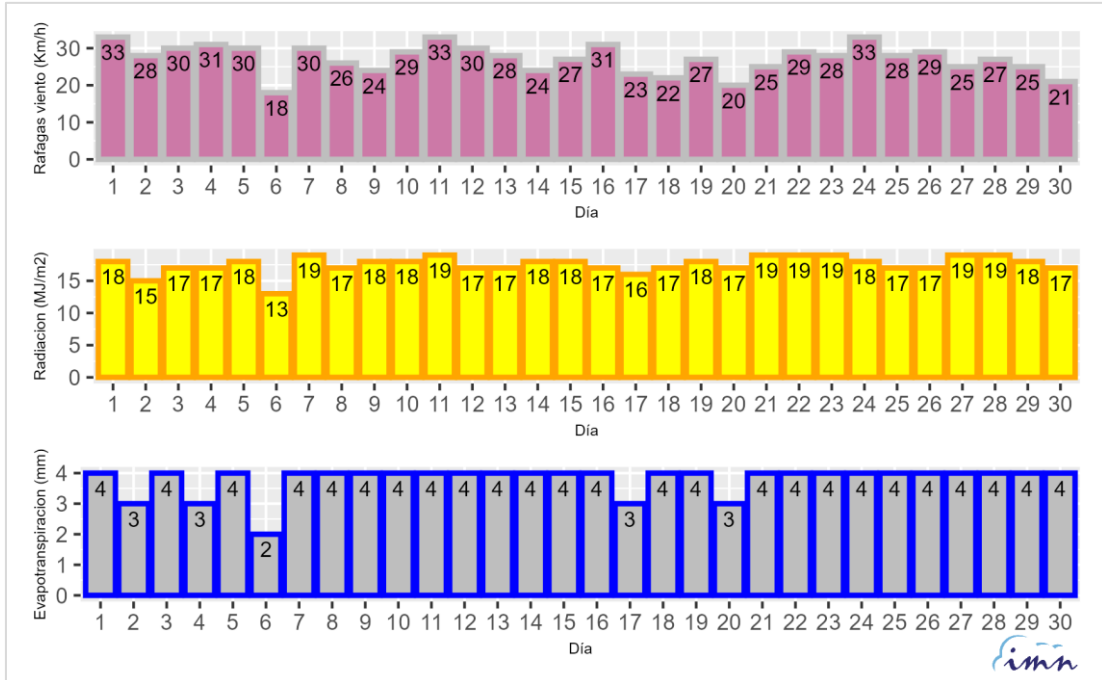


Figura 6. Promedio diario de viento máximo (Km/h), radiación solar (MJ/m²) y evapotranspiración referencia (mm) para septiembre 2025 en la región cañera Turrialba (Alta y Baja).

Octubre 2025 - Volumen 2 – Número 10

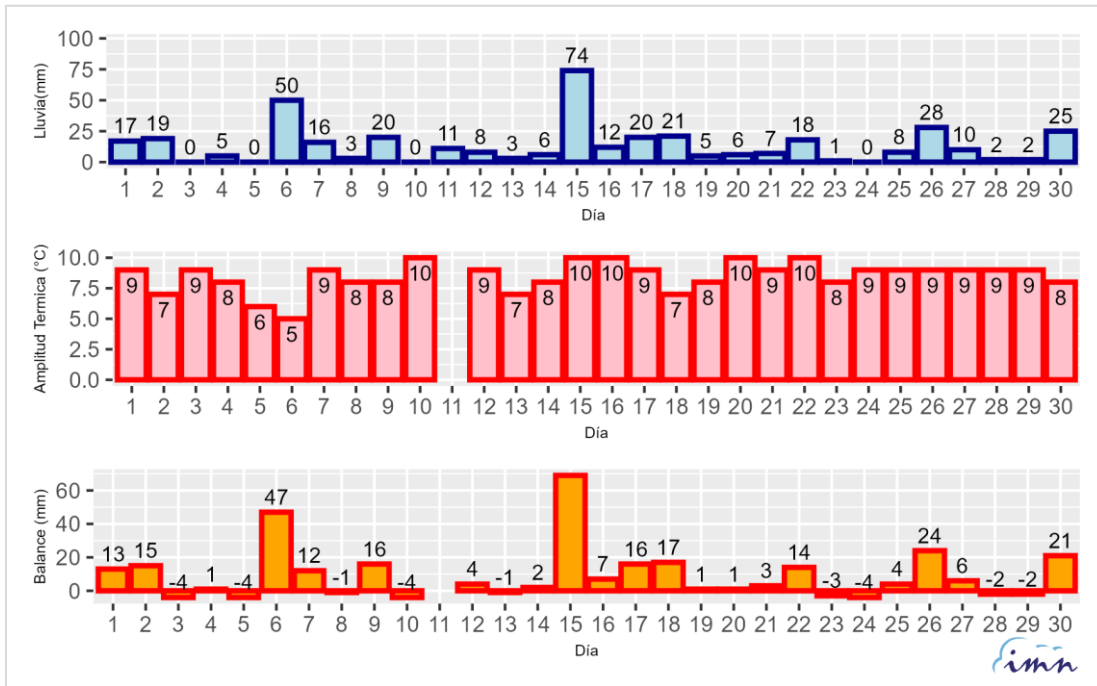


Figura 7.a. Promedio diario de precipitación (mm), amplitud térmica (°C), balance hídrico (mm) para septiembre 2025 en la región cañera **Región Sur**.

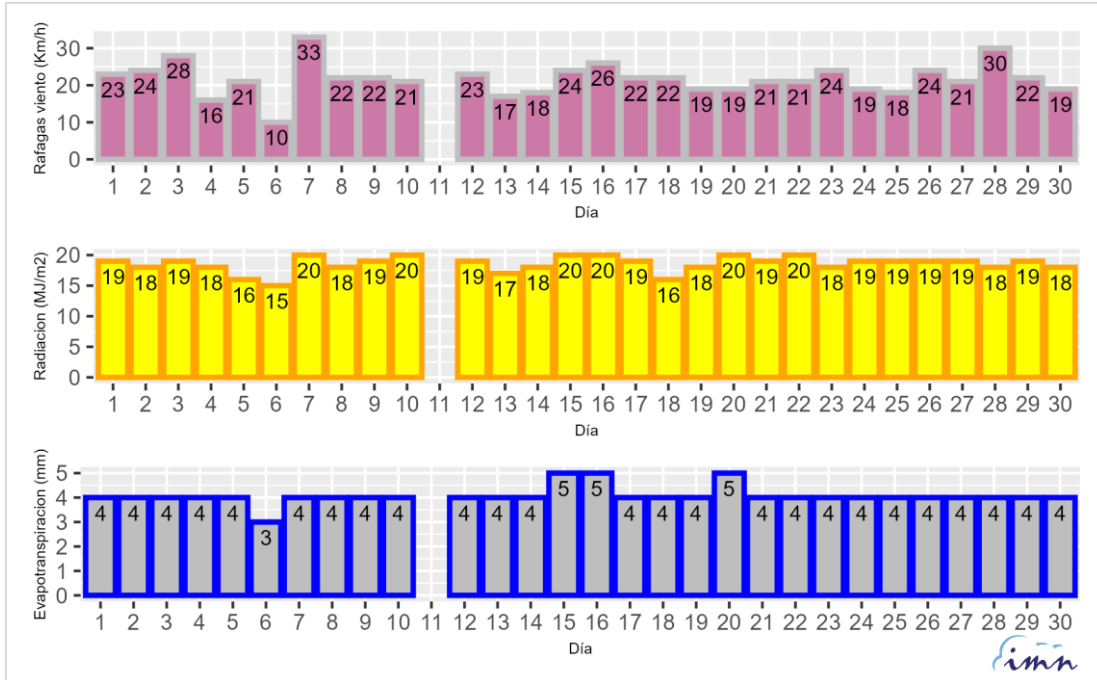


Figura 7.b. Promedio diario de viento máximo (Km/h), radiación solar (MJ/m²) y evapotranspiración referencia (mm) para septiembre 2025 en la región cañera **Región Sur**.

Octubre 2025 - Volumen 2 – Número 10

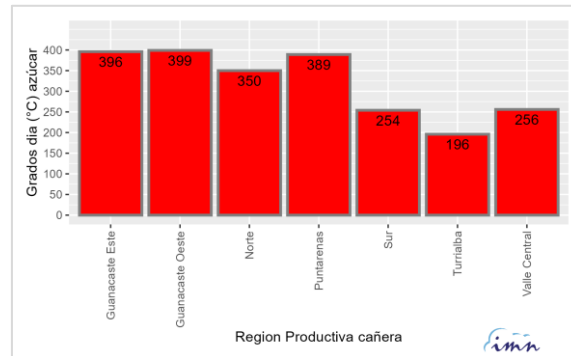
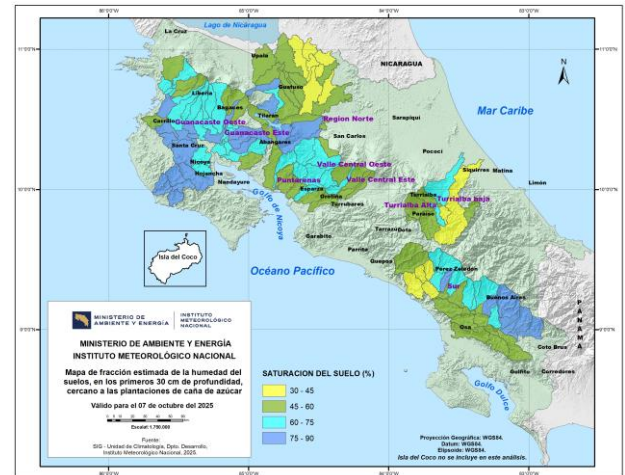


Figura 8. Grados día (°C) por región cañera para septiembre 2025 en la región cañeras.

Las figuras 1 a 8 muestran a detalle el comportamiento diario durante septiembre, promediado por cada región productiva cañera del país, específicamente de aquellos elementos climáticos de interés para el sector cañero nacional. Donde las variables observadas son lluvia, ráfagas de viento y humedad relativa; mientras las demás son estimadas. Además, se incluyen mapas quincenales de las variables de interés al final de este documento.

## 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 y como se observa en la figura 9; tanto la Región Guanacaste (Oeste y Este) mantienen entre 45% y 90% de saturación; mientras las Regiones Turrialba Alta (> 1000 m.s.n.m.) como la Región Turrialba Baja (600-900 m.s.n.m.) tienen entre 30% y 75%; las regiones Puntarenas y Valle Central (Oeste y Este) presentan entre 45% y 75% de humedad; no solo la Región Norte sino también la Región Sur contienen entre 30% y 75% de humedad.



## IMN LE RECOMIENDA

Mantenerse informado con los avisos emitidos por el IMN en:



@IMNCR



Instituto Meteorológico Nacional CR



@InstitutoMeteorologicoNacional

[www.imn.ac.cr](http://www.imn.ac.cr)

LAICA LE RECOMIENDA

## Región Norte

**B 77-95**

Progenitores desconocidos



### Aspecto general

Tallo con leve zigzaguo, regular cantidad de cera y poca cantidad de manchas negras, color expuesto al sol morado y color no expuesto al sol verde claro.

### Datos de producción

| Características            | B 77-95    |
|----------------------------|------------|
| Tallos molederos/m         | 11         |
| Grosor (cm)                | 3          |
| Altura (m)                 | 3          |
| Despaje                    | Facil      |
| Floración                  | Baja       |
| Corcho tallo sin flor      | Bajo       |
| % de fibra                 | 13         |
| Maduración                 | Temprana   |
| Habito de crecimiento      | Erecto     |
| Cierre de campo            | Intermedio |
| Resistencia al volcamiento | Bueno      |

### Recomendaciones

Buena opción para suelos bien drenados y de baja fertilidad. Alta concentración de sacarosa en cualquier tercio de cosecha. Sin enfermedades limitantes.



Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar  
Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar  
Santa Gertrudis Sur, Grecia, Alajuela.

## NOTA TÉCNICA

## Fotorrespiración en la caña de azúcar

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

chavessolera@gmail.com

Especialista en el cultivo de la Caña de Azúcar

Cuando de producción se habla muchas veces se emiten y dan por ciertos, conocidos y aceptados numerosos conceptos, principios y eventos importantes sin importar su naturaleza, la mayoría de ellos vinculados con el objetivo principal procurado o juzgado por quién las expresa; esto sin entrar en mayor detalle, valoración y menos aún profundización. La agricultura no está exenta de esa inconveniente y difundida práctica, muy particularmente cuando de técnica y tecnología se trata, sobre todo si los involucrados son profesionales y más aún aquellos que se nombran y reconocen como calificados “expertos” en el ramo. Propiamente en la agricultura se escucha por lo habitual a algunos hablar con mucha propiedad y autoridad sobre fotosíntesis, fotosistemas y ciclo de Calvin, metabolismo, respiración y ciclo de Krebs, hormonas, factores genéticos, procesos de síntesis, absorción de nutrientes, mineralización de la materia orgánica y conceptos aún más complejos como crecimiento y desarrollo, entre otros. Esa verbalización se hace la mayoría de las veces de manera normal y habitual como parte de la labor profesional, pero otras veces es intencional y consciente del efecto e impacto que provoca sobre quién la recibe, sobre todo si es un agricultor sin formación universitaria en la rama.

Surge de inmediato la válida y obligada pregunta ¿Tienen de verdad esas personas conocimiento pleno y profundo de lo que dicen? ¿Están imbuidos y actualizados sobre el contenido y los alcances de esos conceptos? ¿Podrían esos profesionales explicar, vincular y articular lo que mencionan con certeza con lo que presumiblemente desean resolver y justificar? son muchas las inquietudes que surgen al respecto, la mayoría de ellas dudas sobre el verdadero conocimiento y aplicación de lo aseverado. Ciertamente una simple y buena pregunta de ubicación podría ser suficiente para desenmascarar la realidad y reconocer que la situación es otra; el problema es que la mayoría de las veces tanto fuente (profesional) como receptor (agricultor) se encuentran en el mismo plano de ignorancia, desconocimiento y/o desactualización que convierte la situación en “normal y aceptable”. En el caso de un agricultor es comprensible que no hay razón alguna que justifique tenga que conocer sobre esos temas de alto trasfondo técnico; entre profesionales es obligado que los conozca.

Ciertamente no todos pueden y deben saber de todo, pero si resulta inaceptable e injustificable que un profesional que se considere “experto o especialista en un tema o un cultivo” ignore,

desconozca o no se actualice en relación a conceptos fundamentales que constituyen parte esencial de su formación y obligación conocer a profundidad, con el objeto de utilizarlos en su argumentación para comprender y explicar con certeza lo que ocurre en el campo. Es comprensible, aunque nunca aceptable que muchas veces desde los programas de estudio universitario, hay tópicos que nunca más un profesional vuelve a revisar y actualizar.

Por lo general mediante respuestas genéricas y muy creativas se contesta una pregunta difícil, se evade y resuelve un problema complejo o magnifica un asunto diciendo con la simpleza del caso: *es por causa de un problema ambiental o debido a factores climáticos, tiene que ver con el desarrollo, el metabolismo es la causa, ocurrió por afectación de la fotosíntesis*, lo que como sabemos en el fondo técnico no dice nada. Me decía hace muchos años un apreciado profesor de economía en una “exacerbada” discusión técnica que sostuvimos sobre productividad agrícola, con certeza o no, no juzgo, que los ingenieros siempre respondíamos con elementos genéricos como los apuntados anteriormente y nunca puntuales atinentes a los problemas del campo, con el fin de confundir, evadir y no responder a un cuestionamiento. Mi respuesta fue muy simple “y si le hablo sobre ecofisiología, fenología y metabolismo será acaso que usted lo comprenderá”. Lo cierto es que un “especialista de un cultivo” en este caso de caña de azúcar tiene la obligación de conocer y poder explicar con absoluta certeza y sencillas lo que insinúa en su dictamen, diagnóstico o recomendación; pues de lo contrario es mejor no hacer referencia a conceptos que no maneja y dedicarse por consecuencia a estudiar el tema para no caer en la mediocridad y hasta en el ridículo.

Por los motivos anteriores, se espera por medio del presente documento abordar y exponer con algún detalle sobre un tópico fisiológico importante, un tanto teórico pero aplicable al campo, relacionado directamente con la planta de caña de azúcar, como es el concerniente a la **fotorrespiración**; actividad cuya presencia o ausencia caracteriza y tipifica el potencial fisiológico de un vegetal y explica parcialmente en el presente caso la reconocida capacidad fotosintética y agroproductiva que posee la caña de azúcar.

### Fisiología y metabolismo

El vocabulario habitual y ordinario empleado por profesionales, técnicos y productores al referirse a eventos biológicos, está por lo general compuesto de una terminología muy especializada en la cual, sin embargo por desconocimiento o indolencia se cometen errores que conducen a considerar sinónimos o antónimos cosas que en su esencia teórico-práctica no lo son; lo que lleva inequívocamente a considerar como igual o en su caso diferente lo que no es. Un ejemplo de lo anterior acontece con la displicencia de considerar como iguales el crecimiento y el desarrollo cuando conceptual y biológicamente son cosas relacionadas aunque un tanto diferentes; lo mismo sucede con descomposición y mineralización, muchos ejemplos pueden citarse al respecto.

Lo anterior provoca que de manera indiferente se hable de **fisiología y metabolismo** como sinónimos cuando en realidad conceptualmente tienen diferencias de fondo importantes. Para armonizar al respecto y lograr una mejor comprensión seguidamente se establecen las diferencias:

**Fisiología:** Considera en su esencia los procesos metabólicos y fisiológicos que ocurren dentro de las células y los tejidos vegetales. Busca explicar cómo las plantas interactúan con su entorno (fenología) y cómo regulan los procesos vinculados que les permiten sobrevivir, superar condiciones de estrés, desarrollarse y prosperar. Está relacionado con el funcionamiento de las plantas considerando procesos vitales como la fotosíntesis, la respiración, la absorción y transporte de nutrimentos, las regulaciones hídricas, la síntesis y movilización de hormonas y sustancias, el crecimiento, el desarrollo, la floración, la reproducción y la fructificación, entre otros.

**Metabolismo:** Se refiere en lo específico al conjunto de reacciones químicas y bioquímicas que ocurren dentro de las células de las plantas para mantener la vida, incluyendo la fotosíntesis, la respiración, la síntesis y degradación de compuestos orgánicos, entre otros. Considera los procesos por los cuales las plantas interactúan con su entorno lo que les permite crecer, reproducirse y responder a las condiciones donde están ubicadas. En lo teórico se habla de Metabolismo Primario (procesos químicos que intervienen de forma directa) y Secundario (procesos que cumplen funciones importantes pero no son esenciales).

Queda claro a partir de lo anterior que la fisiología vegetal estudia cómo funcionan las plantas a nivel celular y molecular, considerando procesos como la fotosíntesis, la respiración y la transpiración, así como su crecimiento y desarrollo. Por otra parte, el metabolismo se refiere al conjunto de reacciones químicas que ocurren dentro de la planta para convertir nutrimentos en energía y componentes estructurales, afectando directamente el crecimiento y el desarrollo. Puede a partir de lo anterior asegurarse que *“La fisiología vegetal se ocupa de cómo las plantas se adaptan y responden a su entorno; mientras que el metabolismo vegetal se centra en las reacciones químicas que hacen posible esa respuesta y el crecimiento.”*

El metabolismo explica los mecanismos y procesos involucrados en la fisiología de un ser vivo. La fisiología va orientada a definir

procesos y sistemas, en tanto que el metabolismo a mecanismos y reacciones químicas lo que denota una clara diferencia entre ambos conceptos.

### Un poco sobre Fotosíntesis

Como se indicó con anterioridad la mención de la **fotorrespiración** como parte del mecanismo metabólico de algunas plantas es muy frecuente cuando de vegetales y agricultura se habla, sea con conocimiento pleno o sin él sobre el mismo; lo cierto, es que resulta común escuchar su alusión y citación, vale reconocer con una connotación por lo general negativa para fines de eficiencia productiva, motivo y razón por la cual es necesario conocer y profundizar en su conocimiento.

Para introducir el tema es obligado y casi insoslayable en primera instancia conocer con algún grado de detalle sobre los mecanismos de la fotorrespiración vinculados con la fotosíntesis, el ciclo del carbono aplicado en lo específico a la fijación del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el uso de la energía metabólica por las plantas; lo cual conduce a su vez a comentar en torno al aparato fotosintético y sus organelas, la estructura de la hoja, el origen taxonómico y los mecanismos de fijación del carbono de las plantas superiores, entre otros tópicos asociados.

Está suficientemente demostrado que los seres vivos requieren de energía para acompañar sus procesos naturales de crecimiento, desarrollo y manutención; siendo la fotosíntesis la fuente primaria de energía metabólica en el caso de las plantas, entre ellas como es obvio, la caña de azúcar (Arias, 1979). En primera instancia reconociendo como apuntaron Hall y Rao (1980) y Chaves (2023) *“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”*. Se dice también que la fotosíntesis es un proceso por el cual *“los vegetales clorofilados transforman la energía electromagnética en energía química potencial.”*

Definido de manera sencilla y en forma muy genérica puede describirse la fotosíntesis como el proceso natural por medio del cual las plantas superiores, algas y algunas bacterias emplean la energía radiante procedente de la luz solar, para convertir mediante reacciones metabólicas el agua y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en carbohidratos (azúcares-glucosa), liberando el oxígeno (O<sub>2</sub>) que respiramos y que constituye la base de la cadena alimenticia, fundamento de la vida en la tierra. En todo este proceso participan organelas celulares importantes como son los estomas, los cloroplastos constituidos de tilacoides, granum, estroma, lamelas, membranas, pigmentos, clorofila y también las vacuolas, peroxisomas y mitocondrias, entre otras; cada una cumpliendo una función determinante como explicaran Sage *et al* (2014), SUGARCANE (2014) y Chaves (2023, 2025) con algún detalle.

Es en ese particulado especializado donde operan y se desarrollan los mecanismos de captación del CO<sub>2</sub> atmosférico

movilizado por difusión, la hidrólisis del  $H_2O$ , la liberación de  $O_2$  y la generación de energía metabólica producida en los fotosistemas I y II representada por la coenzima nicotinamida adenina dinucleótido fosfato, que funciona como un transportador de electrones en las formas  $NADP^+$  (oxidada) como aceptor de electrones y  $NADPH$  (reducida) como donante de electrones, que incorpora un grupo fosfato en la denominada **fase lumínica** de la fotosíntesis. Esos dos compuestos energéticos son necesarios y vitales para la posterior formación de carbohidratos por la planta. De manera continua y sistemática se da luego a nivel celular la **fase oscura** donde empleando la energía ( $NADP^+$ ,  $NADPH$  y  $ATP$ ) generada en la fase lumínica se absorbe, fija y asimila el  $CO_2$  atmosférico y obtienen los productos fotosintéticos finales (hexosas). Virtud de contar con energía la presencia de luz en ésta fase es importante pero no obligada, motivo por el cual se le denomina oscura; sin embargo, la disponibilidad de esa energía es temporal hasta su agotamiento. Como se infiere el proceso opera y se dinamiza alrededor del  $CO_2$  tomado del aire mediante difusión (moléculas de gas se mueven desde una región de mayor concentración -externa- a una de menor concentración-interna- de la hoja).

Fisiológicamente el mecanismo fotosintético se clasifica en las plantas superiores de acuerdo con la forma como ocurre la fijación celular del carbono en: a) **Ciclo de Calvin-Benson** en plantas tipo  $C_3$ , b) **Ciclo de Hatch-Slack** en plantas  $C_4$  y c) El denominado **Metabolismo Ácido de las Crasuláceas** o **CAM**, caracterizados y descritos en lo esencial por Chaves (2023, 2025). La eficiencia en el uso de los recursos luz, agua y la tasa de fijación de  $CO_2$  atmosférico es diferente según el tipo y especie de planta que se trate.

Por simplicidad y buscando una mayor facilidad comprensiva, se reitera a continuación lo señalado por De las Rivas (2000a) al manifestar, que “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,  $H_2O$ ;  $CO_2$ ; nitratos,  $NO_3^-$ ; sulfatos,  $SO_4^{2-}$ , 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 al respecto, 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 pigmentos..... 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 ( $CO_2$ ) del aire.”

El resultado y producto de la fotosíntesis es como se indicó la liberación de oxígeno y la formación de carbohidratos (hexosas) como los monosacáridos glucosa y fructosa, el disacárido sacarosa o el polisacárido almidón de cadena larga. La síntesis de un monosacárido puede expresarse por medio de la siguiente ecuación que revela que para producir una molécula de hexosa ( $C_6H_{12}O_6$ ) son necesarias seis moléculas de  $CO_2$ :



Wikipedia (2025b) formula una sucinta e interesante secuencia estructurada y sistemática de algunos de los procesos metabólicos relacionados con la fotosíntesis, como se expone seguidamente:

- A. Reacciones dependientes de la luz (Fase luminosa):
  - a) Absorción de luz: los pigmentos fotosintéticos, como la clorofila, absorben la luz solar.
  - b) Fotólisis del agua: la luz absorbida impulsa la descomposición de moléculas de agua ( $H_2O$ ), liberando oxígeno ( $O_2$ ) como subproducto, además de electrones y protones.
  - c) Transporte de electrones: los electrones liberados en la fotólisis del agua viajan a través de una cadena de transporte de electrones, generando un gradiente de protones que impulsa la síntesis de  $ATP$  (Adenosín Trifosfato o Trifosfato de Adenosina) como molécula portadora de la energía primaria.
  - d) Formación de  $NADPH$ : los electrones también se utilizan para reducir el  $NADP^+$  a  $NADPH$ , otra molécula de almacenamiento de energía.
- B. Reacciones independientes de la luz (Fase Oscura o Ciclo de Calvin):
  - e) Fijación del carbono: el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) se incorpora a una molécula orgánica existente, la ribulosa-1,5-bisfosfato (RuBP), mediante la acción de la enzima RuBisCO (ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa) que cataliza (acelera) la fijación del  $CO_2$ .
  - f) Reducción: el compuesto resultante se reduce (gana electrones) utilizando la energía del  $ATP$  y el poder reductor (cede electrones) del  $NADPH$ , produciendo gliceraldehído-3-fosfato (G3P), un azúcar de tres carbonos. El G3P es el punto de partida para la síntesis de glucosa y otros carbohidratos. El 3-PGA se convierte en G3P utilizando la energía del  $ATP$  y el  $NADPH$ .
  - g) Regeneración de la RuBP: parte del G3P se utiliza para regenerar RuBP, permitiendo que el ciclo continúe.

- h) Producción de glucosa: las moléculas de G3P pueden combinarse para formar glucosa ( $C_6H_{12}O_6$ ), un azúcar de seis carbonos (hexosa), que es la principal fuente de energía de la planta.

En todo este mecanismo la hidratación y nutrición de la planta desempeñan un papel fundamental.

### Fotorrespiración ¿Qué es?

En primera instancia es imperativo saber que la respiración en órganos fotosintéticos acontece por medio de dos procesos básicos:

- Respiración normal que ocurre en todas las células y es conocida como “*respiración oscura*” que se diferencia de la
- “*Fotorrespiración*” que es una respiración inducida por la luz

Ambos procesos son espacialmente separados dentro de las células, pues la respiración oscura ocurre en el citoplasma y la mitocondria; en tanto que la fotorrespiración se da en los cloroplastos, el peroxisoma y la mitocondria de una manera cooperativa.

Villalobos (2001) ubica la fotorrespiración como un rasgo único y característico de la fotosíntesis vía  $C_3$ , que recibe ese nombre en referencia a la evolución del  $CO_2$  estimulado por la luz; señalando que en el sentido bioquímico el mecanismo no corresponde por sus características a un proceso de respiración vegetal. Sin embargo, como el proceso ocurre en presencia de luz y el balance es afín 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 más bien 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.

En lo específico y para lograr un mejor entendimiento del tema abordado debe indicarse que los cloroplastos son organelas presentes en células de plantas y algas, responsables de realizar la fotosíntesis convirtiendo la energía lumínica en energía química que es luego almacenada en carbohidratos como moléculas de azúcar (glucosa); para lo cual están circundados por una doble membrana que encierra un espacio interno llamado estroma, donde se ubican los tilacoides que contienen pigmentos como la clorofila. La mitocondria por su parte es un orgánulo celular esencial presente en las células eucariotas (con núcleo definido y delimitado por una membrana nuclear) y que actúa como la “*central energética*” de la célula. Su función principal es producir la mayor parte de la energía que la célula necesita para funcionar, la cual es almacenada en moléculas de ATP. Los peroxisomas son orgánulos celulares que participan en la fotorrespiración y la conversión de ácidos grasos en carbohidratos, mediante la oxidación (oxígeno se combina con otras sustancias) de productos residuales de la fijación del  $CO_2$  en conjunto con las mitocondrias y los cloroplastos. El Citosol es la parte líquida del citoplasma celular, donde se encuentran suspendidas las organelas.

La fotorrespiración es un proceso metabólico importante que ocurre como condicionante en las plantas con cloroplastos en presencia de luz, donde la enzima RuBisCO fija oxígeno en lugar de dióxido de carbono (Figura 1), lo que conduce a la pérdida de ese carbono y esa energía como insumos de alto valor. Este mecanismo es considerado como ineficiente desde el punto de vista energético ya que compete directamente con la fotosíntesis con la cual está ligado, liberando  $CO_2$  y consumiendo energía como ATP lo que no es fisiológicamente bueno para la planta. Se estima que la fotorrespiración puede reducir en un 30% la eficiencia y productividad de la fotosíntesis como lo indica Villalobos (2001). Un aumento en la concentración de  $CO_2$  se traduce en una disminución de la actividad fotosintética, principalmente en las especies  $C_3$ . En contraste, las especies  $C_4$  como la caña de azúcar no son severamente afectadas por la variación observada en la concentración de  $O_2$ . El balance energético final de la fotorrespiración es negativo. Conceptualmente se le denomina y conoce como fotorrespiración porque usa oxígeno y libera  $CO_2$  en presencia de luz, siendo también conocida y nombrada **Ciclo de la Oxidación Fotosintética del Carbón (OFC)**.

En todo esto debe tenerse presente que la enzima RuBisCO no es específica ni exclusiva para el  $CO_2$ , pues según Villalobos (2001) funciona en condiciones normales en un 80% como carboxilasa y en un 20% como oxigenasa. La fotosíntesis líquida se define como el cociente y la diferencia establecida entre la fotosíntesis absoluta y la fotorrespiración donde opera como una pérdida. Para mejor entendimiento debe tenerse presente que la fijación líquida de  $CO_2$  es la cantidad en que la fotosíntesis excede a la respiración, lo que marca diferencia entre especies  $C_3$  y  $C_4$ .

Diola (2012) comentando sobre fotosíntesis y respiración asegura que el Punto de Compensación de  $CO_2$  para una planta  $C_3$  es mayor (20 a 100  $\mu l/l$ ) que para una  $C_4$  (0 a 5  $\mu l/l$ ), lo que está directamente asociado con la presencia de la fotorrespiración en las especies  $C_3$  y ausencia en las  $C_4$ .

Desde una perspectiva fisiológica la fotorrespiración que es también conocida como **metabolismo  $C_2$** , es concebida como la ruta metabólica de las plantas encargada del procesamiento del 2-fosfoglicolato hasta 3-fosfoglicerato, con una recuperación de carbono de hasta un 75% (Bauwe *et al*, 2010; Peterhansel y Maurino, 2011).

El complejo mecanismo de acción metabólica a través del cual opera la fotorrespiración en las plantas es expuesto gráficamente en la Figura 1 y comentado con gran detalle técnico especializado por Wilkpedia (2025a), lo cual resulta obligado para quienes deseen conocer con mayor profundidad sobre las reacciones metabólicas implicadas en el proceso. Dicho mecanismo se da como sigue:

“En el estroma del cloroplasto, la RuBisCO cataliza a la ribulosa-1,5-bisfosfato con oxígeno y da como resultado una molécula de 2-fosfoglicolato, que se desfosforila por la 2-fosfoglicolato fosfatasa a glicolato, liberándose un fosfato inorgánico. El glicolato se transporta hacia el peroxisoma.

Octubre 2025 - Volumen 2 – Número 10

En el peroxisoma, la glicolato oxidasa cataliza la oxidación del glicolato hacia glioxilato y  $H_2O_2$ , ese último se procesa por las catalasas del peroxisoma hacia agua y  $O_2$ . Posteriormente, el glioxilato puede convertirse en glicina por la transaminación con glutamato por la glutamato-glioxilato aminotransferasa, dando origen a un alfa-cetoglutarato (que se retomará más adelante); o por transaminación con serina, mediada por la serina-glioxilato aminotransferasa, que origina también hidroxipiruvato (reacción importante en un paso posterior). La glicina se transporta hacia la mitocondria.

En la mitocondria ocurre una reacción compuesta. Para que ocurra, se requiere que dos glicinas lleguen a la mitocondria; es decir, que se repitan otra vez los pasos anteriores. Una de las glicinas se descarboxila por el complejo glicina descarboxilasa, generando la liberación de  $CO_2$ ,  $NH_4^+$  (ion amonio),  $NADH+H^+$  y 5,10-metilen-tetrahidrofolato. La serina hidroximetiltransferasa utiliza este último para sintetizar serina, a partir de la unión de un carbono a glicina restante. El ion amonio puede transportarse hacia el cloroplasto, donde sirve para reconstituir el glutamato anteriormente, mediante la acción de la glutamina sintetasa y la glutamina-glutarato aminotransferasa. Esta última reacción es la que le otorga una mala reputación a la fotorrespiración, ya que aquí hay una pérdida del 25 % de carbono en forma de  $CO_2$ , lo cual no resulta beneficioso para la planta. La serina viaja hacia el peroxisoma.

En el peroxisoma, la serina, como se mencionó anteriormente, se utiliza para transaminar el glioxilato y se transforma en hidroxipiruvato. Si el peroxisoma cuenta con las enzimas para generar  $NADH+H^+$ , la hidroxipiruvato reductasa lo convierte en glicerato. En caso contrario, el hidroxipiruvato puede salir al citosol y pasar por la misma reacción con la enzima homóloga de citoplasma. Finalmente, el glicerato viaja hacia el cloroplasto. De vuelta al estroma del cloroplasto, el glicerato, con la transferencia de un grupo fosfato de ATP, por la glicerato cinasa, se vuelve 3-fosfoglicerato, molécula que puede ingresar al ciclo de Calvin.

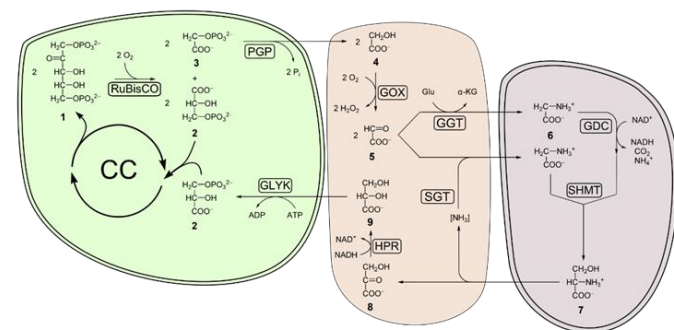


Figura 1. Fotorrespiración.

(Fuente:

<https://es.wikipedia.org/wiki/Fotorrespiraci%C3%B3n#/media/Archivo:Photorespiration.svg>)

Fue en los años 50, con la aplicación de los analizadores infrarrojos de gas aplicados en estudios de intercambio de gases en plantas, cuando se descubrió formalmente la existencia de la

fotorrespiración. Decker (1955) observó que la tasa de respiración era mayor en condiciones de luz en relación con la oscuridad, conceptualizando con ello la fotorrespiración como “el exceso de respiración que ocurre en las células fotosintéticas debido a la ausencia de  $CO_2$  y al incremento de  $O_2$ ”.

**La fotorrespiración es fisiológicamente concebida como una vía metabólica alterna que produce importantes pérdidas de  $CO_2$  durante el proceso metabólico, que compite directamente con el Ciclo de Calvin; razón y circunstancia suficiente para mantener una atención especial del proceso.**

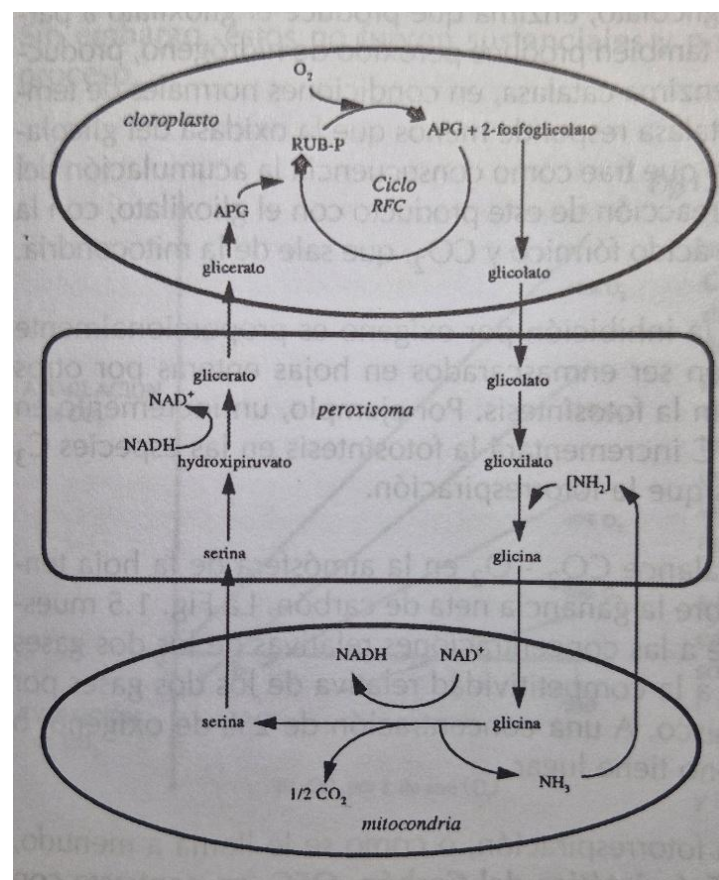


Figura 2. Ruta metabólica de la fotorrespiración. (Fuente: Villalobos, 2001).

Cuando un vegetal mantiene en condiciones normales sus estomas abiertos, el  $CO_2$  por razones de mayor concentración externa se difunde hacia el interior de la célula, mientras que el  $O_2$  y el vapor de agua se difunden por el contrario hacia fuera de la cámara subestomatática; en cuyo caso la fotorrespiración no opera o su actividad se reduce al mínimo. Sin embargo, cuando una planta en condiciones anormales cierra por alguna circunstancia estresante de índole climático, fenológico, hídrico, nutricional o de otro tipo sus estomas para controlar y disminuir como mecanismo antiestrés la pérdida de agua por transpiración, el  $O_2$  generado por la fotosíntesis en su fase lumínica consecuentemente se acumula internamente, pues no puede ser

liberado al exterior. No puede olvidarse que **con los estomas abiertos o cerrados la planta debe seguir respirando (glicólisis, Ciclo de Krebs y transporte electrónico en la mitocondria) lo que ocurre tanto en la fase lumínica como oscura y requiere para ello disponer de energía.**

En esas condiciones, la fotorrespiración (con luz) aumenta debido a la mayor proporción  $O_2/CO_2$  en el medio celular. Según Diola (2012) la fotorrespiración depende del  $CO_2$  disponible y de la presencia de  $O_2$  libre en la célula. Hay que considerar que tanto el  $CO_2$  como el  $O_2$  compiten por la misma enzima, afectando y disminuyendo la tasa de fijación de  $CO_2$ . Estiman Larcher (2003) y Nobel (2009) que la absorción máxima de  $CO_2$  en plantas  $C_3$  se logra a temperaturas entre 20 y 35°C, pero en las  $C_4$  se da entre 30 y 45°C; diferencia, consideran, es debida al efecto provocado por la fotorrespiración en las primeras. En la Figura 2 se presenta para mejor comprensión de manera simple y sucinta la ruta metabólica de la fotorrespiración en plantas con sistema fotosintético  $C_3$ .

De acuerdo con esa Figura la fotorrespiración presente en plantas  $C_3$  ocurre cuando la enzima RuBisCO fija  $O_2$  en lugar de  $CO_2$  (sección superior), no incorporando carbono y generando mediante reacciones complejas un compuesto de 2C (2-fosfoglicolato) tóxico que la planta debe eliminar metabólicamente. Como se aprecia asimismo, en esos procesos metabólicos se da el intercambio de sustancias entre las tres organelas (cloroplasto, peroxisoma, mitocondria) y la consecuente pérdida de  $CO_2$  en la descarboxilación de la glicina, como se observa en las secciones media e inferior de la Figura 2 (Villalobos, 2001).

La fotorrespiración es en general estimulada por tres factores adicionales de la alta densidad del flujo luminoso, como son: a) altos niveles de  $O_2$ , b) bajos niveles de  $CO_2$  y c) altas temperaturas.

Se encontró con la investigación que al separar las células del haz vascular de las células del mesófilo en especies  $C_4$  solo las células de la vaina fotorrespiran.

Es importante mencionar que la fotorrespiración presenta limitantes metodológicas para poder determinarla y cuantificarla, no siendo las técnicas propuestas absolutamente satisfactorias, lo que permite realizar solo estimaciones y aproximaciones; sin embargo, la medida del Punto de Compensación del  $CO_2$  es aceptada. Ese punto corresponde al estado donde las concentraciones de  $CO_2$  de la atmósfera llega a establecer un equilibrio entre los intercambios del gas surgidos entre la atmósfera y la hoja de la planta; o sea, cuando la cantidad de  $CO_2$  absorbido se iguala con el  $CO_2$  liberado (Awad y Castro 1983; Novaes, 1987). Es también conocido que la tasa de respiración en las hojas de las especies  $C_3$  es por lo general 2 o 3 veces más intensa en condiciones de luminosidad que en oscuridad.

En el Cuadro 1 se presenta un esquema comparativo donde se marcan las características, propiedades y atributos que establecen las afinidades, como también las diferencias, entre la denominada respiración oscura y la fotorrespiración.

| N° | Fotorrespiración                                   | Respiración oscura                                |
|----|--|---|
| 1  | Tiene lugar en las células verdes fotosintéticas   | Tiene lugar en todas las células vivas            |
| 2  | Ocurre únicamente en presencia de luz              | Sucedecede todo el tiempo                         |
| 3  | Involucra cloroplastos, peroxisomas y mitocondrias | Involucra únicamente las mitocondrias             |
| 4  | No implica glucólisis, Ciclo de Krebs ni ETS       | Implica la glucólisis, el Ciclo de Krebs y el ETS |
| 5  | El sustrato es el ácido glicólico                  | El sustrato son carbohidratos, proteínas o grasas |
| 6  | No es esencial para la supervivencia               | Es esencial para la supervivencia                 |
| 7  | Sin fosforilación y producción de ATP              | La fosforilación produce energía ATP              |
| 8  | El $NADH_2$ se oxida a $NAD^+$                     | $NAD^+$ es reducido a $NADH_2$                    |
| 9  | Se produce peróxido de hidrógeno                   | No se produce peróxido de hidrógeno               |
| 10 | Los productos finales son $CO_2$ y PGA             | Los productos finales son $CO_2$ y agua           |

Fuente: Wikipedia (2025b).

La literatura especializada existente en torno al tema fotosintético con alusión específica a la fotorrespiración es muy vasta y variada en sus enfoques, como lo demuestran los aportes de Bull (1969), Irvine (1970), Levitt (1972), Alexander (1973), Nasyrov (1978), Hall y Rao (1980), Awad y Castro (1983), Larcher (1986, 2003), Caruso (1987), Lucchesi (1987), Novaes Magalhães (1985, 1987), Machado (1987), Rodrigues (1997), Medrano y Flexas (2000), De las Rivas (2000ab), Villalobos (2001), Nobel (2009), Diola (2012), Yamori *et al* (2014), Sage *et al* (2014), SUGARCANE (2014), Castro (2016), Walker *et al* (2016), Castro y Angelini (2017), Segura (2025) y Chaves (1988, 2020, 2023, 2025).

### ¿Dónde opera la fotorrespiración?

Dentro de la diversidad, complejidad y dinámica del proceso fotosintético de las plantas queda claro, que la fotorrespiración opera metabólicamente en la fase de fijación del carbono desarrollada en los cloroplastos. Según Villalobos (2001) es un proceso que ocurre en el mesófilo foliar (tejido que se encuentra entre las dos capas epidérmicas de las hojas), en presencia de luz y en donde la concentración de  $O_2$  es alta.

Indica Diola (2012) al respecto que las especies  $C_4$  concentran el  $CO_2$  en las células de la vaina vascular, donde se sitúa la RuBisCO, suprimiendo casi de forma completa y efectiva la actividad de la oxigenasa por parte de aquella enzima, eliminando con ello la fotorrespiración.

Las reacciones luminosas de la fotosíntesis liberan oxígeno, y a temperaturas más altas, se disuelve más oxígeno en el citosol celular por mayor actividad fotosintética. Por lo tanto, las altas intensidades de luz y las altas temperaturas (superiores a ~30°C) favorecen la segunda reacción y dan lugar a la fotorrespiración. La experiencia ha demostrado que la fotorrespiración se incrementa conforme la temperatura ambiente también aumenta, lo que sucede especialmente en zonas bajas con días claros, sin nubes y soleados, obviamente con cierre de estomas. Lo anterior conduce a que en circunstancias de alta temperatura, la tasa de fotorrespiración se eleve, llegando en ciertas condiciones a igualar la tasa de fotosíntesis; lo que lleva a interrumpir el ritmo de crecimiento vegetal. Esta manifestación es evidencia de que en condiciones cálidas y secas la

fotorrespiración se incrementa, a menos que la planta posea atributos y características especiales que le permitan atenuar y mitigar el proceso como sucede particularmente con los mecanismos fotosintéticos C<sub>4</sub> y CAM.

Las condiciones de anegamiento excesivo e inundación pueden también favorecer la fotorrespiración, lo cual no es sin embargo el escenario más común, considerando que es un proceso que ocurre en presencia de luz y altas concentraciones de O<sub>2</sub>, viéndose favorecida cuando las plantas tienen los estomas cerrados para evitar la pérdida de agua, lo que puede suceder durante las inundaciones. Sin embargo, el exceso de humedad también limita alternativamente la disponibilidad de CO<sub>2</sub> en el medio, lo que puede impactar la eficiencia de la fotosíntesis y, con ello, la fotorrespiración.

En ambientes, latitudes y condiciones donde las temperaturas son bajas las especies C<sub>3</sub> aventajan a las C<sub>4</sub> en su capacidad de resiliencia y sobrevivencia. Las C<sub>4</sub> por carecer de fotorrespiración, poseer una temperatura más elevada para operar la fotosíntesis y sufrir menos una reducción (≈30%) en la incorporación de CO<sub>2</sub> con estomas parcialmente cerrados por causa de la fotorrespiración, les permite adaptarse a condiciones donde las C<sub>3</sub> posiblemente tendrían problemas.

### ¿Qué efectos provoca?

En 1920, el premio Nobel de Fisiología (1931), el alemán Otto Heinrich Warburg (1883-1970) descubrió que el O<sub>2</sub> inhibía la fotosíntesis de las plantas; lo que posteriormente se conoció como el efecto *Warburg* el cual hace expresamente referencia a la inhibición de la fijación de carbono, y la consecuente inhibición de la fotosíntesis, causada por la presencia de altas concentraciones de oxígeno, como también lo señalaran Novaes (1985) y Eckardt (2005). Esa inhibición puede ser removida incrementando la concentración de CO<sub>2</sub>.

Considerando que igual que acontece con cualquier proceso de índole fisiológico y metabólico en los seres vivos sea humano, animal o vegetal siempre “una acción genera una reacción”. **El perjuicio fisiológico de la fotorrespiración surge cuando la enzima RuBisCO en lugar de utilizar siempre CO<sub>2</sub> atmosférico como sustrato, cambia, se desvía y recoge oxígeno (O<sub>2</sub>) del medio, incurriendo en el uso y la consecuente pérdida de energía (ATP y NADPH) y el carbono disponible como CO<sub>2</sub> que se libera al medio y no es aprovechado.**

Estiman Walker *et al* (2016) que una planta C<sub>3</sub> colocada a una temperatura de 25°C y con una concentración de CO<sub>2</sub> de 350 µg.l<sup>-1</sup> en la atmósfera, la asimilación neta de CO<sub>2</sub> se reduce en un 26% por causa de la fotorrespiración; como también se consume adicionalmente un 32% del ATP total y el 28% de todo el NADPH.

Con lo anterior queda claro que lo que sucede es una reversión del proceso fisiológico normal, donde la fotosíntesis operada en condiciones normales las plantas toman CO<sub>2</sub> del aire y liberan O<sub>2</sub> al medio; lo cual con la fotorrespiración el sistema se torna contrario y negativo para las plantas, pues el mecanismo desperdicia energía valiosa y disminuye consecuentemente la

síntesis de azúcares con afectación directa de la producción de biomasa.

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 (De las Rivas, 2000b).

### ¿Cuáles plantas y cuando se presenta?

Como declarara Chaves (2023, 2025) con algún detalle, los sistemas fotosintéticos determinan e inciden directamente en la eficiencia metabólica y consecuentemente en la capacidad potencial agroproductiva de las plantas, motivo por el cual la estructura anatómica, la ruta seguida en la captación del CO<sub>2</sub> y el uso eficiente de la energía generada (ATP) es clave en la fisiología y la capacidad productiva de cualquier vegetal, donde la caña de azúcar no es la excepción.

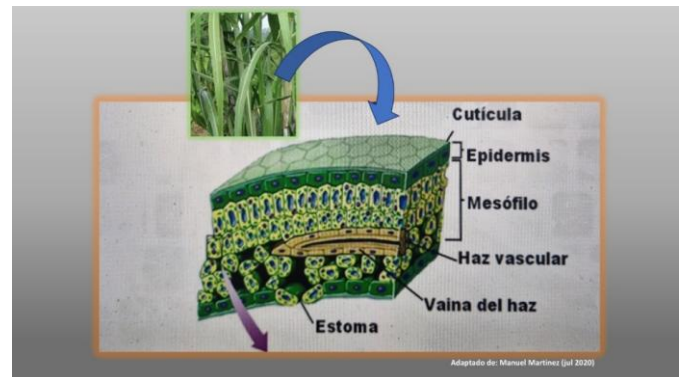
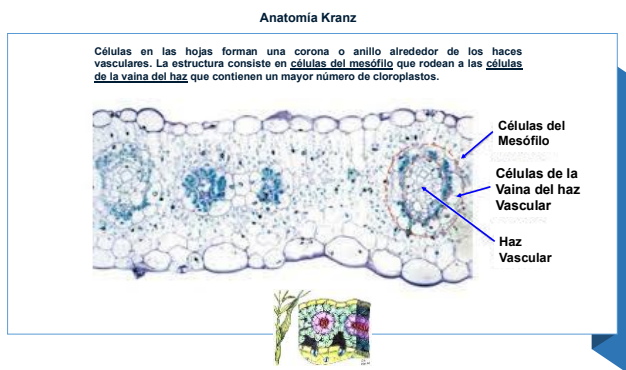


Figura 3. Estructura básica de una hoja de caña de azúcar.

La condición anatómico-fisiológica determinada por la presencia de cloroplastos (dimórficos) en las células del mesófilo y/o en la vaina del haz vascular de la hoja, influye sobre la eficiencia de captación y fijación del carbono atmosférico en los cloroplastos de las células; en cuyo caso la fotorrespiración tiene un vínculo directo con esa condición. El dimorfismo se refiere a la existencia de dos tipos distintos de cloroplastos en la misma planta, con diferencias en tamaño, estructura o composición química; es un rasgo característico de las plantas C<sub>4</sub>. La Figura 3 expone la estructura anatómica básica de una hoja donde destacan para los efectos aquí abordados la presencia de tres componentes: *mesófilo celular*, *haz vascular* y *estomas*; donde las dos primeras representan los espacios donde se ubican los cloroplastos responsables de la fotosíntesis. Una planta dotada de un Sistema Fotosintético C<sub>3</sub> cuenta con cloroplastos en el mesófilo pero no en el haz vascular lo que si ocurre en las plantas tipo C<sub>4</sub>, que dispone de los dos mecanismos para captar y fijar el CO<sub>2</sub>, lo que torna el proceso más eficiente al disponer de esas dos vías de fijación con aprovechamiento máximo del “combustible CO<sub>2</sub>” del medio. Indican Medrano y Flexas (2000) que todas las plantas C<sub>4</sub> son angiospermas (producen flores y frutos) excepto, tal vez, *Udotea flabellum*, una clorofícea.

Aquellas plantas que por origen taxonómico disponen de los dos juegos de cloroplastos ubicados en las células del mesófilo y el haz vascular son nombradas como C4 y las que solo los tienen en el mesófilo como C3. La anatomía de las primeras es conocida como “Kranz”, que constituye una característica especial que se encuentra exclusivamente en las hojas de las plantas tipo C4. Ese grupo de vegetales se caracteriza por contar adicionalmente con una disposición particular de células fotosintéticas alrededor de los haces vasculares, formando una estructura en forma de "anillo" o "guirnalda" a partir de donde se deriva el nombre “Kranz”, que significa "guirnalda" en alemán. Importante apuntar que no todas las plantas C4 presentan necesariamente anatomía Kranz. La Figura 4 expone un detalle transversal mostrando la ubicación de los cloroplastos en plantas con anatomía Kranz tipo C4.



**Figura 4.** Disposición de los cloroplastos en una anatomía Kranz de plantas tipo C4.

Las plantas del tipo C3 predominan botánicamente en el ámbito mundial, como se infiere del contenido del Cuadro 2, comprobando a su vez que la caña de azúcar clasifica y sitúa entre las de fotosistema C4 que cuentan con cloroplastos ubicados en el mesófilo y en el haz vascular, lo que les otorga índices de eficiencia fotosintéticamente superiores. De acuerdo con Yamori *et al* (2014) y Segura (2025) las especies C3 representan cerca del 85% del ámbito vegetal, las CAM constituyen a su criterio el 10% y las C4 aproximadamente el 5% restante; lo que denota y exalta la condición natural privilegiada y casi excepcional de las plantas C4.

Reporta Chaves (2023) al respecto que más del 90% de las plantas del planeta sean cultivadas o silvestres, emplean el mecanismo de fotosíntesis tipo C3; manifestando sin embargo, que:

*“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.”*

Vegetales dotados con ese excepcional sistema fotosintético “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 fosfoenolpiruvato (PEP) con el CO<sub>2</sub>) que rápidamente es convertido a otro compuesto llamado malato o aspartato.” En el caso de las plantas 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.” Ese producto es el ácido 3-fosfoglicérico o PGA. La fotosíntesis tipo CAM es por su parte una vía de fijación de carbono que permite a una planta realizar la fotosíntesis durante el día, pero solo intercambiar gases por la noche; permaneciendo los estomas cerrados en el día para reducir la evapotranspiración en zonas áridas, los cuales se abren por la noche para recolectar CO<sub>2</sub> y permitir que se difunda en las células del mesófilo. Es relevante mencionar que las especies C4 poseen menos cantidad de la enzima RuBisCO respecto a las C3.

Manifiestan Medrano y Flexas (2000) que el mecanismo fotosintético en plantas de ciclo C4 como la caña, comprende básicamente cuatro etapas o fases, como son las siguientes:

1. Asimilación del CO<sub>2</sub>, que implica la carboxilación del fosfoenolpiruvato en las células del mesófilo para formar ácidos C4.
2. Transporte de estos ácidos C4 a las células de la vaina vascular.
3. Descarboxilación de esos ácidos en las células de la vaina y generación del CO<sub>2</sub>, que es fijado por la RuBisCO

**Cuadro 2.** Géneros y especies vegetales (36) según tipo de metabolismo fotosintético implicado en la asimilación del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

| Metabolismo | Planta                      | Nombre científico         | Metabolismo  | Planta         | Nombre científico   |                             |
|-------------|-----------------------------|---------------------------|--|----------------|---|-----------------------------|
| C3          | Aguacate                    | <i>Persea americana</i>   | C4   | Caña de azúcar | <i>Saccharum officinarum</i>  |                             |
|             | Algodón                     | <i>Gossypium hirsutum</i> |  | Coníferas      | Varias  |                             |
|             | Arroz                       | <i>Oryza sativa</i>       |  | Coyolillo      | <i>Cyperus rotundus</i>   |                             |
|             | Banano                      | <i>Musa spp</i>           |  | Maíz           | <i>Zea mays</i>   |                             |
|             | Cacao                       | <i>Theobroma cacao</i>    |  | Miscantus      | <i>Miscanthus spp</i>   |                             |
|             | Café                        | <i>Coffea spp</i>         |  | Pastos         | <i>Andropogon, Brachiaria, Cenchrus, Chloris, Echinochloa, Eleusine, Panicum, Paspalum, Pennisetum, Setaria, etc.</i> |                             |
|             | Chile, Pimiento             | <i>Capsicum annuum</i>    |  | Pasto llorón   | <i>Eragrostis curvula</i>   |                             |
|             | Frijol                      | <i>Phaseolus vulgaris</i> |  | Pata de gallo  | <i>Digitaria sanguinalis</i>  |                             |
|             | Mango                       | <i>Mangifera indica</i>   |  | Remolacha      | <i>Beta vulgaris</i>  |                             |
|             | Manzana                     | <i>Malus domestica</i>    |  | Sorgo          | <i>Sorghum spp</i>  |                             |
|             | Naranja                     | <i>Citrus × sinensis</i>  |  | Verdolaga      | <i>Portulaca oleracea</i>   |                             |
|             | Palma Aceitera              | <i>Elaeis guineensis</i>  |  | Zacate bermuda | <i>Cynodon dactylon</i>   |                             |
|             | Papa                        | <i>Solanum tuberosum</i>  |  | CAM            | Cactus  | <i>Cactaceae spp</i>        |
|             | Sandía                      | <i>Citrullus lanatus</i>  |  |                | Nopal   | <i>Opuntia ficus-indica</i> |
| Soya        | <i>Glycine max</i>          | Orquídeas                 | <i>Orchidaceae spp</i>   |                |   |                             |
| Tomate      | <i>Solanum lycopersicum</i> | Piña                      | <i>Ananas comosus</i>  |                |   |                             |
| Trigo       | <i>Triticum spp</i>         | Sábila                    | <i>Aloe vera</i>   |                |   |                             |
| Uva         | <i>Vitis vinifera</i>       | Suculentas                | <i>Agaváceas, Amaryllidaceae, Apocináceas, Cactáceas, Crasuláceas, Cucurbitáceas, Euphorbiáceas, Geraniáceas, Lamiáceas, Portulacáceas, etc.</i> |                |   |                             |
| Yuca        | <i>Manihot esculenta</i>    | Vainilla                  | <i>Vanilla planifolia</i>  |                |   |                             |

Fuente: Chaves (2023, 2025).

Entre los tres grupos fotosintéticos en que se clasifican los sistemas fotosintéticos vegetales hay plantas muy reconocidas y cultivos de gran importancia agrícola y económica para Costa Rica, como se muestra con detalle en el Cuadro 2.

y reducido a carbohidratos por vía del Ciclo Fotosintético de Reducción del Carbono (CFRC).

- Regreso a las células del mesófilo del ácido C<sub>3</sub> (Piruvato o Alanina) formado por descarboxilación de los ácidos C<sub>4</sub>, y regeneración del aceptor del CO<sub>2</sub> (fosfoenolpiruvato).

Aseguran esos autores que *“En conjunto, se produce un transporte de CO<sub>2</sub> hacia las células de la vaina donde se encuentra la mayor parte de la rubisco. La elevada concentración de CO<sub>2</sub> que se puede conseguir en éstas células (unas 20 veces superior a la de las células del mesófilo) aumenta la eficiencia de carboxilación de la rubisco (la actividad oxigenasa/ fotorrespiración queda prácticamente anulada), con lo que los rendimientos fotosintéticos son claramente superiores a los de plantas C<sub>3</sub>.”*

En el Cuadro 3 se anotan comparativamente algunas características diferenciadoras de plantas dotadas con sistemas fotosintéticos C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> y CAM.

| Vía  | C <sub>3</sub> | C <sub>4</sub>                             | CAM   |
|--|----------------|--|---|
| Enzima responsable de la carboxilación inicial | RuBisCO        | Fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEPC)       | Ambas: RuBisCO y PEPC   |
| Anatomía                                       | Normal         | Kranz                                      | Suculenta   |
| Tasa de fotosíntesis                           | Media          | Alta                                       | Baja  |
| Inhibición de la fotosíntesis por el oxígeno   | Sí             | No   | Sí durante el día, no durante la noche (caso de la fijación oscura de CO <sub>2</sub> ) |
| Eficiencia en el uso del agua                  | Baja           | Media                                      | Alta  |
| Distribución geográfica                        | Amplia         | Áreas tropicales abiertas y hábitat áridos | Regiones y hábitat áridos   |

Fuente: Medrano y Flexas (2000).

### ¿Qué acontece con la caña de azúcar?

En resumen, las plantas de ciclo fotosintético C<sub>4</sub> como la caña de azúcar, poseen una mayor eficiencia fotosintética debido probablemente a la compartimentación de las enzimas, las características anatómicas y estructurales que poseen sus hojas y las ventajas fisiológicas y metabólicas que el sistema fotosintético les provee, lo que **favorece una tasa de fotorrespiración baja o ausente. Es casi de consenso general y aceptado mundialmente que la caña de azúcar no presenta fotorrespiración.**

De acuerdo con Arias (1979) los efectos sobre “procesos de formación de la cosecha” son esperables y pueden ser significativos. Apunta sin embargo Caruso (1987) al respecto, que en las especies C<sub>4</sub> la fotorrespiración no es detectable, aunque menciona que tanto Bull (1969) como Irvine (1970) demostraron su existencia en la caña de azúcar, aunque de una manera calificada como “discreta”.

El hecho de poseer la caña de azúcar en su anatomía dos juegos de cloroplastos limita el “escape y pérdida” potencial de CO<sub>2</sub> desde las células de la vaina, lo que por consecuencia eleva su aprovechamiento mediante una mayor fijación del gas; en cuyo caso la carboxilación (adición del CO<sub>2</sub> a un compuesto orgánico)

ocurre diferencialmente en el tejido que forman las células del mesófilo y la reducción en el que forman las células de la vaina. La carboxilación es esencial para la vida, ya que permite la fijación del carbono en la fotosíntesis. En la fotosíntesis la enzima RuBisCO cataliza la carboxilación de ribulosa-1,5-bifosfato (RuBP) durante el Ciclo de Calvin como primer paso de la fijación del carbono. Según Chaves (2023) *“La asimilación del CO<sub>2</sub> por esta vía fotosintética es muy alta ya que el sistema favorece la asimilación de una mayor cantidad del CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> que entrará a su vez en el Ciclo de Calvin para formar glucosa y liberar O<sub>2</sub>.”*

La caña de azúcar al carecer de fotorrespiración, poseer un punto alto de saturación de luz y poseer una temperatura óptima más alta para activar fotosíntesis, le permite sobrevivir exitosamente en condiciones donde las C<sub>3</sub> pueden tener serios problemas de adaptación (Chaves, 2020d).

### Conclusión

Puede resultar paradójico para algunos plantear, desarrollar y comentar un proceso metabólico complejo como el de la fotorrespiración, para concluir al final que la planta de caña de azúcar no lo presenta; lo cual en realidad no es así, pues tan trascendente es exaltar un atributo y una ventaja como señalar no poseer una limitante y una desventaja. Ese es precisamente el caso aquí desarrollado y que debe ser conocido para explicar con buen fundamento y argumentos sólidos los potenciales y capacidades que posee intrínsecamente la planta de caña de azúcar. No basta ni alcanza con simplemente señalar y aceptar las cosas como ciertas, pues un profesional exigente y sobre todo un especialista calificado de un cultivo debe conocerlas y fundamentarlas técnicamente.

Queda sabido y aceptado que la fotorrespiración es una vía metabólica que ocurre en plantas C<sub>3</sub>, no en la caña de azúcar como planta de ciclo C<sub>4</sub>, especialmente en condiciones de alta temperatura y luz, cuando la concentración de oxígeno en la célula es por acumulo alta y la de dióxido de carbono en el interior de la célula es baja inducida por el cierre estomático. En esas circunstancias, la RuBisCO, que es la enzima más abundante en la Tierra por cumplir un papel crucial en la fotosíntesis, que normalmente fija el dióxido de carbono comienza a fijar oxígeno en su lugar, lo que lleva a la liberación del CO<sub>2</sub> y al consumo de energía metabólica que tornan el proceso improductivo e ineficiente. Esa enzima actúa en dicho caso como oxigenasa en lugar de carboxilasa. Puede asegurarse que la fotorrespiración consume energía, O<sub>2</sub> y libera CO<sub>2</sub> previamente fijado, lo que puede reducir significativamente la eficiencia fotosintética (26-30%) y consecuentemente la producción de biomasa (Walker *et al*, 2016; Villalobos, 2001).

Está comprobado y demostrado que el proceso de la fotorrespiración conduce a una progresiva pérdida de CO<sub>2</sub> sin que ello vaya acompañado de una ganancia neta de energía, tal como acontece en otros procesos degradativos; por el contrario,

ese mecanismo además incrementa el consumo de ATP y poder reductor.

La ausencia de fotorrespiración en la caña de azúcar unida a las características, atributos y propiedades favorables que en aspectos anatómicos, estructurales, fisiológicos y metabólicos vinculados con la captación y uso de la luz, fijación de CO<sub>2</sub>, absorción nutricional y relaciones hídricas, entre otras, explican y justifican la capacidad de resiliencia y el potencial de la planta en producir biomasa y concentrar sacarosa.

Es interesante pensar en que si la fotorrespiración fuera eliminada las plantas solo emplearían CO<sub>2</sub> en la fotosíntesis, reduciendo consecuentemente sus concentraciones en la atmósfera y mitigando con ello el “Efecto Invernadero y de Calentamiento Global” que hoy nos agobia; máxime que ocurre en las especies C<sub>3</sub> de mayor presencia y actividad biológica y fotosintética en el planeta. Expresan Medrano y Flexas (2000) que pese a que la oxigenación de la enzima RuBisCO resulta en la práctica inevitable de evitar, seguramente por la similitud de las moléculas de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, si puede al menos conseguirse minimizarla aumentando la concentración del CO<sub>2</sub> en el medio, o en su caso, indican, reduciendo la presencia de O<sub>2</sub> en la enzima.

Fisiológicamente se dice y teoriza en que las plantas evolucionaron filogenéticamente a partir de las especies C<sub>3</sub> hacia las C<sub>4</sub> para evitar la fotorrespiración, pues es un proceso metabólico que no aporta ni tiene utilidad alguna para la planta, al menos aún no se le ha encontrado. Se especula al respecto en que inicialmente el planeta era muy alto en cuanto a la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico presente, por lo que no había una ventaja selectiva real de poseer una RuBisCO que excluyera la interferencia del O<sub>2</sub>; no había en ese momento presión de selección orientada a excluir la fijación de O<sub>2</sub> sobre la de CO<sub>2</sub>.

#### Literatura citada

- 1) Alexander, AG. 1973. **Sugarcane Physiology**. Amsterdam: Elsevier. Scientific Publishing Company 752 p.
- 2) Arias Moreira, O. 1979. **Procesos de formación de la cosecha**. En: Curso Regional sobre Control Integrado de Plagas en Sistemas de Producción de Cultivos para Pequeños Agricultores. Turrialba, Costa Rica, 27 agosto - 21 setiembre, 1979. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE); Universidad de California (UC), Proyecto Manejo de Plagas, Agencia Internacional de Desarrollo (UC/USAID); Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria (OIRSA). Volumen I. p: 97-118.
- 3) Awad, M.; Castro, P.R.C. 1983. **Introdução à Fisiologia Vegetal**. 1ª edição. São Paulo, Brasil. Livraria Nobel S.A. p: 55-66.
- 4) Bauwe, H; Hagemann, M.; Fernie, A.R. 2010. **Photorespiration: players, partners and origin**. Trends in Plant Science 15: 330-336.
- 5) Bull, T.A. 1969. **Photosynthesis efficiencies and photorespiration in Calvin Cycle and C<sub>4</sub> dicarboxylic acid plants**. Crop Sci 9: 726-729.
- 6) Caruso Machado, E. 1987. **Fisiologia de Produção de Cana-de-Açúcar**. Em: Cana-de-Açúcar. Cultivo e Utilização. 1º Volume. Campinas, São Paulo, Brasil. Sérgio Bicudo Paranhos, Coordenador. Fundação Cargill. p: 56-87.
- 7) 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.
- 8) Castro, P.R.C.; Angelini, B.G. 2017. **Fatores Ecológicos**. STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos, Janeiro/fevereiro Vol. 35 N° 3. p: 16-17.
- 9) 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.
- 10) Chaves Solera, M.A. 2020. **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.
- 11) Chaves Solera, M.A. 2023. **Sistema fotosintético: Motor natural de eficiencia de la caña de azúcar**. Boletín Agroclimático (Costa Rica) 5 (5): 5-18, marzo.
- 12) Chaves Solera, M.A. 2025. **Fenología, Fisiología y Producción de Caña de Azúcar**. En: “Seminario Internacional sobre Producción de Caña de Azúcar”. Organizado e impartido por el Instituto para la Innovación Tecnológica en la Agricultura (INTAGRI) de México para Latinoamérica. México. 10 de Junio 2025. Presentación Electrónica en Power Point 117 láminas.
- 13) De las Rivas, J. 2000a. **Capítulo 9. 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.
- 14) De las Rivas, J. 2000b. **Capítulo 12. 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: 187-201.
- 15) Decker, J.P. 1955. **A Rapid, Postillumination Deceleration of Respiration in Green Leaves**. Plant Physiology 30 (1): 82-84.
- 16) Diola, V. 2012. **Fisiologia**. Em: Cana-de-Açúcar. Bioenergia, Açúcar e Etanol-Tecnologias e Perspectivas.-2º Edição. Viçosa, Minas Gerais, Brasil. Fernando Santos; Aluizo Borém; Celso Caldas editores. p: 25-49.
- 17) Eckardt, N.A. 2005. **Photorespiration Revisited**. The Plant Cell 17 (8): 2139-2141.
- 18) 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.
- 19) Irvine, J.E. 1970. **Photorespiration in tropical grasses**. Physiology Plant 23: 607-612.

- 20) 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.
- 21) Larcher, W. 2003. **Physiological Plant Ecology: Eco physiology and Stress Physiology of Functional Groups**. 3<sup>rd</sup> ed. Berlin, Germany, Springer Verlag.
- 22) Levitt, J. 1972. **Responses of plants to environmental stresses**. 2<sup>nd</sup> ed. New York, San Francisco, London. Academic Press, Inc. 497 p.
- 23) 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 Fósforo. p: 1-11.
- 24) 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.
- 25) Medrano, H.; Flexas, J. 2000. **Capítulo 12. 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: 187-201.
- 26) Nasyrov, Y.S. 1978. **Genetic control of photosynthesis and improving of crop productivity**. Annual Review of Plant Physiology, Palo Alto, 29: 215-237.
- 27) Novaes Magalhães, A.C.N. 1985. **Fotossíntese**. Em: Fisiología Vegetal. Volume 1. 2ª edición revista e actualizada. Mário Guimarães Ferri, Coordinador. São Paulo, Brasil. Editora Pedagógica e Universitária Ltda. p: 117-166.
- 28) Novais 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 Fósforo. p: 113-118.
- 29) Nobel, P.S. 2009. **Solutes**. In: P.S. Nobel (Ed.), Physicochemical and Environmental Plant Physiology. 4<sup>th</sup> ed., Academic Press. p: 100-174.
- 30) Peterhansel, C.; Maurino, V.G. 2011. **Photorespiration Redesigned**. Plant Physiology 155 (1): 49-55.
- 31) Rodrigues, J.D. 1997. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu, São Paulo. Campus de Botucatu, Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista. 99 p.
- 32) 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.
- 33) Segura Monge, A. 2025. **Ecofisiología del Cultivo del Banano**. Monee, IL, USA, May. p: 45-47.
- 34) **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.
- 35) Willalobos Rodríguez, E. 2001. **Fisiología de la producción de los cultivos tropicales**. 1<sup>ed</sup>, San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica. p: 18-51.
- 36) Walker, B.J.; VanLoocke, A.; Bernacchi, C.J.; Ort, D.R. 2016. **The Cost of Photorespiration to Food Production Now and in the Future**. Annual Review of Plant Biology 67: 107-129.
- 37) Wikipedia. 2025a. **Fotorrespiración**. Consultado el 10 de julio 2025 en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Fotorrespiración>
- 38) Wikipedia. 2025b. **Reacciones en la Fotosíntesis**. Consultado el 09 de julio 2025 en: [https://www.google.com/search?q=Que+reacciones+acontece+en+la+fotosíntesis&oeq=Que+reacciones+acontece+en+la+fotosíntesis&gs\\_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIHCAEQIRigATIHCATQIRigATIHCAMQIRigAdIBCjI2NjEwajBqMTWoAgiwAgE&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=Que+reacciones+acontece+en+la+fotosíntesis&oeq=Que+reacciones+acontece+en+la+fotosíntesis&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIHCAEQIRigATIHCATQIRigATIHCAMQIRigAdIBCjI2NjEwajBqMTWoAgiwAgE&sourceid=chrome&ie=UTF-8)
- 39) Yamori, W., Hikosaka, K.; Way, D.A. 2014. **Temperature response of photosynthesis in C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, and CAM plants: Temperature acclimation and temperature adaptation**. Photosynthesis Research 119 (1-2): 101-117.

## CRÉDITOS BOLETÍN AGROCLIMÁTICO

## Producción

Karina Hernández Espinoza, Meteoróloga (Coordinadora y editora)  
 Katia Carvajal Tobar, Ingeniera Agrónoma  
 Nury Sanabria Valverde, Geógrafa

DEPARTAMENTO DE DESARROLLO  
INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL

Recomendaciones agrícolas  
 Erick Chavarría Soto, Ingeniero Agrónomo

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES  
LIGA AGRÍCOLA INDUSTRIAL DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Recuerde que puede acceder los boletines en  
[www.imn.ac.cr/boletin-agroclima](http://www.imn.ac.cr/boletin-agroclima) y en  
[www.laica.co.cr](http://www.laica.co.cr)

# BOLETÍN AGROCLIMÁTICO MENSUAL SEPTIEMBRE 2025

