

Periodo 15 de noviembre al 28 de noviembre 2021

RESUMEN DE LAS CONDICIONES DE LA QUINCENA DEL 01 DE NOVIEMBRE AL 14 DE NOVIEMBRE

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 87 estaciones meteorológicas, el acumulado quincenal de lluvias sobre el territorio nacional.

Los acumulados diarios de lluvia superiores a 10 mm se registraron en la región azucarera Guanacaste Este del 3 al 5; mientras en Guanacaste Oeste las lluvias fueron inferiores; por su parte en Valle Central fueron los días 2, 3, 4 y 6. La Región Norte identifica montos superiores a 20 mm los días 1 y 2. Turrialba reporta más de 50 mm únicamente el día 2. La región Sur reporta más de 30 mm los días 3, 6 y 9. La región Puntarenas sobresale el día 3 con más de 80 mm acompañado de días secos excepto el día 4 que acumula 15 mm.

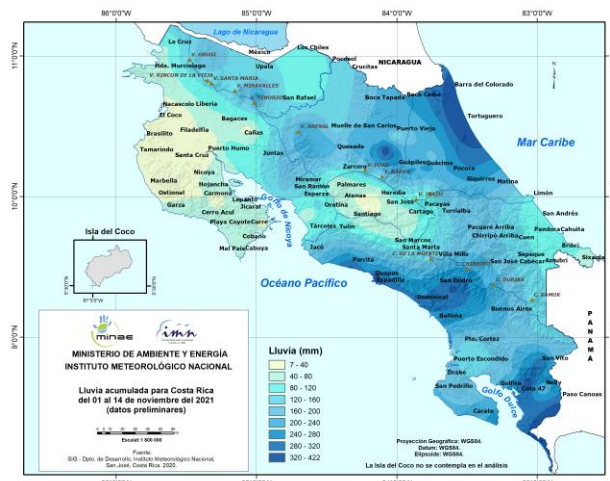


Figura 1. Valores acumulados de la precipitación (mm) durante la quincena del 01 de octubre al 14 de octubre del 2021.

PRONÓSTICO PARA LAS REGIONES CAÑERAS DEL 15 DE NOVIEMBRE AL 21 DE NOVIEMBRE

De la figura 2 a la figura 9, se muestran los valores diarios pronosticados de las variables lluvia (mm), velocidad del viento (km/h) y temperaturas extremas (°C) para las regiones cañeras. La Región Norte mantendrá viento del Este con sus máximos jueves y viernes; mostrando humedad media a lo largo de la semana y temperatura media variable con mínimos entre jueves y viernes. Guanacaste (Este y Oeste) presentará viento Este con una leve y paulatina disminución de su intensidad; así como contenido de humedad baja, seguido de humedad alta; así como temperatura media variable con sus mínimos hacia el fin de semana. Valle Central (Este y Oeste) tendrá viento del Este; con contenido de humedad baja hasta el sábado, seguida de humedad alta; así como temperatura media variable con mínimo el fin de semana. Para Turrialba (Alta y Baja) se prevé viento del Este y humedad media-alta; así como temperatura variable, con su mínimo el viernes. En la Región Sur se espera viento variable; con contenido de humedad baja-media hasta el sábado y media el domingo; así como temperatura media variable con su mínimo el viernes. Puntarenas mantendrá la semana con humedad baja hasta el sábado, seguida de humedad media; con viento variable (Este-Oeste); acompañado de temperatura media variable, con un mínimo el jueves.

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

*“La semana inicia bajo el efecto del empuje frío #3.
No se prevé el efecto de alguna onda tropical ni polvo del Sahara a lo largo de la semana.”*

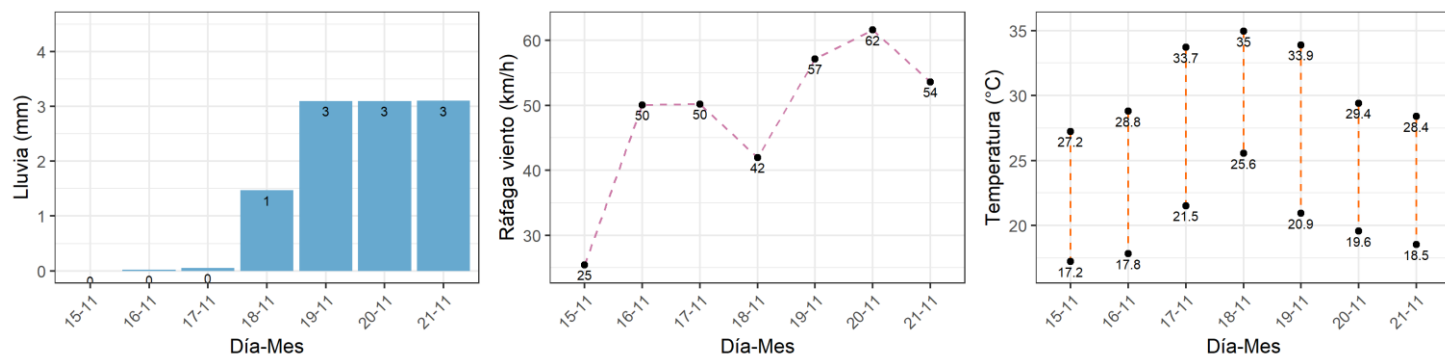


Figura 2. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 15 de noviembre al 21 de noviembre en la región cañera Guanacaste Este.

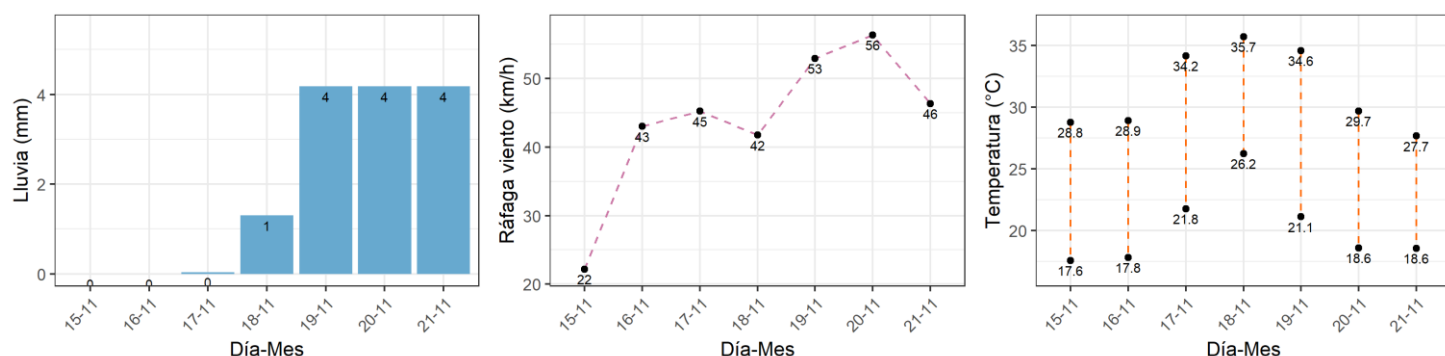


Figura 3 Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 15 de noviembre al 21 de noviembre en la región cañera Guanacaste Oeste.

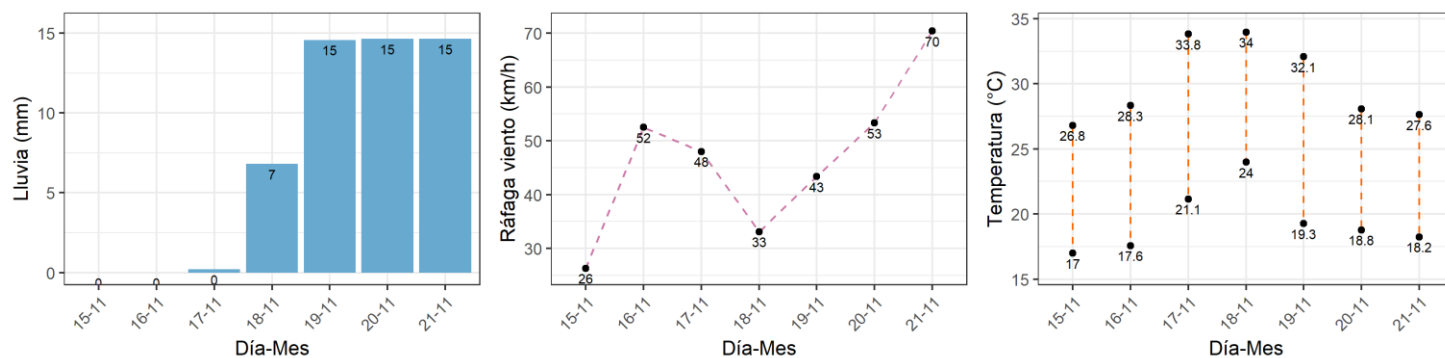


Figura 4. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 15 de noviembre al 21 de noviembre en la región cañera Puntarenas.

Noviembre 2021 - Volumen 3 – Número 24

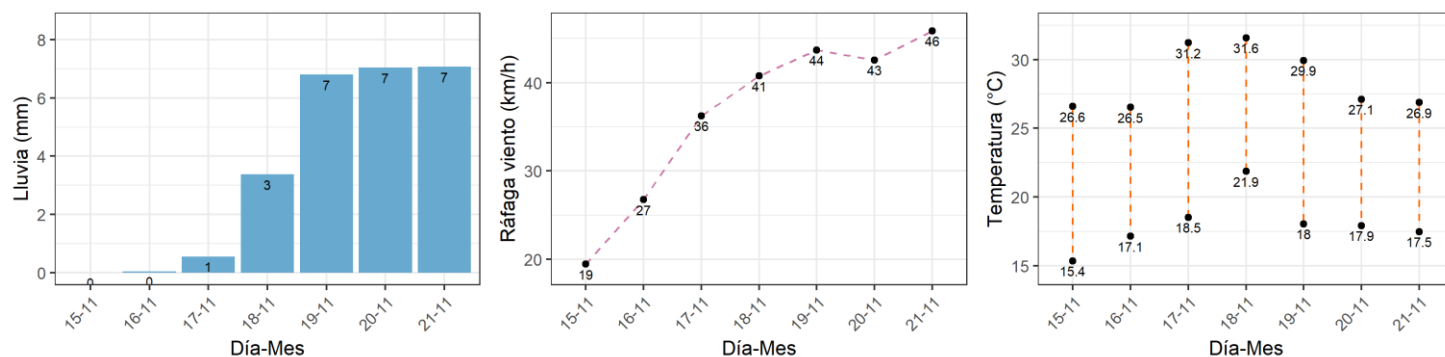


Figura 5. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 15 de noviembre al 21 de noviembre en la región cañera Región Norte.

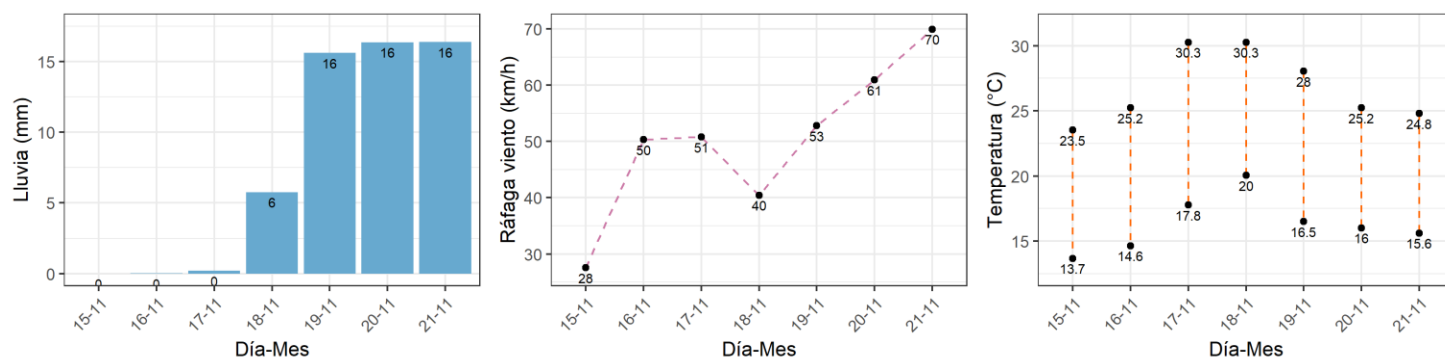


Figura 6. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 15 de noviembre al 21 de noviembre en la región cañera Valle Central Este.

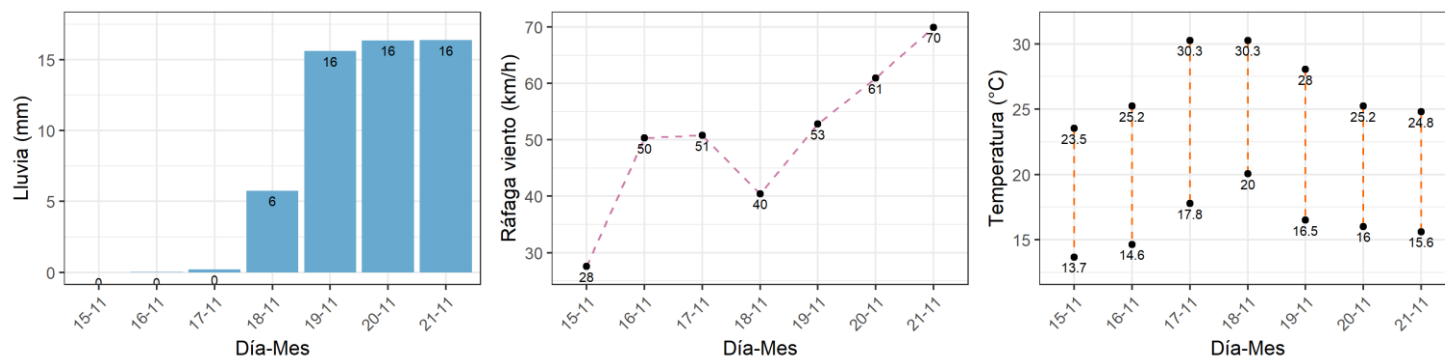


Figura 7. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 15 de noviembre al 21 de noviembre en la región cañera Valle Central Oeste.

Noviembre 2021 - Volumen 3 – Número 24

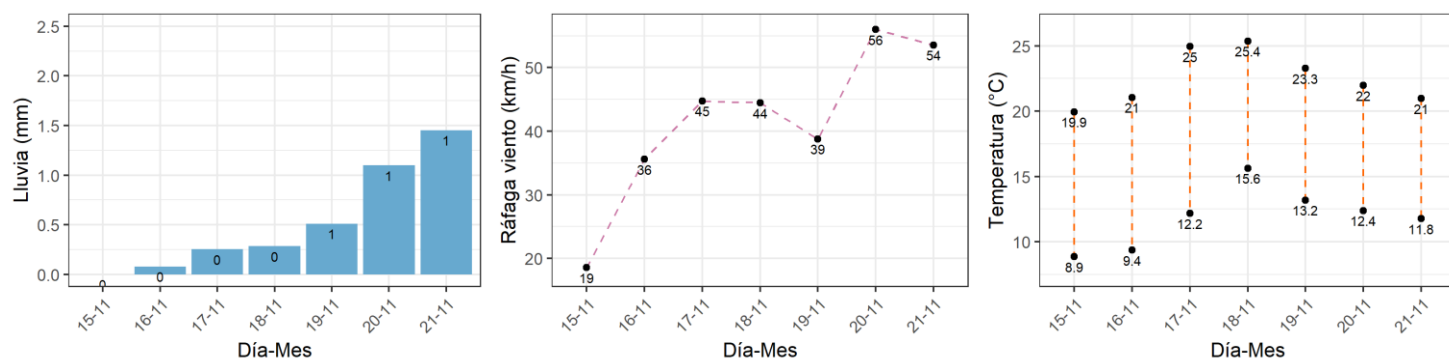


Figura 8. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 15 de noviembre al 21 de noviembre en la región cañera Turrialba.

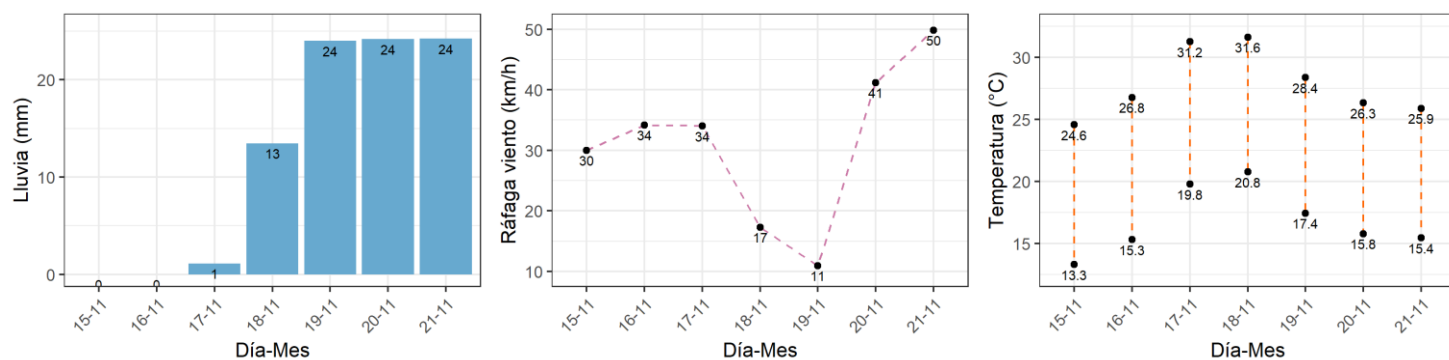


Figura 9. Pronóstico de precipitación (mm), viento (km/h) y temperatura (°C) para el periodo del 15 de noviembre al 21 de noviembre en la región cañera Región Sur.

TENDENCIA PARA EL PERIODO DEL 22 DE NOVIEMBRE AL 28 DE NOVIEMBRE

Se prevé el potencial paso de un empuje frío #4 para inicio de semana y carencia de polvo del Sahara.

La Región Norte iniciará la semana con humedad alta, viento del Este y temperatura variable; de forma que la semana mostrará condiciones lluviosas levemente bajo lo normal acompañado de viento más acelerado de lo normal. Guanacaste (Este y Oeste) iniciará la semana con viento del Este, además de contenido de humedad baja y temperatura variable; en tanto la semana completa evidenciará condiciones sutilmente menos lluviosas de lo normal y más ventosas de lo normal. Valle Central (Este y Oeste) iniciará la semana con viento del Este, humedad alta-media y temperatura media variable; de forma que la semana sea levemente menos lluviosa y más ventosa de lo normal. Para Turrialba (Alta y Baja) se prevé que la semana de inicio con viento del Este, humedad alta y temperatura media fluctuante; manteniéndose la semana sutilmente menos lluviosa y más ventosa de lo normal. En la Región Sur se espera un inicio de semana con viento variable entre Este y Oeste, condiciones de humedad media-alta y temperatura media más cálida que el fin de semana; donde se espera que la semana sea levemente menos lluviosas y más ventosa de lo normal para la época. Puntarenas iniciará la semana con humedad media, así como viento variable del Oeste-Este, además de temperatura media más alta que el fin de semana; esperándose una semana con condiciones sutilmente menos lluviosas de lo normal y más ventosas 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, en los primeros días de la semana del 08 al 12 de noviembre de 2021 se presentó alta saturación en los suelos de la Región Turrialba, Región Norte y Región Sur; a partir del jueves la humedad disminuyó en todas estas zonas.

Las demás regiones cañeras, Guanacaste Este, Guanacaste Oeste y Puntarenas, tuvieron bajos porcentajes durante todo el periodo.

Como se observa en la figura 10, la Región Guanacaste Oeste presenta entre 15% y 60% de saturación en el suelo, las regiones Guanacaste Este y Puntarenas están entre 15% y 45%, la Región Valle Central Oeste tiene entre 30% y 60% mientras que la Región Valle Central Este mantiene su humedad entre 30% y 45%.

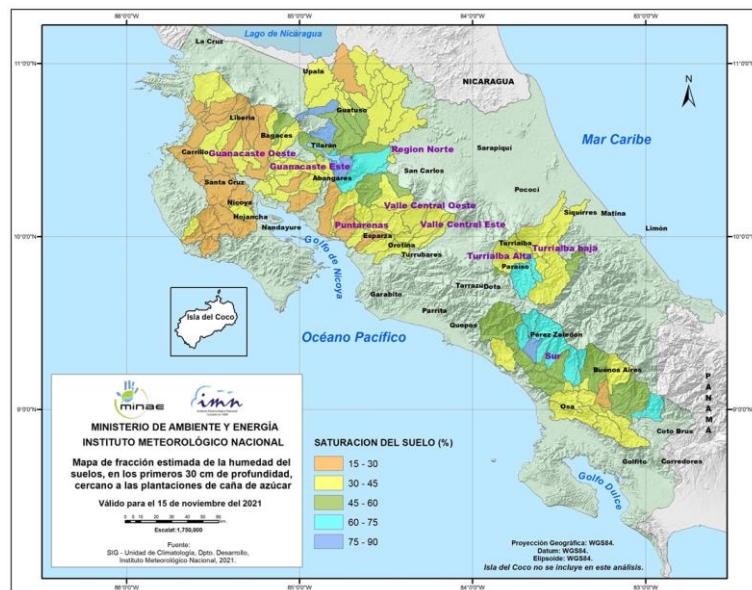


Figura 10. Mapa de fracción estimada de la humedad en porcentaje (%), en los primeros 30 cm de profundidad, cercana a las plantaciones de caña de azúcar, válido para el 15 de noviembre del 2021.

El porcentaje de la Región Norte está entre 15% y 90%, la Región Turrialba Alta (> 1000 m.s.n.m.) tiene entre 30% y 75% y la Región Turrialba Baja (600-900 m.s.n.m.) presenta entre 30% y 60%. La Región Sur varía entre 15% y 90% de humedad.

DIECA 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

Mecanismos de tolerancia al déficit hídrico y desarrollo de soluciones biotecnológicas en el cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.)

Karen Oviedo Bolaños

Introducción

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es la mayor planta productora de azúcar, por lo tanto, tiene elevados requerimientos nutricionales y absorbe gran cantidad de agua del suelo para alcanzar su productividad óptima (Behera *et al*, 2017). Sin embargo, a causa del calentamiento global, Farooq & Gheewala (2020) proyectaron que las condiciones climáticas futuras, principalmente la temperatura máxima y mínima, así como la precipitación, muestran una tendencia creciente. Además, los resultados de estos autores revelaron un aumento significativo en la temperatura proyectada, y como consecuencia, un incremento en la demanda de riego entre un 4.2 y 6%; esto a causa de que el aumento proyectado de las precipitaciones previstas no puede compensar el aumento de la evaporación en el cultivo.

La salinidad y la sequía son los factores abióticos mayormente limitantes para la productividad. Esto se debe a que estas condiciones adversas alteran las funciones biológicas de la planta, tales como, las relaciones hídricas, el metabolismo, también provoca daños a los tejidos por la generación de especies reactivas del oxígeno (ROS) (Behera *et al*, 2017). Se han estimado pérdidas de productividad de hasta un 60% a causa del déficit hídrico (Ferreira *et al*, 2017). Por esta razón, las áreas de cultivo se han concentrado en regiones con precipitaciones favorables para el desarrollo de la caña de azúcar, mientras que otras áreas requieren complementar con irrigación completa (Walter *et al*, 2014).

Por las razones anteriormente expuestas, una excelente estrategia de adaptación consiste en el uso de variedades de caña de azúcar mejoradas genéticamente, que presenten tolerancia a estrés hídrico, con el propósito de que se adapten a condiciones de altas temperaturas, sequías y enfermedades emergentes (Vallejo *et al*, 2021). Existen diversas herramientas biotecnológicas con gran potencial para el mejoramiento de cultivares, como por ejemplo, la elección asistida por marcadores, la mutagénesis, la transformación genética y la edición de genomas, tienen gran potencial para mejorar la

resiliencia del cultivo de la caña de azúcar bajo condiciones de escasez de agua.

El objetivo de esta nota técnica es reportar los principales de respuesta al estrés hídrico y algunas estrategias biotecnológicas para el desarrollo de variedades de caña de azúcar tolerantes a la sequía.

Mecanismos que confieren resistencia a la sequía

• Mecanismos de tolerancia

Como se observa en la Figura 1, existen diferentes mecanismos para la resistencia hacia condiciones de sequía. Dentro de los cuales destaca el ajuste osmótico, es decir, ante la presencia del estrés hídrico, las plantas aumentan significativamente la acumulación de osmolitos (solutos orgánicos o iones inorgánicos), con el propósito de mantener el flujo de agua a través de las células. Dentro de los solutos orgánicos se encuentran los azúcares (como la trehalosa), prolina, polioles, compuestos de amonio cuaternario como glicina betaína, entre otros (Behera *et al*, 2017). Mientras que entre los iones inorgánicos extracelulares que funcionan para bajar o balancear el potencial osmótico, destacan Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Cl^- .

Otra respuesta ante el déficit hídrico es la disminución de la conductancia de los estomas, como consecuencia, se reduce la tasa de transpiración, las concentraciones de CO_2 internas y la tasa fotosintética. La reducción en la tasa fotosintética también se debe a la reducción de la actividad de la fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEPcase) y ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa (Rubisco) (Ferreira *et al*, 2017).

• Mecanismos de evitación

Se ha reportado que el enrollamiento de las hojas aumenta la resistencia a la sequía en diversas especies de gramíneas, con el propósito de reducir la cantidad de irradiación que interceptan. Se han identificado dos genes relacionados con esta capacidad, el *rl-1* y *rl-4* (Kadioglu & Terzi, 2007).

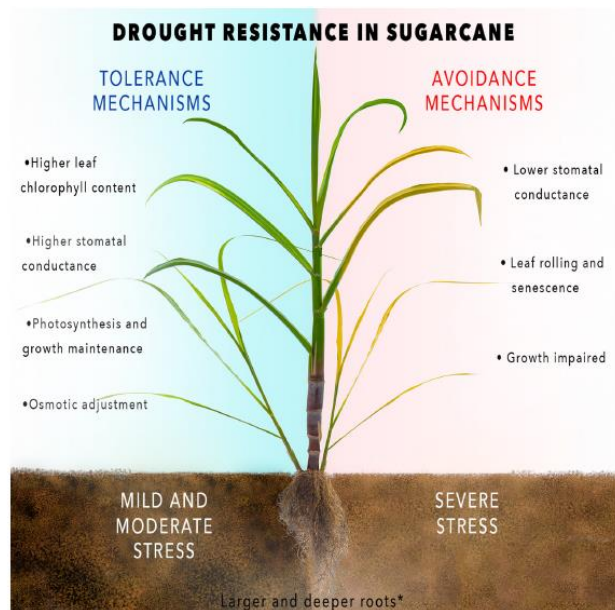


Figura 1. Esquema de los mecanismos de resistencia a la sequía en caña de azúcar. Tomado de Ferreira *et al* (2017).

Estrategias biotecnológicas para inducir resistencia a la sequía en caña de azúcar

- Selección asistida por marcadores moleculares (ESTs y QTLs).

Los avanzados estudios a nivel del genoma, han permitido identificar genes, factores de transcripción, microARNs, hormonas, enzimas involucradas en señalización como respuestas ante el estrés hídrico. Esto ha permitido el mapeo de diferentes marcadores moleculares correlacionados con resistencia al estrés hídrico, esta información es útil para realizar un mejoramiento genético más dirigido (asistido por marcadores) (Rosero *et al*, 2020).

Dentro de los marcadores se encuentran las secuencias de genes expresados (EST, por sus siglas en inglés). Los ESTs son fragmentos cortos (entre 200-300 nucleótidos), generados a partir de una secuencia transcrita (ARN mensajero). Estos marcadores son una subsecuencia complementaria al ARN mensajero o denominado ADN complementario (ADNc). Es decir, representan segmentos de genes expresados (Pearson, 2001).

En la actualidad se han desarrollado gran cantidad de bases de datos e investigaciones de ESTs para caña de azúcar (Menossi *et al*, 2008), destacando la base de datos brasileña denominada SUCCEST. Iqbal *et al* (2016) encontraron marcadores ESTs relacionados con el aumento en la acumulación de mayor cantidad de prolina. La prolina es un osmoprotector porque contribuye a la estabilización de las macromoléculas subcelulares (como membranas y proteínas) y elimina los radicales libres bajo condiciones de estrés por sequía; además incrementa la proporción raíz/brote bajo estrés por sequía. Estos marcadores son sumamente útiles para seleccionar las variedades que contengan polimorfismos relacionados con mayor tolerancia a la sequía, y cultivarlas en zonas principalmente afectadas por sequías.

Por otro lado, se encuentran los marcadores de locus (QTL, por sus siglas en inglés), los cuales se mapean, para poder identificar cuáles marcadores están estrechamente correlacionados con caracteres de interés observados (rasgos cuantitativos). Dentro de los más importantes, se encuentran los QTLs relacionados con la biosíntesis o degradación del ABA (ácido abscísico) una fitohormona que controla el cierre de los estomas bajo condiciones de deficiencia de agua (Rosero *et al*, 2020).

Ventajas: Los marcadores moleculares son sumamente útiles para la selección de progenitores y realizar el mejoramiento convencional de forma dirigida.

Desventajas: Baja heredabilidad, ya que estos caracteres están altamente influenciados por las condiciones ambientales.

Se consume bastante tiempo para la selección y evaluación de las variedades, el proceso es lento. Por lo tanto, se plantean otras herramientas biotecnológicas para inducir cambios deseables en un tiempo reducido, como por ejemplo la mutagénesis y edición genómica.

- Métodos de mutagénesis al azar

Se utilizan agentes mutágenos químicos tales como etil metanesulfonato (EMS), dimetil sulfato, azida sódica, entre otros; así como también mutágenos físicos como la radiación con rayos gamma principalmente. Estos mutágenos se emplean con el propósito de inducir cambios o mutaciones al azar a nivel del genoma de la planta. Posteriormente las plantas son seleccionadas *in vitro*, para determinar la presencia de la característica deseada.

Generalmente el material vegetal que se irradia o se expone a los químicos, son semillas o callos de plantas. Los callos se pueden inducir en cultivo *in vitro* a partir de hojas, semillas o meristemos, mediante reguladores de crecimiento, como por ejemplo el ácido 2,4-dichlorofenoxiacético (2,4-D). Masoabi *et al* (2017) emplearon el EMS de manera exitosa para la inducción de mutagénesis en callos de caña de azúcar, con el objetivo de obtener cultivares tolerantes a sequía, las plantas regeneradas a partir de los callos tratados fueron seleccionadas con polietilenglicol para aumentar el estrés osmótico, con el fin de simular déficit hídrico *in vitro*.

Khalil *et al* (2018) lograron obtener plantas que sobrevivieron a un tratamiento *in vitro* de estrés osmótico, posteriormente las sometieron a ensayos a nivel de invernadero utilizando macetas para confirmar la tolerancia a las condiciones de sequía y analizaron varios parámetros como la eficiencia fotoquímica del fotosistema II (PSII), el contenido de clorofila foliar y la tasa fotosintética. Por último, para evaluar la diversidad genética de las líneas mutantes, estos autores utilizaron marcadores moleculares del tipo microsatélites (SSR), los mismos son ampliamente utilizados para análisis de identificación, diversidad genética, análisis evolutivo de poblaciones, pruebas de paternidad, entre otras aplicaciones.

Ventajas: Inducción de mutaciones significativamente más rápido en comparación con el mejoramiento convencional, que involucra gran cantidad de años.

Desventajas: Es necesario contar con normas de bioseguridad adecuadas y equipo para la manipulación de agentes químicos mutágenos. Mientras que para el uso de irradiación se necesita equipos e infraestructura altamente especializados y costosos.

No posee especificidad, la mutagénesis ocurre al azar, con la posibilidad de generar mutaciones deletéreas. Se consume bastante tiempo para encontrar y evaluar líneas mutantes con las características deseadas.

- *Transformación genética (transgénicos)*

La transformación genética consiste en introducir y expresar, de manera estable, genes exógenos en el genoma de la planta, con el fin de incorporar nuevas características que no poseen de forma natural. El tipo más común, es la transformación genética mediada por la bacteria *Agrobacterium tumefaciens*, una bacteria capaz de transferir fragmentos de ADN dentro de las células de la planta. También se pueden utilizar otros

métodos, como la biolística (propulsar los genes de interés directamente dentro de la célula).

La transformación genética es una técnica efectiva para generar cultivares con resistencia a déficit hídrico, por ejemplo, Li *et al* (2018) se basaron en la enzima Pyrroline-5-carboxylate synthase (P5CS) de la caña de azúcar, la cual es limitante para la síntesis de prolina (un protector osmótico). Tomando esta información como referencia, transformaron un cultivar de caña para insertar un vector de sobreexpresión de la enzima P5CS. De esta manera obtuvieron plantas resistentes a la sequía.

En Brasil, país que encabeza la producción de caña de azúcar a nivel mundial, se han producido gran cantidad de variedades genéticamente modificadas, principalmente la SP 80-3280, porque los protocolos para su regeneración *in vitro* están bien descritos y optimizados. Han introducido gran diversidad de características, como resistencia a herbicidas, plagas (variedades Bt que expresan genes Cry), acumulación de azúcar y biomasa. Así como también, tolerancia a estrés hídrico mediante la inducción de las concentraciones de prolina y trehalosa (Cursi *et al*, 2021).

Asimismo, Indonesia cultiva variedades mejoradas resistentes a la sequía, por ejemplo, el cultivar NXI-1T, al cual se le introdujo el gen EcBetA de la bacteria *E. coli*, este gen codifica para la enzima colina deshidrogenasa. Esta enzima produce un metabolito denominado glicina betaína, que confiere un efecto protector contra el estrés abiótico. Posteriormente se desarrollaron los cultivares NXI-4T y NXI-6T, los cuales poseen una variante de la colina deshidrogenasa (RmBetA), obtenida de *Rhizobium meliloti* (Litvinov *et al*, 2021).

Las transformaciones genéticas también se basan en reducir o aumentar la expresión de genes involucrados en la ruta metabólica del ABA (control del cierre estomático). Estas modificaciones en la expresión de genes se pueden llevar a cabo mediante la inserción de promotores inducibles. De esta forma, también se ha logrado la sobreexpresión de la enzima trehalosa-6-fosfato fosfatasa (TPP), para incrementar la síntesis de trehalosa (estabilizador y protector ante estrés hídrico) (Rosero *et al*, 2020).

Ventajas: Introducción de nuevos caracteres que no poseen las plantas de forma natural, para conferirle resistencia a múltiples factores bióticos y abióticos de manera exitosa.

Desventajas: El genoma de la caña es uno de los más complejos.

La regulación en Costa Rica para la aplicación de la técnica con el propósito de generar variedades comerciales es complicada, como se indicará más adelante..

- *Edición genómica mediante la herramienta CRISPR/Cas9*

En los últimos años, con el descubrimiento de la tecnología de edición de genomas mediante Repeticiones Palindrómicas Cortas Agrupadas y Regularmente Espaciadas (CRISPR/Cas9), se ha revolucionado el mejoramiento de cultivos, debido a que representa una herramienta altamente poderosa para introducir características agronómicamente deseables. La ventaja de la edición genómica radica en que es una tecnología mucho más precisa y económica en comparación con las técnicas de modificación genética tradicionales (Eş *et al*, 2019).

Como se observa en la Figura 2, el mecanismo de edición mediante CRISPR/Cas9 comienza cuando una secuencia de ARN guía (sgRNA), previamente diseñada, reconoce la secuencia blanco de la planta, señalizada por la secuencia PAM (5'-NGG-3'), esta unión induce el ensamblaje de la enzima Cas9 endonucleasa de ADN. Este complejo genera un corte en un sitio específico de la doble hebra del ADN del organismo, el mismo puede ser reparado mediante dos mecanismos: i. Unión de extremos no homólogos, cuando el sistema natural de la célula repara el corte, generando inserciones o deleciones al azar. Si esta mutación ocurre en secuencias codificantes, puede provocar alteración o pérdida (silenciamiento) de la función original de la proteína. El segundo mecanismo es la Reparación directa homóloga, cuando se adiciona un constructo¹ homólogo a la región a editar, que se inserta en el sitio de corte (Cribbs & Perera, 2017). Este último mecanismo es utilizado cuando se requiere generar modificaciones específicas o introducir genes completos.

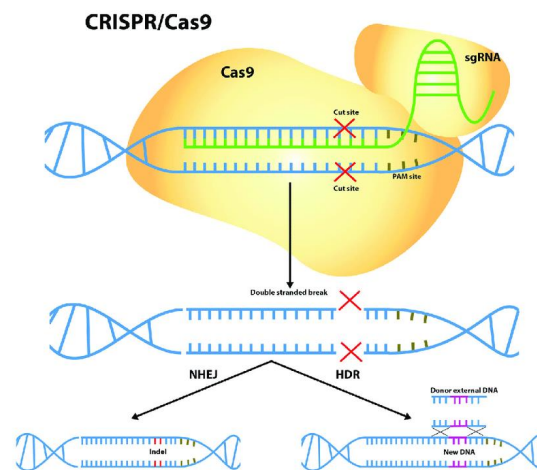


Figura 2. Mecanismos de edición génica mediante CRISPR/Cas9. (Tomado de Cribbs & Perera, 2017).

Con base en lo anterior, el primer tipo de unión de extremos no homólogos es indistinguible de una mutación obtenida de forma natural, por mejoramiento o por edición genómica; esto porque no se introducen secuencias de ADN foráneo, sino que se genera un corte, el cual es reparado por mecanismos naturales de la célula, introduciendo mutaciones puntuales. Mientras que el segundo mecanismo de reparación directa se puede considerar como OGM, debido a que involucra la inserción de una secuencia de ADN exógena.

Mediante la tecnología CRISPR/Cas9 es posible modificar de forma puntual, genes propios de la planta relacionados con la resistencia a sequía (mencionados anteriormente), con el objetivo de incrementar su resistencia al déficit hídrico. En Brasil, el Centro de Tecnología de Caña de Brasil (CTC) está desarrollando distintas líneas de variedades modificadas genéticamente para conferir resistencia a factores bióticos. Como, por ejemplo, cultivares con tolerancia al estrés hídrico con capacidad de producir un 15% más en condiciones de estrés hídrico (Hernández, s.f.).

Ventajas: En comparación con las técnicas anteriores, la edición genómica representa la herramienta más novedosa,

¹ Fragmento de ADN artificial resultado del ensamblaje de dos o más secuencias de ADN, utilizado para modificaciones genéticas.

económica, precisa y rápida en comparación con las técnicas anteriores.

No necesariamente involucra la inserción de secuencias de ADN exógenas, por lo tanto, si la regulación lo establece, se pueden considerar como variedades convencionales para efectos de comercialización (como se regula en otros países de América Latina, como Argentina).

Desventajas: El genoma de la caña es uno de los más complejos.

Es posible que ocurran mutaciones en secuencias no específicas del genoma de la planta diferentes a la secuencia blanco (*Off targets*).

La regulación en Costa Rica para la aplicación de la técnica con el propósito de generar variedades comerciales aún no está definida.

Marco regulatorio en Costa Rica para la aplicación de herramientas biotecnológicas en caña de azúcar

En el caso de las variedades obtenidas por mejoramiento convencional, mejoramiento asistido por marcadores y mutagénesis al azar, no son estrictamente regulados como es el caso de los transgénicos y los cultivares obtenidos por edición genómica.

Costa Rica se rige según lo estipulado en el Protocolo de Cartagena sobre la Seguridad de la Biotecnología y cuenta con regulación sobre los Organismos Vivos Modificados (OVMs). En nuestro país, el Servicio Fitosanitario del Estado (SFE) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) es el ente encargado de aprobar o denegar solicitudes relacionadas con el cultivo o investigación con OGMs. El SFE, a su vez, es asesorada por la Comisión Técnica Nacional de Bioseguridad (CTNBio) creada por la Ley de Protección Fitosanitaria. Los cultivos transgénicos que han sido aprobados en Costa Rica con propósito experimental son: maíz, piña, banano, plátano, arroz y tiquique; y los cultivados para reproducir semilla para exportación son: algodón y soya (Pacheco-Rodríguez y García-González, 2014). Hasta el momento no se cultivan OGMs con propósito comercial en el país.

En el caso de la edición genómica, a pesar del gran beneficio y avance que puede aportar esta herramienta, en Costa Rica no ha sido posible explotar todo su potencial porque el marco

regulatorio para los cultivos mejorados mediante edición genómica aún no está claro en Costa Rica, por carecer de una regulación específica que posibilite registrar productos obtenidos por esta vía. De acuerdo con Marvin Argueta García (funcionario del SFE), como no está claro el reglamento, en caso de que se decida clasificarlos como OVM, serían regulados como transgénicos. Bajo este escenario, el proceso de regulación se vuelve más complejo (O'neal-Coto, 2019).

El biotecnólogo M.Sc. Alejandro Hernández Soto, de la Escuela de Biología del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), argumenta que, si el producto final mejorado obtenido por edición genómica es indistinguible de un producto de mejoramiento convencional, no debería estar bajo regulación, sino tratarse como un cultivo convencional. Ya que, aunque es posible detectar mutaciones mediante técnicas de biología molecular, no es posible identificar el origen, es decir, si la mutación fue natural, por mejoramiento convencional o mediante edición genómica (O'neal-Coto, 2019).

Conclusiones

A causa del cambio climático, se ha proyectado temperaturas y eventos climáticos extremos, como sequías, afectando la productividad de la caña de azúcar, que tiene elevados requerimientos nutricionales y de agua. Las plantas poseen varios mecanismos de adaptación para tolerar el estrés hídrico, y las herramientas biotecnología representan una valiosa herramienta para acelerar el mejoramiento genético con el propósito de incrementar o reducir la expresión de genes que confieren el fenotipo de resistencia a déficit hídrico en caña de azúcar.

Referencias bibliográficas

- Behera, B. C., Yadav, H., Singh, S. K., Mishra, R. R., Sethi, B. K., Dutta, S. K., & Thatoi, H. N. (2017). Phosphate solubilization and acid phosphatase activity of *Serratia* sp. isolated from mangrove soil of Mahanadi river delta, Odisha, India. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 15(1), 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2017.01.003>
- Cribbs, A. P., & Perera, S. M. (2017). Science and Bioethics of CRISPR-Cas9 Gene Editing: An Analysis Towards Separating Facts and Fiction. *The Yale Journal of Biology and Medicine*, 90(4), 625.

- Cursi, D. E., Hoffmann, H. P., Barbosa, G. V. S., Bressiani, J. A., Gazaffi, R., Chapola, R. G., Fernandes Junior, A. R., Balsalobre, T. W. A., Diniz, C. A., Santos, J. M., & Carneiro, M. S. (2021). History and Current Status of Sugarcane Breeding, Germplasm Development and Molecular Genetics in Brazil. *Sugar Tech*, 1–22. <https://doi.org/10.1007/S12355-021-00951-1/TABLES/6>
- Eş, I., Gavahian, M., Marti-Quijal, F. J., Lorenzo, J. M., Mousavi Khaneghah, A., Tsatsanis, C., Kampranis, S. C., & Barba, F. J. (2019). The application of the CRISPR-Cas9 genome editing machinery in food and agricultural science: Current status, future perspectives, and associated challenges. *Biotechnology Advances*, 37(3), 410–421. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2019.02.006>
- Farooq, N., & Gheewala, S. H. (2020). Assessing the impact of climate change on sugarcane and adaptation actions in Pakistan. *Acta Geophysica*, 68(5), 1489–1503.
- Ferreira, T. H. S., Tsunada, M. S., Bassi, D., Araújo, P., Mattiello, L., Guidelli, G. V., Righetto, G. L., Gonçalves, V. R., Lakshmanan, P., & Menossi, M. (2017). Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1077. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2017.01077/BIBTEX>
- Hernández, A. (s.f.). Biotecnología en caña de azúcar para producir más etanol. recuperado de <https://www.croplifela.org/es/component/content/article?id=196:biotecnologia-en-cana-de-azucar-para-producir-mas-etanol>
- Iqbal, M. J., Maqsood, Y., Abidin, Z. U., Manzoor, A., Hassan, M., & Jamil, A. (2016). SSR Markers Associated with Proline in Drought Tolerant Wheat Germplasm. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 178(5), 1042–1052. <https://doi.org/10.1007/S12010-015-1927-1>
- Kadioglu, A., & Terzi, R. (2007). A Dehydration Avoidance Mechanism: Leaf Rolling. *The Botanical Review*, 73(4), 290–302.
- Khalil, F., Naiyan, X., Tayyab, M., & Pinghua, C. (2018). Screening of EMS-Induced Drought-Tolerant Sugarcane Mutants Employing Physiological, Molecular and Enzymatic Approaches. *Agronomy*, 8(10), 226. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY8100226>
- Li, J., Phan, T. T., Li, Y. R., Xing, Y. X., & Yang, L. T. (2018). Isolation, Transformation and Overexpression of Sugarcane SoP5CS Gene for Drought Tolerance Improvement. *Sugar Tech*, 20(4), 464–473. <https://doi.org/10.1007/S12355-017-0568-9>
- Litvinov, D. Y., Karlov, G. I., Divashuk, M. G., Cho, Y.-G., & Kang, K.-K. (2021). Metabolomics for Crop Breeding: General Considerations. *Genes* 2021, Vol. 12, Page 1602, 12(10), 1602. <https://doi.org/10.3390/GENES12101602>
- Masoabi, M., Lloyd, J., Kossmann, J., & van der Vyver, C. (2017). Ethyl Methanesulfonate Mutagenesis and In Vitro Polyethylene Glycol Selection for Drought Tolerance in Sugarcane (*Saccharum* spp.). *Sugar Tech* 2017 20:1, 20(1), 50–59. <https://doi.org/10.1007/S12355-017-0524-8>
- Menossi, M., Silva-Filho, M. C., Vincentz, M., Van-Sluis, M. A., & Souza, G. M. (2008). Sugarcane Functional Genomics: Gene Discovery for Agronomic Trait Development. *International Journal of Plant Genomics*, 2008, 11. <https://doi.org/10.1155/2008/458732>
- O'neal-Coto, K. (2019). La región está por definir el tratamiento legal para los productos derivados de la edición de genomas. Recuperado de <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/12/20/la-region-esta-por-definir-el-tratamiento-legal-para-los-productos-derivados-de-la-edicion-de-genomas.html>
- Pacheco-Rodríguez, F., & García-González, J.E. (2014). Situación de los cultivos transgénicos en Costa Rica. *Act. Acad.* 54, 29–60.
- Pearson, P. L. (2001). Chromosome Mapping. *Encyclopedia of Genetics*, 353–367. <https://doi.org/10.1006/RWGN.2001.0208>
- Rosero, A., Granda, L., Berdugo-Cely, J. A., Šamajová, O., Šamaj, J., & Cerkal, R. (2020). A Dual Strategy of Breeding for Drought Tolerance and Introducing Drought-Tolerant, Underutilized Crops into Production Systems to Enhance Their Resilience to Water Deficiency. *Plants* 2020, Vol. 9, Page 1263, 9(10), 1263. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9101263>
- Vallejo, M; Chavez, M; Solano, Z; Chacon, M y Montenegro, J. (2021). Lineamientos para el diseño de NAMA caña de azúcar (Nota Conceptual). 55 p. MAG. Fedecaña. LAICA. Costa Rica. Disponible en el Word Wide Web: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/E14-11073.pdf>
- Walter, A., Galdos, M. V., Scarpore, F. V., Leal, M. R. L. V., Seabra, J. E. A., da Cunha, M. P., Picoli, M. C. A., & de

Oliveira, C. O. F. (2014). Brazilian sugarcane ethanol: developments so far and challenges for the future. *Wiley*

Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 3(1), 70–92. <https://doi.org/10.1002/WENE.87>

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