



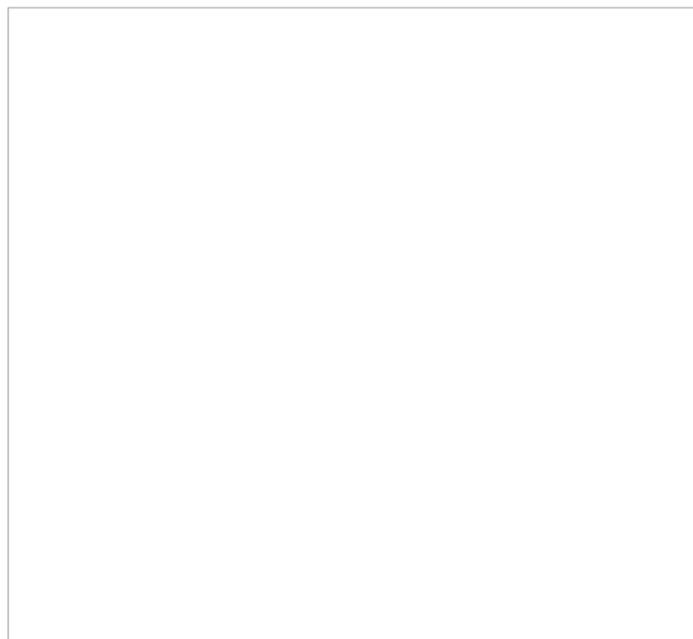
Clima y productividad de la caña de azúcar en el valle del río Cauca

Clima y
productividad de la
caña de azúcar en el
valle del río Cauca

www.cenicana.org

Agroindustria de la caña de azúcar en Colombia





Clima y productividad

de la caña de azúcar en el valle del río Cauca

E. Cortés B.,
Héctor A. Chica R.,
Andrés J. Peña Q.

Cenicaña © 2023

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia

Calle 38 norte No. 3CN-75. Cali, Valle del Cauca, Colombia

Estación experimental: San Antonio de los Caballeros, vía Cali-Florida km 26

www.cenicana.org

Producción editorial: Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología

Coordinación editorial: Victoria Carrillo C.

Corrección de textos: Ernesto Fernández R.

Diseño e ilustración: Alcira Arias V.

Contenido

Introducción	5
Comportamiento de la productividad en cada zona climática del valle del río Cauca	6
Efecto de variables climáticas en la productividad de la agroindustria de la caña de azúcar en el valle del río Cauca	8
Pronóstico de la productividad de acuerdo con las variables climáticas y de manejo	12
Conclusión	14
Referencias	15



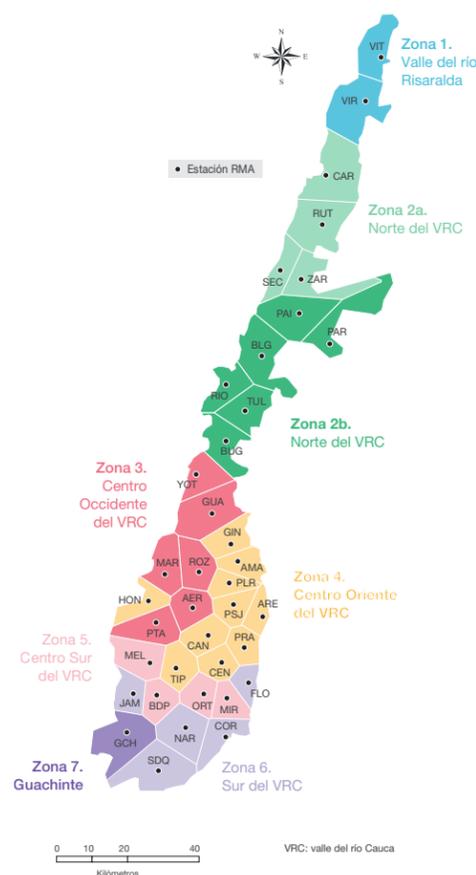
Introducción

En este documento se describe el comportamiento de la productividad de la caña de azúcar en las siete zonas climáticas del valle del río Cauca, con base en aglomeración estadística. Así mismo, se aborda sucintamente lo relacionado con el efecto de las variables climáticas sobre el tonelaje de caña por hectárea (TCH) y el rendimiento de la caña de azúcar, a partir de la información de trece ingenios en un período de veinte años. Posteriormente se muestra cómo estos datos se han utilizado para construir un modelo de pronóstico de producción y productividad.

Comportamiento de la productividad en cada zona climática del valle del río Cauca

De acuerdo con la clasificación realizada por Chica y Cortés (2015), en las zonas 3 y 4 del valle del río Cauca se obtiene el mayor TCH histórico mensual, que oscila entre 120 y 134 toneladas promedio, con una producción estable alrededor del valor medio durante el año (Figura 1). Las zonas 2A, 2B, 5 y 1 tienen TCH menores que las anteriores (entre 110 y 120 toneladas de caña por hectárea), y se ha detectado en la zona 5 una tendencia a brindar mayores producciones en el segundo semestre. La zona 6 mantiene un TCH alrededor de las 98 toneladas de caña por

hectárea, con incrementos hacia el segundo semestre. Las suertes de la zona 7 (Guachinte) reflejan en el TCH medio mensual las prácticas de semizafra que se utilizan en el sur del valle, pues muestra un TCH superior al de la zona 6, aun cuando ambas zonas se encuentran en la misma región. Asociado al comportamiento bimodal de la oscilación de temperatura y a la dinámica de la temperatura mínima en cada una de las zonas, se observa el mismo comportamiento intra-anual del rendimiento comercial (Figura 2).



En las zonas 3 y 4 del valle del río Cauca se obtiene el mayor TCH histórico mensual, que oscila entre 120 y 134 toneladas promedio, con una producción estable alrededor del valor medio durante el año.

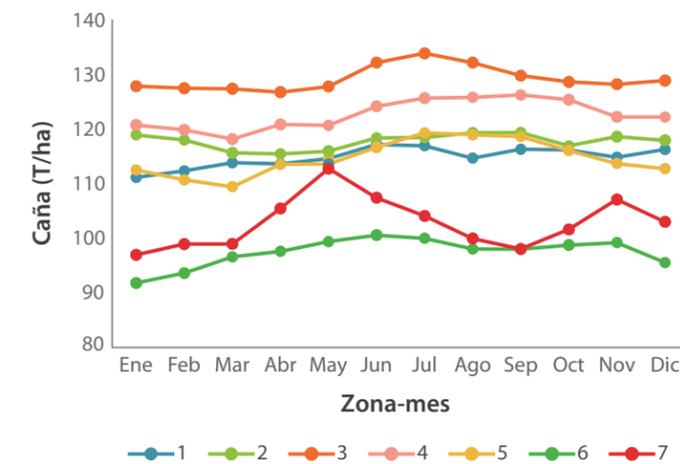


Figura 1. Variabilidad intra-anual del TCH media mensual para diferentes zonas (grupos), período 2010-2023.

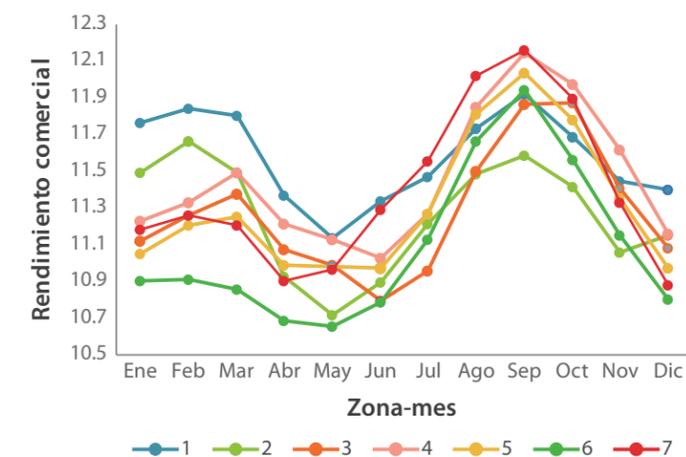


Figura 2. Variabilidad intra-anual del rendimiento medio mensual (%) para diferentes zonas (grupos) en el valle del río Cauca, período 2010-2023.

En la zona 1 se obtienen los mayores rendimientos en el primer semestre y se observa ese mismo comportamiento en el pico del segundo semestre (alrededor de 12%). En las zonas 4, 3 y 7 se obtienen los mayores rendimientos del segundo semestre.

El análisis anterior pone de relieve cómo la oferta climática cambia a lo largo y ancho del valle del río Cauca, y esto trae consigo también

una variabilidad espacial en la productividad. En cuanto al TCH, fácilmente se puede observar que el potencial de acumulación de biomasa es mayor en las zonas centrales del valle. Asimismo, el rendimiento comercial siempre tendrá sus mayores valores en el mes de septiembre y los menores en el mes de mayo, sin importar la zona en que se encuentre el cultivo. Es de notar que el valor de rendimiento comercial de 11.6 solamente es superado en tres de los 12 meses del año.

Efecto de variables climáticas en la productividad de la agroindustria de la caña de azúcar en el valle del río Cauca

Los principales factores que inciden en la producción y el rendimiento de la caña de azúcar, además del varietal, son el clima, el suelo y el manejo agronómico. Estos factores no actúan de manera independiente sino que se interrelacionan, lo que hace que a veces se potencialice uno de ellos por la acción positiva o negativa de los otros (Villegas et. al. 2014).

De las variables que conforman el clima, la precipitación, la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad del aire y la velocidad del viento son las que tienen mayor influencia sobre el desarrollo del cultivo y su producción. De acuerdo con Palma (2010), en orden de mayor a menor influencia de estas variables en las toneladas de caña por hectárea se encuentran la condición ENOS (28.3%), la edad (24%), la precipitación en los primeros meses del cultivo (17.3%) y la precipitación del mes anterior a la cosecha (15.6%), entre otras. En cuanto al rendimiento, los factores que en él influyen son el trimestre (47.3%), la precipitación de los dos meses previos a la cosecha (25.1%) y la oscilación media diaria de la temperatura (12.4%), los cuales explican cerca del 85% de las variaciones.

Dada la escasa variación de la luz diaria a través del año (fotoperiodo) y de la temperatura del aire, mencionadas previamente (Figuras 1 y 2), el valle del río Cauca es una de las pocas zonas en el mundo donde se cosecha la caña de azúcar durante todo el año. Este hecho implica que en algunas épocas haya necesidad de cosechar en los meses de mayor precipitación, cuando el suelo tiene alto contenido de humedad, lo que provoca compactación y daños a las cepas que repercuten en la producción del cultivo siguiente. Pero también hay efectos de la precipitación que inciden de manera inmediata en el cultivo, como cuando la caña de azúcar está cerca de su cosecha y llueve después de un tiempo relativamente largo de sequía, evento que inmediatamente reactiva el crecimiento de la planta, en lo cual se gasta parte de las reservas de sacarosa almacenada y se disminuye el rendimiento.

El efecto de la edad de cosecha en la productividad y en la producción es un hecho evidente, pues las mayores producciones de caña de azúcar están asociadas con edades superiores a los 13.5 meses, y las producciones más bajas normalmente están relacionadas con edades

Los principales factores que inciden en la producción y el rendimiento de la caña de azúcar, además del varietal, son el clima, el suelo y el manejo agronómico.

menores que los 12 meses. Aun así, es importante tener en cuenta que existe un efecto de retroalimentación entre la edad y las toneladas de caña por hectárea, ya que a medida que aumenta la edad del cultivo, la acumulación de biomasa se incrementa (efecto biológico de la edad sobre el TCH), pero cuando además el TCH aumenta debido a razones climáticas o de manejo, se disminuye el área de cosecha, lo que causa a su vez un incremento en la edad de las áreas dejadas de cosechar.

Entre los factores que influyen en el desarrollo de las plantas, uno de los más importantes es la radiación solar interceptada por el cultivo, porque aporta energía para el proceso de fotosíntesis, mediante la cual se obtienen los carbohidratos a partir del agua y el CO₂. En general, los meses de más baja radiación solar son los de mayor precipitación, en los cuales, por el aumento de la pluviosidad, se incrementa la presencia de nubes, lo que disminuye la cantidad y la calidad de la radiación incidente. No obstante, es difícil asociar las variaciones en la producción con el comportamiento de la radiación, básicamente porque no se conoce un umbral de radiación por debajo del cual se afecte la producción y no se ven periodos en los cuales la producción haya caído por bajas radiaciones, ni periodos de alta radiación en los que de forma consistente la producción se haya mantenido en niveles altos.

Con la ayuda de modelos lineales generales se cuantificó estadísticamente el efecto de la precipitación y la edad de cosecha sobre las toneladas de caña por hectárea y el rendimiento comercial. En el Cuadro 3 se muestran los p-valores del análisis de varianza para cada uno de los factores (valores p menores que 0.05 denotan efecto significativo del factor sobre la productividad). La Figura 3 muestra el efecto de la edad de corte sobre el TCH y el rendimiento. Todos los rangos de edad tienen TCH y rendimientos estadísticamente diferentes, pero se deja de cosechar 15 toneladas aproximadamente cuando la edad baja de 13.8 a 12 meses. En cuanto al rendimiento, se observa un óptimo (biológico) a los 13.5 meses. Estos resultados concuerdan con lo encontrado por Palma (2010).

Entre los factores que influyen en el desarrollo de las plantas, uno de los más importantes es la radiación solar interceptada por el cultivo, porque aporta energía para el proceso de fotosíntesis, mediante la cual se obtienen los carbohidratos a partir del agua y el CO₂.

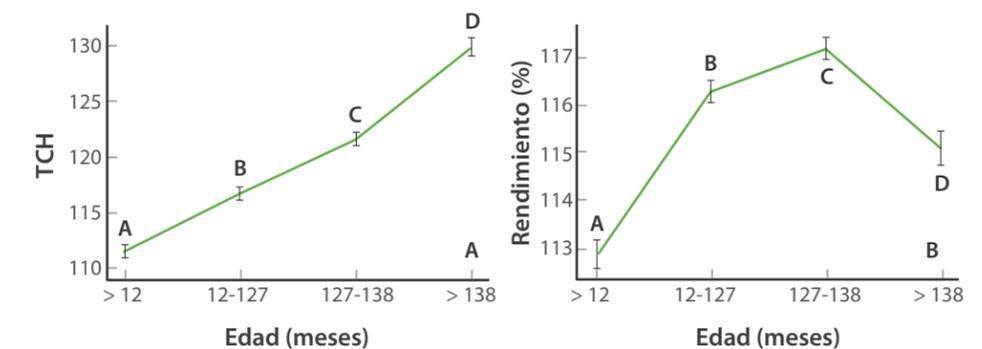


Figura 3. Efecto de la edad de cosecha sobre el rendimiento y el TCH. 3A. TCH medio en diferentes rangos de edad con su intervalo de confianza al 95%. 3B. Rendimiento medio en diferentes rangos de edad con su intervalo de confianza al 95%. Promedios con letra diferente denotan diferencias estadísticas al 5%.

En la Figura 4 se observa el comportamiento del tonelaje de acuerdo con la precipitación ocurrida en cuatro etapas del cultivo. Se nota el efecto negativo del exceso de lluvia en los primeros meses de desarrollo del cultivo (4A y 4B), así como el efecto positivo del mes séptimo en adelante (4C y 4D). Esto quiere decir que cultivos con déficit hídrico del séptimo mes en adelante sufrirán una reducción en el TCH, mientras que el exceso de agua en los primeros meses está igualmente asociado a TCH menores. Estos resultados también concuerdan con lo encontrado por Palma (2010).

En la Figura 5 se muestra la influencia de varios factores del clima sobre el rendimiento. En la Figura 5A se observa cómo el rendimiento medio de suertes que recibieron más de 266 mm en los últimos dos meses del ciclo está por debajo en aproximadamente 0.8 puntos porcentuales con respecto a aquellas que no recibieron más de 111 mm en el mismo período. En la Figura 5B se cuantifica, mediante correlaciones cruzadas hechas sobre series filtradas, cómo el efecto de la temperatura mínima se da en los dos meses anteriores al corte y de forma inversa (no necesariamente proporcional), esto es, en la medida

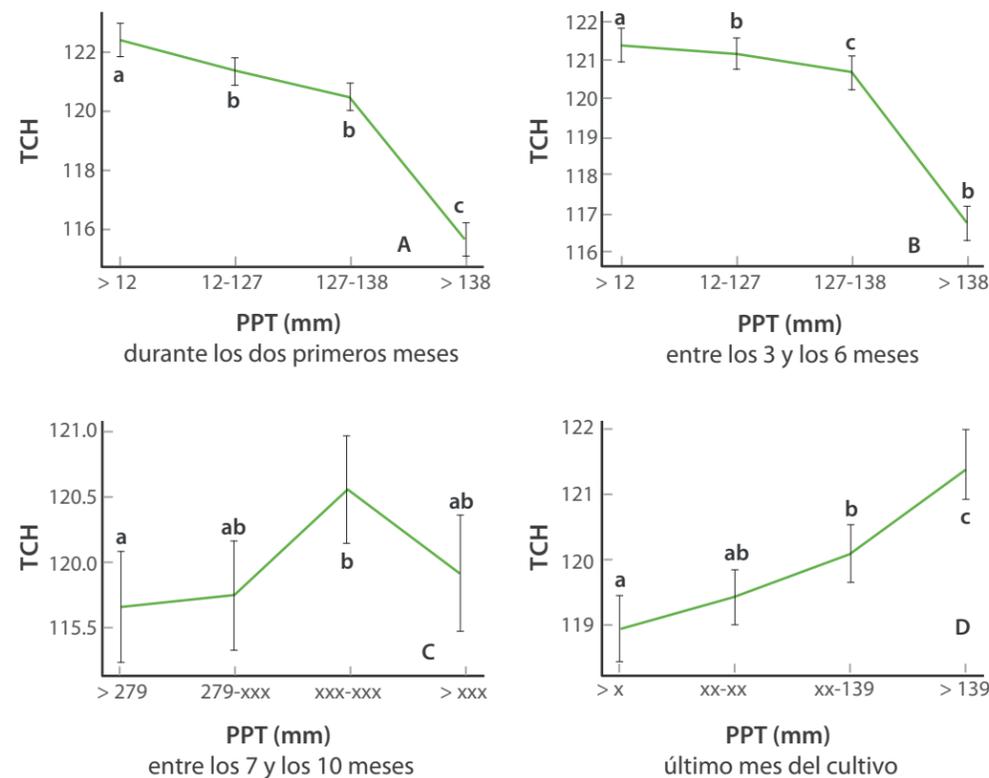


Figura 4. Efecto de la precipitación sobre el TCH. 4A. TCH medio en diferentes rangos de precipitación recibidos durante sus dos primeros meses. 4B. TCH medio en diferentes rangos de precipitación recibidos por el cultivo entre los tres y seis meses. 4C. TCH medio en diferentes rangos de precipitación recibidos entre los siete y diez meses. 4D. TCH medio en diferentes rangos de precipitación recibidos el último mes del ciclo. Promedios con letra diferente implican diferencias estadísticamente significativas entre los TCH promedio.

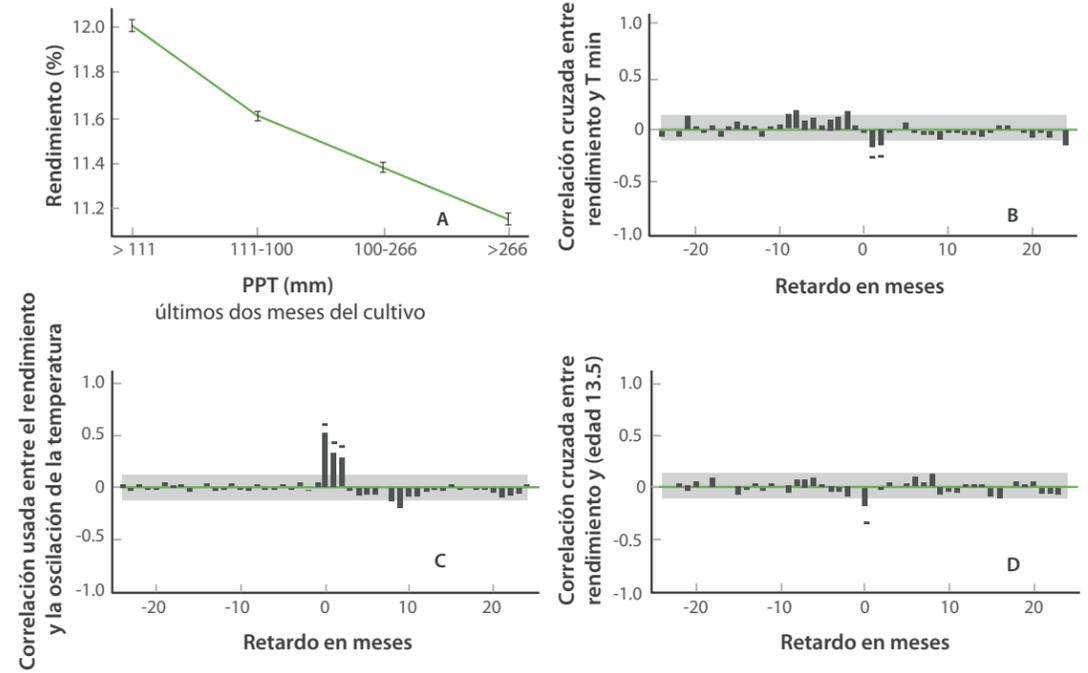


Figura 5. Efecto de algunas variables climáticas sobre el rendimiento. 5A. Rendimiento medio con diferentes rangos de la precipitación recibida en el último mes del cultivo. 5B. Efecto temporal de la temperatura mínima sobre el rendimiento. 5C. Efecto temporal de la oscilación de la temperatura sobre el rendimiento. 5D. Efecto del delta cuadrático de la edad menos la edad óptima biológica (13.5 meses) sobre el rendimiento.

en que la temperatura mínima se reduce, mayor es el rendimiento. Esto explica que hay calidades de oscilación de temperatura según las cuales suertes con igual diferencial entre temperatura mínima y máxima mostrarán variaciones en el rendimiento promedio a favor de aquellas cuya temperatura mínima fue menor. En la 5C se observa la fuerte influencia directa de la oscilación de la temperatura del mes actual de corte y de los dos meses anteriores, y en la 5D se aprecia el efecto inverso de cortar antes o después de la edad óptima biológica, que es 13.5 meses en promedio. Cuanto más se aleje el corte de los 13.5 meses, tanto antes como después, menor será el rendimiento de las suertes. Estos resultados concuerdan con los reportados por Palma (2010) y Villegas et al. (2014) y aportan una nueva cuantificación de efectos con base en correla-

ciones cruzadas en el contexto de las series de tiempo (Wei, 2006). La cuantificación de estos efectos se viene incorporando desde 2012 en modelos de pronóstico de productividad como el propuesto por Palma (2012), actualizado por Chica (2015).

Hay calidades de oscilación de temperatura según las cuales suertes con igual diferencial entre temperatura mínima y máxima mostrarán variaciones en el rendimiento promedio a favor de aquellas cuya temperatura mínima fue menor.

Pronóstico de la productividad de acuerdo con las variables climáticas y de manejo

La importancia de conocer el comportamiento futuro de las variables de interés en las diferentes actividades que involucra la agroindustria azucarera ha llevado a diseñar diversas técnicas matemáticas y estadísticas enfocadas a estimar tendencias y pronósticos que ayuden en la toma de decisiones, tanto con respecto a la unidad productiva como del sector. En los países con zafra se han construido modelos estadísticos cuyas predicciones del TCH o las toneladas totales de caña en el sector se sustentan en información anual. Estos modelos pueden basarse en el comportamiento histórico de la variable (el TCH de la zafra anterior, por ejemplo) y considerar además otros factores relacionados con el TCH (manejo, clima). Ruiz et al. (2011) y Yassen et al. (2005) ajustaron modelos autorregresivos integrados de media móvil (Wei, 2006) a series anuales en México y Pakistán, respectivamente, y predijeron la zafra del año siguiente con una precisión relativa del 94% en el primer caso y estuvieron muy ajustados a la realidad en el segundo. Krishna Priya y Suresh (2009-10), en el estado de Coimbatore, India, ajustaron un modelo de regresión utilizando variables climáticas para predecir las TCH

anuales. La validación de sus datos mostró que las predicciones se desviaron de los datos reales entre -17.5 TCH y 3.47 TCH. Brüggemann et al. (2001), en KwaZulu-Natal, ajustaron un modelo de regresión en el que se incluyeron variables de manejo, la altitud y la precipitación, y su coeficiente de acierto fue de 55% y el error estándar de las estimaciones, de 16.5 TCH.

En Colombia, en donde, a diferencia de otras zonas productoras, no existe una zafra en el sentido estricto de la palabra, estos modelos predictivos deben permitir calcular los componentes del rendimiento a escala mensual, ya sea basándose solamente en los valores pasados del TCH y del rendimiento, o considerando también variables de clima y manejo, o ambas. Los trabajos de Palma, Z. muestran la evolución a este respecto, pues este autor se aproximó a un modelo de pronóstico de TCH y rendimiento (Palma, 2012) que relacionó los valores anuales con los valores trimestrales Palma (2008) para cuantificar los efectos del clima y del manejo en la productividad de la caña de azúcar.

La importancia de conocer el comportamiento futuro de las variables de interés en las diferentes actividades que involucra la agroindustria azucarera ha llevado a diseñar diversas técnicas matemáticas y estadísticas enfocadas a estimar tendencias y pronósticos que ayuden en la toma de decisiones, tanto con respecto a la unidad productiva como del sector.

En la actualidad el modelo de pronóstico de la producción y la productividad mensual de la caña de azúcar ha evolucionado a la forma que se muestra en la Figura 6.

En este esquema se observa cómo a partir de la información histórica mensual de la producción de un cultivo de caña de azúcar (toneladas de caña y toneladas de azúcar), de la productividad

de la caña o rendimiento comercial (t/ha), del clima y del manejo, es posible modelar la dinámica entre estos factores para estimar como producto final las toneladas de azúcar que se producen en un mes dado.

El modelo se basa en la teoría de series de tiempo y modelos dinámicos.

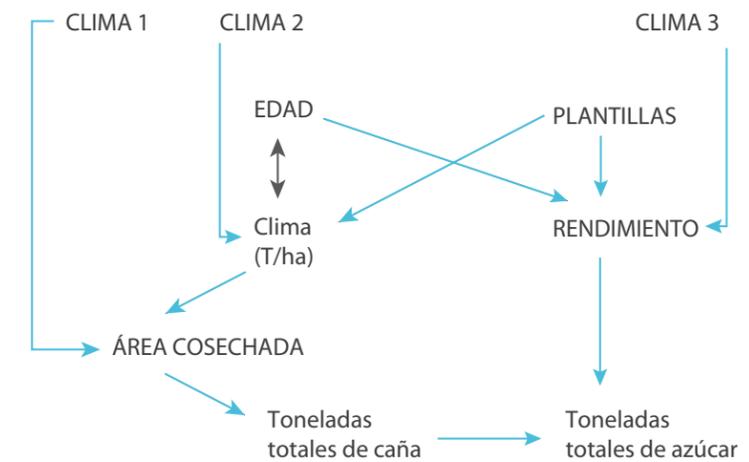


Figura 6. Modelo de pronóstico mensual de producción y productividad de caña de azúcar.



Conclusión

La zonificación climática explica en parte la variabilidad de la productividad en el valle geográfico del río Cauca, lo que permite conocer los umbrales productivos y orientar el mejoramiento genético a obtener variedades que se adapten a cada una de sus zonas.

El orden natural del efecto de las variables climáticas sobre la producción vegetal comienza con la oferta de radiación y su posterior modulación por parte de la temperatura, la humedad y la precipitación. No obstante, y dado que el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca es continuo durante todo el año, la variable que más impacta las toneladas de caña por hectárea y el rendimiento comercial es la precipitación.

Gracias a los análisis anteriores se ha desarrollado un modelo de predicción de la producción y la productividad mensuales de un cultivo de caña de azúcar, utilizado por el sector como una herramienta fiable para la elaboración de presupuestos.

Literatura citada

- Alfaro, E., Amador, J. (1996). El Niño/Oscilación del Sur y algunas series de temperatura máxima y brillo solar en Costa Rica. *Tópicos meteorológicos y oceanográficos*. 3(1): 19–26. San José de Costa Rica
- Capel, M. (1999). *El Niño y el sistema climático terrestre*. Editorial Ariel. Barcelona, 154 p.
- Chica, H.; Cortés, E. 2015. Zonificación climática del valle del río Cauca. Documento de trabajo Cenicaña.
- Cortes, E., Barrios, C. (2010). Nuevo calendario de temporadas secas y lluviosas en el valle del río Cauca. *Cenicaña*. (Colombia), *Carta Trimestral*, 32 (3-4): 4-5.
- León, G., Zea, J., Eslava, J. (2000). Circulación general del trópico y la Zona de Confluencia Intertropical en Colombia. *Meteorol. Colomb.* 1:31-38. ISSN 0124-6984. Santa Fe de Bogotá, D.C. – Colombia.
- León, G., Zea, J., Eslava, J. (2001). Ondas del este en Colombia y algunos aspectos relevantes de los ciclones tropicales. *Meteorol. Colomb.* 3:137-141. ISSN 0124-6984. Bogotá, D.C. - Colombia.
- Peña, D. (1982). Algunas características de la precipitación en Palmira (Colombia), Turrialba. 32, no. 3, 219-228.
- Peña, A., Cortes, E., Montealegre, F. (2001). Incidencia de los fenómenos “El Niño” y “La Niña” sobre las condiciones climáticas en el valle del río Cauca: Parte II. Análisis de correlaciones. *Meteorología Colombiana* 3:119-128.
- Peña, A., Ramírez, C., Bermúdez, N., Riaño, N. (2016). Rainfall Patterns Associated with the Oceanic Niño Index in the Colombian Coffee Zone. *Journal of Agricultural Science*; Vol. 8, No. 3, 56-63.
- Pérez Rendón, E. P., Ramírez Builes, V. H., & Peña Quiñones, A. J. (2016). Variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana. *Investigaciones Geográficas*, (89), 23. doi:10.14350/ig.38707
- Ramírez, V. y A. Jaramillo (2009). Relación entre el índice oceánico de El Niño y la lluvia en la región andina central de Colombia, *Revista Cenicafé*, vol. 60, núm. 2, pp. 161-172.
- Ramírez, C., Vélez, J., Peña, A. (2018). Buscando un índice para predecir la lluvia mensual en una región agrícola de los andes del norte (Caldas, Colombia). *Investig. Geogr. Chile*, Sometido.
- Tootle, A., Piechota, C., & Gutiérrez, F. (2008). The relationships between Pacific and Atlantic Ocean sea Surface temperature and Colombian streamflow variability. *Journal of Hydrology*, 349, 268-276. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.058>
- Torres, C. (2012). Efecto de las ondas Madden-Julian en la precipitación sobre algunas regiones del territorio colombiano. Tesis para optar por el título de M.Sc. en Meteorología. Facultad Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Trenberth, K. (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2771-2777. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:tdoen>2.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:tdoen>2.0.co;2)
- Trojer, H. (1968). The phenological equator for coffee planting in Colombia. In: *Agroclimatology methods proceeding of the Reading Symposium*. Paris, UNESCO. I. 7: 107-117.
- Zea, J., G. Leon, & J. Eslava. (2000): *Influencia De Sistemas Extratropicales En Colombia*. Meteor. Colomb. 1:9-15. ISSN 0121-2974. Santa Fe de Bogotá, D.C. – Colombia.