



IMPACTO ECONÓMICO DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CULTIVOS DE CAÑA DE AZÚCAR EN PÁNUCO, VERACRUZ

Samantha Ahumada Domínguez

Universidad Veracruzana

sammyad22@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-8211-3280>

Carolina A. Ochoa Martínez

Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana

caochoa@uv.mx

<https://orcid.org/0000-0001-8632-787X>

Nadia Itzel Castillo Pérez

Universidad Veracruzana

n.itzelcastillo.p@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-9031-5195>

Resumen

El municipio de Pánuco, ubicado en el extremo norte del estado de Veracruz, se caracteriza por su actividad agrícola, con una importante producción del grano de maíz, naranja, caña de azúcar, café y piña. Se destaca como uno de los principales productores de caña de azúcar a nivel nacional, alcanzando cerca de 109 mil toneladas en 2022. La creciente incidencia de fenómenos climáticos extremos ha impactado negativamente el rendimiento y la calidad del cultivo, afectando la rentabilidad de la industria y la estabilidad económica de las comunidades rurales que dependen de esta actividad. El presente estudio analiza el impacto de la variabilidad climática en la producción de caña de azúcar en Pánuco, mediante el uso de calendarios climáticos que permiten observar patrones históricos de precipitación y temperatura, y su relación con los ciclos agrícolas. Asimismo, se llevó a cabo un análisis de correlación para identificar vínculos entre variables climáticas y económicas. Los resultados muestran que las condiciones climáticas influyen significativamente en la productividad del cultivo. Este enfoque adquiere relevancia dentro de la economía ecológica, al evidenciar cómo los cambios en el entorno natural afectan directamente la estructura económica local.

Palabras-clave: caña de azúcar, correlación, economía, cambio climático.

Abstract

Pánuco is a municipality located in northern most part of the state of Veracruz. It is characterized by its agricultural activity with significant national production of corn, oranges, and sugarcane, the last one reaching 109 thousand tons in 2022. The increasing incidence of extreme climatic phenomena has negatively impacted the yield and quality of cultivation, affecting the profitability of the industry and the economic stability of rural communities that depend on this activity. This study analyzes the impact of climatic variability on sugar cane production in Pánuco, with climatic calendars that allow observing historical patterns of precipitation and temperature, and their relationship with agricultural cycles. Accordingly, a correlation analysis was conducted to identify links between climatic and



economic variables. The results show that climatic conditions significantly influence crop productivity. This approach acquires relevance within the ecological economy, as it highlights how changes in the natural environment directly affect the local economic structure.

Keywords: sugarcane, correlation, economy, climate change.

JEL Codes: Q32, Q38, H72

1. Introducción

La crisis climática actual está modificando de forma significativa los sistemas agrícolas en toda América Latina. En México, y particularmente en el estado de Veracruz, la producción de caña de azúcar constituye una de las actividades agroindustriales de mayor relevancia económica y social. Debido a que Veracruz se ha consolidado como uno de los principales productores del país, aportando aproximadamente el 35 % de la producción nacional de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2023). Este sector, emblemático por su tradición y aporte al desarrollo regional, enfrenta una problemática crítica: sufre los impactos del cambio climático y, al mismo tiempo, está contribuyendo a su aceleración. En Colombia, por ejemplo, el incremento de temperaturas y la disminución de los recursos hídricos ya han mostrado consecuencias negativas sobre los cultivos de caña de azúcar, lo que anticipa desafíos similares para nuestro país (Cortés-Cataño et al., 2024).

El municipio de Pánuco ocupa un lugar destacado entre los mayores centros de producción, con un valor de producción estimado en \$1'321,670 pesos mexicanos, durante 2023 (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2024). Sin embargo, tanto el rendimiento como la calidad de la caña se ven afectados por la variabilidad climática y al cambio climático (Cortés-Cataño et al., 2024). Dado que este cultivo depende en gran medida de las condiciones meteorológicas, resulta especialmente vulnerable a eventos extremos como sequías prolongadas, olas de calor y precipitaciones

excesivas, fenómenos que modifican la concentración de sacarosa (Ascoli et al., 2021). Para asegurar su desarrollo sostenible, la industria azucarera de Pánuco requiere monitoreo continuo y la implementación de prácticas que garanticen condiciones ambientales, hídricas y edafológicas óptimas (Cebada Merino, 2023).

Sumado a las amenazas climáticas se adhieren prácticas de cultivo intensivo, como el uso excesivo de fertilizantes y la quema de residuos que deterioran la estructura del suelo y reducen la sostenibilidad de los agroecosistemas (Cebada Merino, 2023). La combinación de factores climáticos adversos y técnicas agrícolas insostenibles pone de manifiesto la urgencia de adoptar estrategias de manejo agronómico y conservación del suelo para frenar la degradación y prolongar la vida útil de las plantaciones.

Frente a este panorama complejo la aplicación de modelos climáticos predictivos se presenta como una herramienta indispensable, los modelos de medias móviles y los calendarios climáticos permiten pronosticar eventos meteorológicos extremos y planificar de manera estratégica actividades como siembra, fertilización y cosecha, optimizando los rendimientos y reduciendo los riesgos asociados (Soler Temprano y Martín Vide, 2002; Ortega-Guzmán et al., 2022).

Por lo anterior este estudio tiene como objetivo evaluar el impacto económico de la variabilidad climática en la productividad de la caña de azúcar, tomando como caso de estudio el municipio de Pánuco, Veracruz. Para cubrir un vacío en la literatura, se



elaborarán calendarios climáticos detallados para las estaciones meteorológicas locales y se aplicarán modelos de medias móviles (MA) enfocados en anticipar eventos extremos y evaluar sus repercusiones sobre las cosechas. Esta metodología busca ofrecer herramientas precisas que optimicen la planificación agrícola y refuercen la sostenibilidad de la producción cañera en la región.

El artículo se organiza de la siguiente manera: i) revisión de literatura; ii) metodología utilizada para el análisis; iii) discusión de resultados; iv) conclusiones y recomendaciones. Con esta estructura, se busca ofrecer una comprensión integral del impacto de la variabilidad climática sobre la producción cañera.

2. Revisión de literatura

2.1 Variabilidad y cambio climático

La variabilidad climática consiste en oscilaciones de las condiciones climáticas en distintos marcos temporales, que pueden abarcar desde días, meses y décadas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2018). Se manifiesta mediante fluctuaciones en los patrones meteorológicos típicos de una región, vinculadas principalmente a procesos naturales como las interacciones océano-atmósfera y las variaciones en la radiación solar (Poleo, 2016). Dichas alteraciones, aunque recurrentes, no implican modificaciones permanentes en el clima, sino desviaciones temporales asociadas a factores cíclicos como los eventos de El Niño y La Niña. Estos últimos influyen en la frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos en diversas regiones (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2018).

Por otra parte, el cambio climático se caracteriza por transformaciones sostenidas

en los patrones climáticos promedio a escala regional o global, que perduran durante décadas o siglos (Ascoli et al., 2021). A diferencia de la variabilidad climática, este implica una alteración estable y profunda del sistema climático, causada principalmente por la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera debido a actividades humanas (como la quema de combustibles fósiles y la deforestación). Dicho proceso genera modificaciones duraderas en la temperatura y otros elementos climáticos, afectando tanto a los ecosistemas como a las condiciones de vida y actividades humanas a largo plazo (Poleo, 2016).

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones en las variables climáticas (como temperatura, precipitación y vientos) en escalas de tiempo que van desde años hasta décadas, o incluso más. Es la desviación del estado promedio del clima a largo plazo. Trata de las fluctuaciones naturales del clima, causadas por procesos internos del sistema climático (como el fenómeno de El Niño/La Niña) o por forzamientos externos naturales (como erupciones volcánicas o variaciones en la radiación solar). Estas fluctuaciones son cíclicas y el clima regresa a su estado promedio después de un tiempo.

Ambos conceptos, aunque interrelacionados, difieren en alcance y persistencia: la variabilidad climática explica fluctuaciones transitorias que retornan a la normalidad, mientras el cambio climático representa una modificación permanente del estado climático. Este último puede incluir fenómenos de variabilidad, pero implica una tendencia sostenida hacia nuevas condiciones (Poleo, 2016; Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2018).

2.2 Fenología de la caña de azúcar

La caña de azúcar es un cultivo esencial en la producción de azúcar y derivados, que



depende en gran medida de su adaptación a las condiciones climáticas y del cuidado de su ciclo de crecimiento (Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola, 1991). Este cultivo prospera en climas cálidos, donde la temperatura ideal durante su fase de crecimiento varía entre 27 y 33 °C, descendiendo en la etapa de maduración para favorecer la acumulación de sacarosa. Además, requiere una precipitación anual de entre 1,200 y 1,500 milímetros, distribuida de manera uniforme para evitar tanto los períodos de sequía como los excesos de humedad, ambos factores pueden afectar su desarrollo óptimo (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, 2014).

El ciclo de vida de la caña de azúcar se divide en cuatro etapas principales: iniciación, amacollamiento, rápido crecimiento y maduración. Durante cada una, el cultivo presenta necesidades específicas de riego y fertilización (Salazar-Ortiz et al., 2017). En zonas de gran variabilidad climática, el uso de sistemas de riego controlado y drenaje adecuado resulta fundamental para asegurar que la planta reciba la cantidad precisa de agua en cada fase de su desarrollo. Este cuidado es especialmente importante en la última etapa, donde la planta acumula el mayor contenido de sacarosa en sus tallos, clave para la producción eficiente de azúcar (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, 2014).

Por otro lado, el rendimiento y la calidad de la caña de azúcar dependen de la selección de variedades que se adapten bien a las condiciones ambientales locales (Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola, 1991). El éxito en el cultivo de caña de azúcar depende de una combinación de prácticas de manejo agronómico y un ajuste adecuado a las condiciones climáticas y edáficas de cada región productora (Centro

Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar, 2014).

2.3 Caña de azúcar y el impacto de la variabilidad climática

La caña de azúcar es uno de los cultivos de mayor relevancia para el sector agroindustrial en México debido a su aporte económico y social, especialmente en regiones tropicales. México se encuentra entre los principales productores a nivel mundial, siendo Veracruz uno de los estados líderes en su producción debido a su clima favorable y su infraestructura agrícola bien establecida (Martínez-Prats et al., 2021).

Sin embargo, el cambio climático plantea desafíos críticos para este cultivo. El aumento en las temperaturas globales y la variabilidad en los patrones de precipitación afectan de manera considerable el rendimiento de la caña de azúcar (Guerra y Hernández, 2007). En general, las condiciones ideales para este cultivo se encuentran en temperaturas moderadas de alrededor de 27-33 °C y una precipitación constante. Cuando estas condiciones se alteran, ya sea por temperaturas extremas o sequías intensas, el desarrollo y la productividad de la caña disminuyen notablemente (Organización Internacional del Azúcar, 2013).

En Veracruz el impacto del cambio climático se manifiesta en eventos climáticos extremos como sequías y ciclones, que perjudican los cultivos de caña. Estos fenómenos, intensificados por variaciones como El Niño y La Niña que generan alteraciones significativas en los patrones de precipitación y temperatura, influyendo directamente en las fases de crecimiento y maduración de la caña de azúcar (Ascoli et al., 2021), afectan no solo la cantidad de caña producida sino también la calidad del producto final. Además, el aumento en la frecuencia de estos eventos meteorológicos extremos genera



incertidumbre en la planificación agrícola y obliga a los agricultores a adaptarse a condiciones cada vez más impredecibles (Organización Internacional del Azúcar, 2013; López Feldman y Hernández Cortés, 2016).

Para mitigar estos efectos, es fundamental que se implementen estrategias de adaptación, como la diversificación de prácticas de cultivo y el desarrollo de variedades de caña más resistentes a los cambios climáticos. Estas acciones ayudarán a mantener la estabilidad de la producción en el estado de Veracruz, protegiendo así la economía local y el abastecimiento nacional de azúcar (Barragán, 2015).

Desde la perspectiva de la economía ecológica, resulta fundamental analizar cómo la producción de caña de azúcar, al estar fuertemente determinada por factores climáticos y ecológicos, requiere estrategias que reconozcan los límites biofísicos del ecosistema. Esta visión permite comprender que el sistema económico cañero no puede desvincularse de la base natural que lo sustenta, y que su sostenibilidad depende de una gestión integral que armonice la productividad, el bienestar de las comunidades rurales y la conservación ecológica. La combinación de modelos predictivos actualizados con prácticas agronómicas sostenibles será determinante para asegurar la competitividad y la resiliencia futura de la industria azucarera mexicana. El propósito último es garantizar la viabilidad económica de las comunidades productoras y minimizar los riesgos asociados a un clima cada vez más variable (Gómez-Merino et al., 2017).

2.4 Calendarios climáticos

Los calendarios climáticos, en particular los pluviométricos, constituyen herramientas esenciales para la recopilación sistemática de datos referentes a patrones de precipitación

diaria a lo largo del año. Estos instrumentos son de vital importancia para diversas aplicaciones prácticas, especialmente en sectores como la agricultura, la gestión de recursos hídricos y la planificación de actividades al aire libre (Soler y Martín, 2002).

La relevancia de los calendarios climáticos, y en específico de los pluviométricos, radica en su capacidad para proporcionar un entendimiento exhaustivo de las variaciones climáticas, permitiendo anticipar eventos extremos y gestionar de manera más eficaz los recursos disponibles (Martín García et al., 2008).

Los calendarios pluviométricos son particularmente útiles en regiones donde las precipitaciones intensas son comunes y pueden causar impactos socioeconómicos significativos. Estos ofrecen datos cruciales que ayudan a prevenir o mitigar los efectos negativos mediante una planificación y respuesta más informadas (Matos y Pérez, 2008). Además, en contextos donde la variabilidad climática afecta directamente la seguridad alimentaria y la sostenibilidad de los medios de vida, los calendarios pluviométricos proveen de información fundamental para la formulación de políticas públicas orientadas a la adaptación al cambio climático y la mitigación de sus efectos (Vázquez et al., 2015).

3. Materiales y métodos

Con el objetivo de evaluar el impacto de la variabilidad climática sobre la agroindustria de la caña de azúcar en el estado de Veracruz, se delimitó el análisis al municipio de Pánuco, seleccionado por su alta relevancia en la producción cañera a nivel estatal y por contar con una densidad aceptable de estaciones meteorológicas activas, lo cual permite una caracterización climática robusta y representativa. Se adoptó una estrategia metodológica de corte cuantitativo, basada en



la integración de datos climatológicos y productivos, con enfoque histórico y analítico. La pertinencia del estudio radica en la selección de un área geográfica clave para la caña de azúcar, mientras que la calidad se garantiza mediante la depuración de datos y el uso de fuentes oficiales. El nivel de sofisticación se refleja en el uso combinado de estadística descriptiva avanzada, análisis de tendencias mediante medias móviles y correlaciones cruzadas entre variables climáticas y económicas.

Los datos climáticos fueron extraídos de la plataforma de datos abiertos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), específicamente de la sección “Normales Climatológicas por Estado”. Esta base incluye registros diarios de temperatura máxima, mínima y precipitación, los cuales son fundamentales para detectar patrones de variabilidad y eventos extremos. La serie histórica comprendió el periodo de 1989 a 2019, seleccionando únicamente aquellas estaciones meteorológicas con datos continuos y de alta calidad. De las doce estaciones disponibles en el municipio, solo cuatro (Chicayan, El Olivo, Pánuco DGE y Santa Trinidad) cumplieron con los criterios de validación, lo cual refuerza la confiabilidad y consistencia de los datos analizados. Por su parte, los datos económicos se obtuvieron del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura, incluyendo variables clave como rendimiento por hectárea y valor total de la producción, seleccionadas por su representatividad e integración histórica con la actividad cañera local.

El análisis se estructuró en varias etapas complementarias. En primer lugar, se construyeron calendarios climáticos a partir de series diarias de al menos 30 años, siguiendo la recomendación metodológica de Soler y Martín (2002), lo cual permitió establecer

patrones estacionales y evaluar la frecuencia y duración de eventos extremos. Posteriormente, se aplicaron medidas de estadística descriptiva, como la media, la desviación estándar y los percentiles, para caracterizar la variabilidad climática y definir umbrales críticos con posible impacto en la productividad agrícola. Se utilizó el método de medias móviles para suavizar las fluctuaciones de corto plazo en las series de precipitación y temperatura, lo que permitió identificar tendencias estacionales y multianuales subyacentes (Ec. 1 y 2). Además, se realizaron análisis de correlación para evaluar el grado de asociación entre las variables climatológicas y las variables económicas cuantificando la fuerza y dirección de dicha relación.

Media Móvil:

$$M_t = \frac{1}{n} \sum_{i=t-n+1}^t x_i \quad (1)$$

Variabilidad estacional:

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{m,j} \quad (2)$$

Este enfoque integrador entre datos físicos y socioeconómicos proporciona una comprensión más amplia de la sensibilidad del sistema agroindustrial ante la variabilidad climática. La representación adecuada de los datos, la consistencia metodológica y la articulación teórica permiten avanzar hacia modelos explicativos más sólidos y útiles para la toma de decisiones en torno a la producción de caña de azúcar en escenarios de cambio climático.

En cuanto a las correlaciones, estas son herramientas estadísticas que cuantifica como están relacionadas dos variables. Obteniendo valores que oscilan entre -1 y 1; siendo 1 una correlación perfecta y -1 una correlación negativa perfecta.



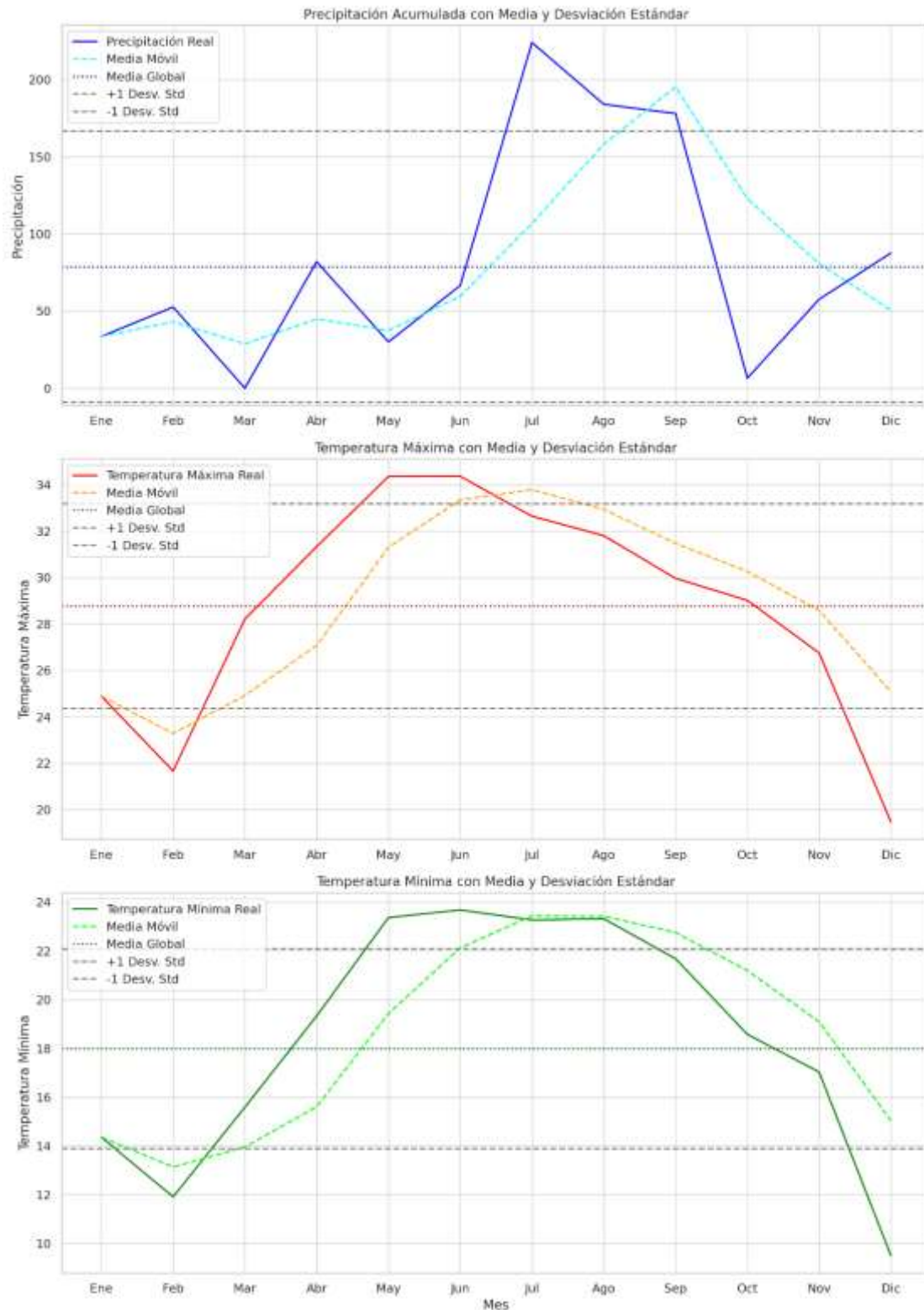
4. Resultados y discusión

Los calendarios climáticos (figuras 1-3) generados para el municipio de Pánuco muestran con claridad que los meses de junio, julio y agosto concentran los picos de precipitación, lo que coincide con la temporada de lluvias en la región. Si bien este exceso de agua favorece el crecimiento vegetativo, también incrementa la susceptibilidad a plagas y enfermedades, además de dificultar las labores de cosecha y

transporte (Guerra y Hernández, 2007). En contraste, los meses de menor precipitación son: enero, febrero, noviembre y diciembre, resultan más favorables para la recolección, al reducir la saturación de los suelos y facilitar la logística agrícola. Esta dinámica confirma lo señalado por estudios previos en Colombia y Guatemala, donde la estacionalidad de lluvias definió la productividad final del cultivo (CENGICAÑA, 2014; Cortés-Cataño et al., 2024).



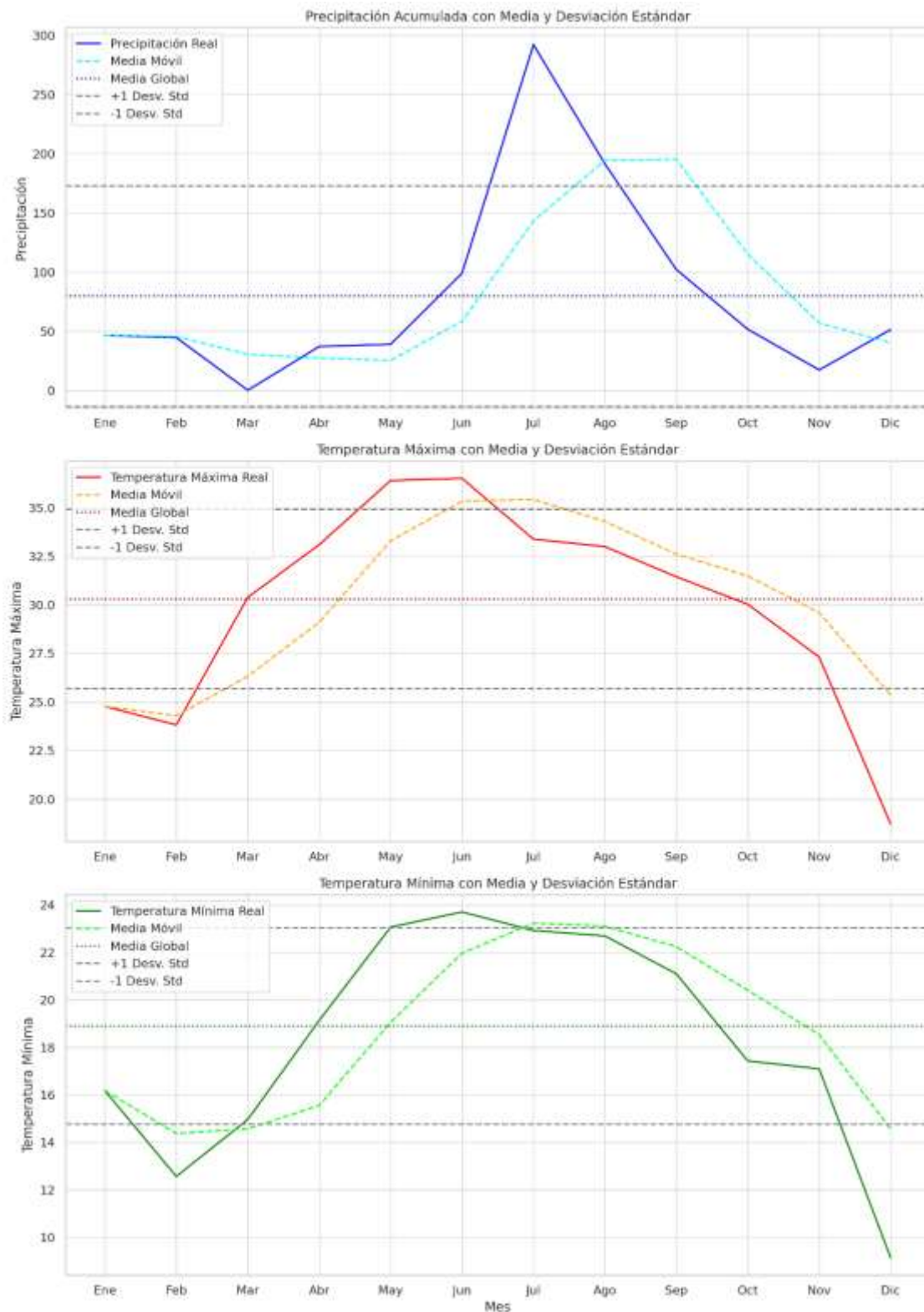
Figura 1. Calendarios climáticos de la estación de Chicayan



Fuente: Elaboración propia (2024).



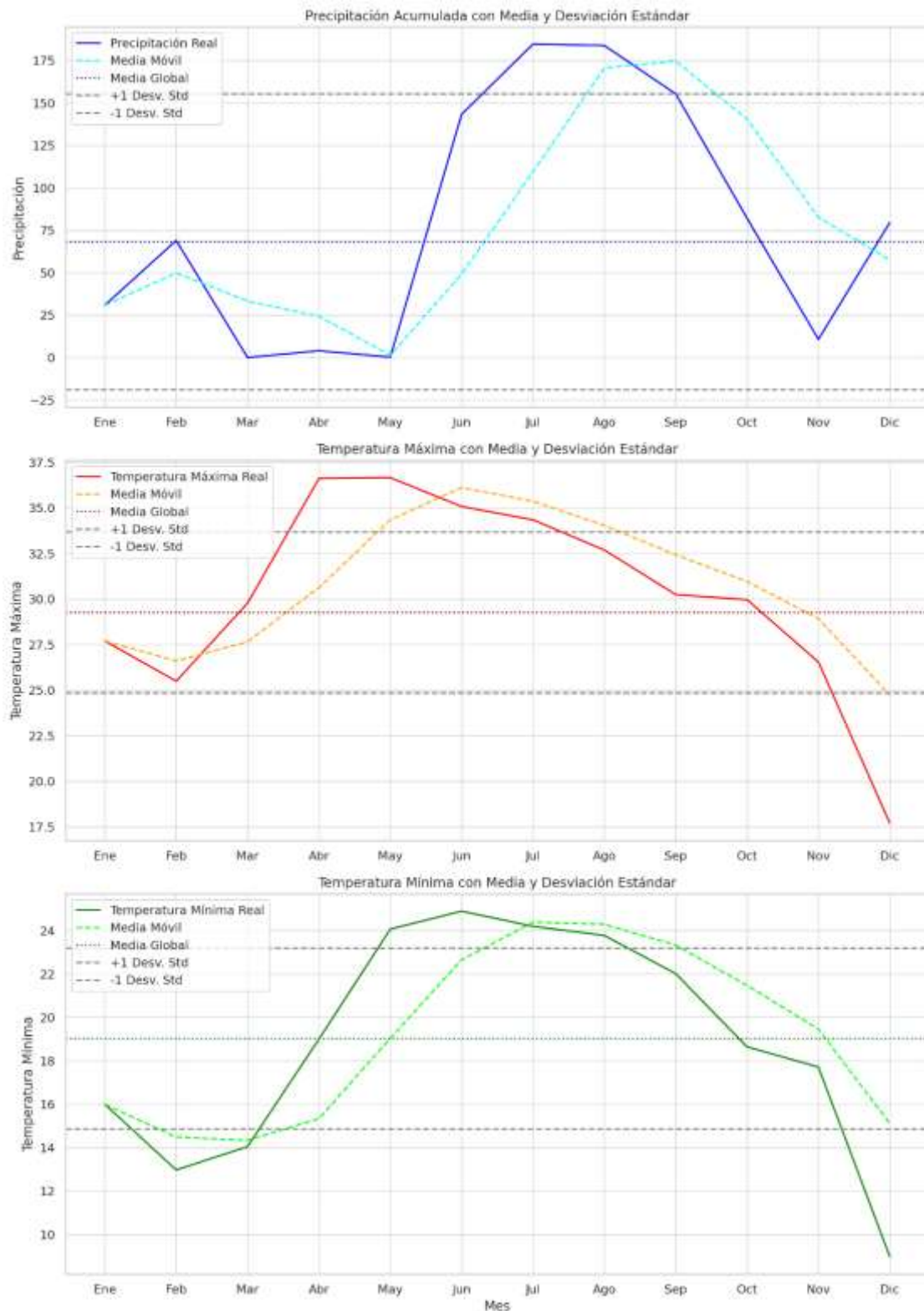
Figura 2. Calendarios climáticos de la estación El Olivo



Fuente: Elaboración propia (2024).



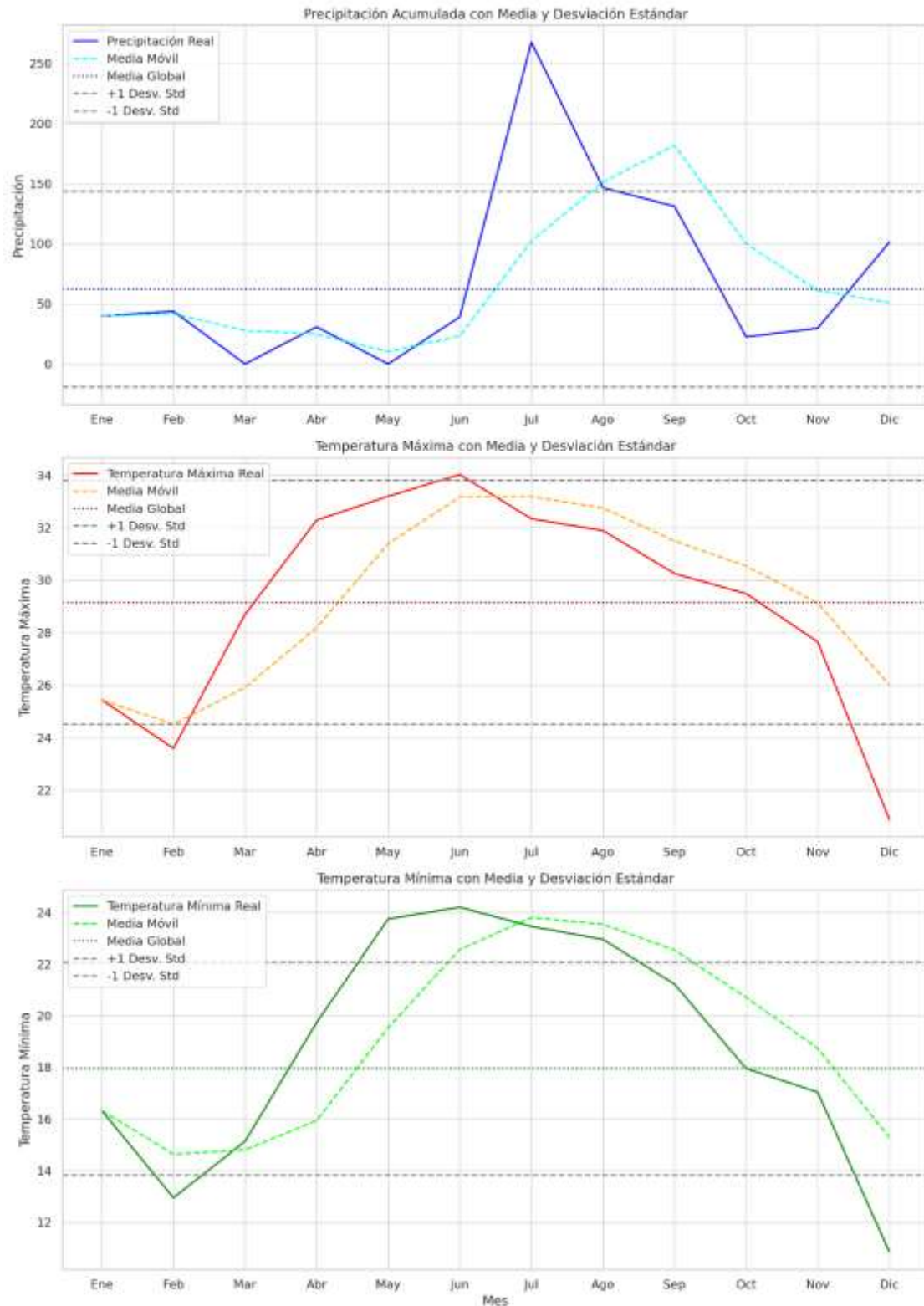
Figura 3. Calendarios climáticos de la estación de Pánuco DGE



Fuente: Elaboración propia (2024).



Figura 4. Calendarios climáticos de la estación Santa Trinidad



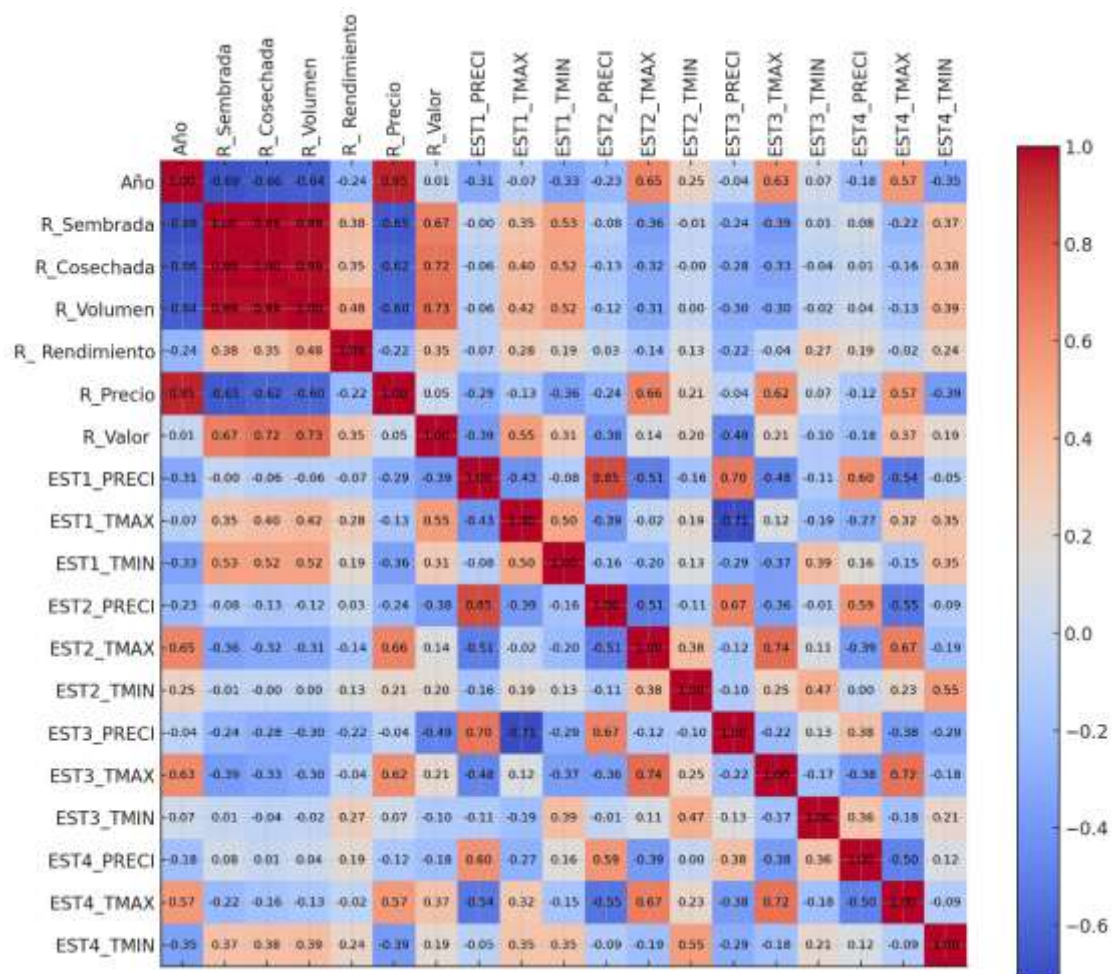
Fuente: Elaboración propia (2024).



Las diferencias observadas en las figuras 1 a 4 entre estaciones meteorológicas con valores de precipitación que varían de 177 mm a más de 300 mm en el mismo periodo evidencian una alta heterogeneidad espacial. Esta condición obliga a los productores a tomar decisiones diferenciadas de manejo agronómico según el microclima de cada localidad. En términos de temperaturas, se registraron máximas de hasta 37 °C en temporada cálida, lo cual puede generar estrés térmico y reducción de la concentración de sacarosa, un patrón similar al identificado en estudios realizados en otras regiones tropicales (Ascoli et al., 2021). Por otro lado, las heladas, aunque menos frecuentes,

representan un riesgo crítico en etapas de amacollamiento y rápido crecimiento, al reducir la densidad de tallos y limitar la acumulación de biomasa (CENGICANA, 2014). En contraste, la precipitación tuvo correlaciones débiles y negativas con el precio, lo cual sugiere que los excesos de agua, además de afectar la calidad del jugo, elevan los costos de producción por la dificultad en la cosecha. Este hallazgo es consistente con los reportes de la Organización Internacional del Azúcar (2013), que documentan cómo los eventos de exceso hídrico tienden a reducir la eficiencia económica del cultivo.

Figura 5. Correlograma de variables climáticas y económicas



Fuente: Elaboración propia (2024).



El análisis de correlaciones (figura 5), refuerza esta relación entre clima y economía. La temperatura máxima mostró una correlación positiva con el precio del producto ($r = 0.66$), sugiriendo que el incremento térmico, aunque potencialmente dañino para el rendimiento, también puede encarecer el valor del azúcar en el mercado por la menor disponibilidad de oferta.

A la luz de la Economía Ecológica, los resultados obtenidos revelan más que una simple correlación entre variables climáticas y económicas: evidencian la vulnerabilidad de un sistema productivo que opera en los límites de la sostenibilidad ecológica. El impacto de la variabilidad climática sobre la caña de azúcar pone de manifiesto la necesidad urgente de transitar hacia modelos que prioricen la resiliencia agroecológica y el uso racional del entorno natural, integrando saberes locales, justicia ambiental y límites biofísicos.

En este sentido, los resultados confirman la urgencia de implementar estrategias de adaptación localizadas. El desarrollo de variedades de caña más resistentes a estrés hídrico y térmico, la diversificación productiva y la incorporación de prácticas agroecológicas como rotación de cultivos, manejo integrado de nutrientes y conservación de suelos se perfilan como medidas clave para aumentar la resiliencia del sistema productivo. Estas propuestas coinciden con las recomendaciones de Gómez-Merino et al. (2017), quienes plantean la diversificación como un mecanismo para reducir la exposición del sector azucarero a fluctuaciones climáticas y de mercado.

Desde la perspectiva de la economía ecológica, el estudio evidencia que la productividad cañera no puede analizarse únicamente desde la lógica del mercado, sino como parte de un sistema socioecológico interdependiente. Reconocer los límites

biofísicos y el valor de los servicios ecosistémicos como la regulación hídrica y térmica es esencial para diseñar políticas públicas que garanticen la viabilidad de la industria en el largo plazo. Así, los resultados no solo describen una problemática productiva, sino que también ofrecen argumentos para reorientar el modelo de desarrollo cañero hacia uno más justo, resiliente y sostenible.

La eficacia de estos enfoques ha sido comprobada en diversas regiones: desde el monitoreo de glaciares en Perú (Barzola Rivera y Fretel Vadillo, 2024) hasta la utilización de sistemas de información geográfica para identificar áreas idóneas para la siembra de caña en Veracruz (Pardey & Alston, 2014; INEGI, 2023). La incorporación de tecnologías de monitoreo y predicción climática puede elevar la eficiencia en el uso de recursos y fortalecer la capacidad de adaptación del sector frente a la creciente variabilidad del clima.

Ajustar los ciclos productivos para alinearlos con estos patrones climáticos puede ofrecer una ventaja competitiva y adaptativa fundamental para manejar recursos de manera más resiliente ante condiciones adversas (Arboleyda, 2024).

Adoptar prácticas agroecológicas y adaptativas. Por ejemplo, la diversificación de cultivos, la rotación y el manejo integrado de nutrientes se perfila como una estrategia clave para mitigar los impactos del cambio climático. Tales medidas fortalecen la estabilidad económica de las comunidades rurales y contribuirían a la seguridad alimentaria nacional (Barzola Rivera y Fretel Vadillo, 2024). La diversificación productiva, en particular, reduce la exposición del sector azucarero a fluctuaciones climáticas y de mercado (Organización Internacional del Azúcar, 2013).



5. Conclusiones

La aplicación rigurosa de una metodología integral que incluyó el análisis de series históricas de temperatura y precipitación, el uso de medias móviles para atenuar las fluctuaciones de corto plazo y la estimación de coeficientes de correlación entre variables climáticas y precios de mercado permitió identificar con claridad los momentos de mayor vulnerabilidad en el cultivo de caña de azúcar en Veracruz. Se encontró que las heladas durante la fase de amacollamiento limitan significativamente la formación de biomasa, mientras que las lluvias intensas durante la cosecha complican la logística y reducen la calidad del producto final. Estas variaciones climáticas, acentuadas por la heterogeneidad dentro de la región, explican en buena medida las fluctuaciones en los rendimientos y en el valor económico de la caña, lo cual evidencia la necesidad urgente de implementar estrategias de adaptación climática.

Los métodos empleados son herramientas que resultan valiosas para mejorar la toma de decisiones, al ofrecer información localizada y

oportuna que se adapta a las particularidades de cada microclima. Esta integración de datos de múltiples estaciones meteorológicas y categorías de precios establece las bases para una toma de decisiones agrarias más flexibles y eficientes, capaz de ajustar los insumos y las prácticas agrícolas en función de condiciones locales específicas, para que posteriormente puedan replicarse y escalar a otras regiones cañeras del país.

Desde el enfoque de la economía ecológica, los hallazgos subrayan la importancia de reconocer y conservar los servicios ecosistémicos esenciales como el ciclo del agua, la fertilidad del suelo y la regulación térmica, así como fundamentos de cualquier política agrícola sostenible. Incorporar principios agroecológicos no solo mejora la resiliencia del sistema productivo frente al cambio climático, sino que también impulsa un modelo de desarrollo rural que equilibre la viabilidad económica, la protección ambiental y el bienestar social de las comunidades cañeras.

Referencias

Arboleyda, R.E. (2024). Campo cañero e industria azucarera de los siglos XIX a XXI: Historia y territorios. *Uluá Revista de Historia, Sociedad y Cultura*. 219-224. <https://doi.org/10.250009/urhsc.v2830>

Ascoli, D., Hacket-Pain, A., Pearse, I. S., Vacchiano, G., Corti, S., & Davini, P. (2021). Modes of climate variability bridge proximate and evolutionary mechanisms of masting. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1839). <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0380>

Barzola Rivera, D. G., y Fretel Vadillo, N. B. (2024). Dinámica glaciar del nevado

Huaytapallana y su relación con la variabilidad climática desde 1993-2023 [Tesis de pregrado, Universidad Continental].

Barragán, D. M. (2015). Impacto del cambio climático en la producción de caña de azúcar en los departamentos de Cauca y del Valle del Cauca. Trabajo de grado, Universidad de los Andes

Cebada-Merino, M., Crescencio-Andrade, Y., Serna-Lagunes, R., Del Rosario-Arellano, J. L., Andrés-Meza, P., Presa-Parra, E., Hernández-Salinas, G., Díaz-José, J., y Leyva-Ovalle, O. R. (2023). Soil characteristics modeling of a sugarcane



plantation in Veracruz, Mexico. *Revista de Geografía Agrícola*, 72(9), 1-18. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2023.72.9>

Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (CENGICAÑA). (2014). Ficha técnica agroclimática de la caña de azúcar. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación

Cortés-Cataño, C. F., Foronda-Tobón, Y., Paez-Ricardo, J. A., Parra-Herrera, J. E., & Cañon-Ayala, M. J. (2024). The effect of environmental variations on the production of the principal agricultural products in Colombia. *PLOS ONE*, 19(7), e0304035. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0304035>

Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola. (1991). Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica.

Gómez-Merino, F. C., Trejo-Téllez, L. I., Salazar-Ortiz, J., Pérez-Sato, J. A., Sentíes-Herrera, H. E., y Bello-Bello, J. J. (2017). La diversificación de la agroindustria azucarera como estrategia para México. *Agroproductividad*, 10(11), 7-12.

Guerra, A., y Hernández, A. (2007). El cambio climático y el cultivo de la caña de azúcar. Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático. <http://www.icc.org.gt/>

López Feldman, A. J., y Hernández Cortés, D. (2016). Cambio climático y agricultura: Una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El Trimestre Económico*, 83(332), 459-496. <http://dx.doi.org/10.20430/ete.v83i332.231>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, & Universidad Nacional de Colombia – UNAL. (2018). La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia. IDEAM.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023). Resultados definitivos del Censo Agropecuario 2022.

Martin García, M. M., Matos Pupo, F., y Hernández Manzilla, A. (2008). Estado comparativo de la precipitación de las estaciones meteorológicas de Ciego de Ávila. El calendario pluviométrico como metodología de aplicación.

Martínez-Prats, G., Chacón-Lozano, L. E., y Silva-Hernández, F. (2021). Análisis del sector agroindustrial de México 2020-2021. *Revista de Investigaciones - Universidad del Quindío*, 34(S5), 133-138. <https://orcid.org/0000-0001-6371-448X>

Matos Pupo, F., y Pérez Piña, M. (2008). Aplicación de calendarios climáticos en zonas de elevada frecuencia de intensas lluvias. Estudio de casos del territorio granmense.

OpenAI. (2025). ChatGPT (versión GPT-4) [Modelo de lenguaje]. <https://chat.openai.com/>. Nota: El contenido fue generado mediante interacción con el modelo ChatGPT para mejorar la redacción de secciones específicas del artículo.

Organización Internacional del Azúcar. (2013). Cambio climático y cultivos azucareros. Comité de Evaluación del Mercado, Consumo y Estadística.

Ortega-Guzmán, L., Rojas-Soto, O., Santiago-Alarcon, D., Huber-Sannwald, E., & Chapa-Vargas, L. (2022). Climate predictors and climate change projections for avian haemosporidian prevalence in Mexico. *Parasitology*, 149(8), 1129–1144. <https://doi.org/10.1017/S0031182022000683>

Pardey, P. G., & Alston, J. M. (2014). *Agriculture in the global economy*. The University of Chicago Press.

Poleo, D. (2016). ¿Cambio climático o variabilidad climática? Historia, ciencia y política en el clima mesoamericano. *Revista de Ciencias Ambientales (Tropical Journal of Environmental Science)*, 50(1), 25-39. <https://doi.org/10.15359/rca.50-1.2>

Salazar-Ortiz, J., Trejo-Téllez, L. I., Valdez-Balero, A., Sentíes-Herrera, H. E., Rosas-



Rodríguez, M., Gallegos-Sánchez, J., Crosby-Galván, M. M., y Gómez-Merino, F. C. (2017). Caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en la alimentación de rumiantes: Experiencias generadas con cañas forrajeras. *Agroproductividad*, 10(11), 70-75.

Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). Cierre de la producción agrícola por cultivo. SIAP. Recuperado el [08 de septiembre 2024], de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Soler Temprano, X., y Martín Vide, J. (2002). Los calendarios climáticos: Una propuesta metodológica. Grupo de Climatología, Parc Científic, Universidad de Barcelona. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9185>

Vázquez Montenegro, R. J., Durán Zarabozo, O., y Baca, M. (2015). Modelos de impacto en la agricultura teniendo en cuenta los escenarios de la agricultura del cambio climático.