



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Facultad de Agronomía

Maestría en Meteorología Agrícola

Variables meteorológicas que influyen en el rendimiento de la caña de azúcar en  
el sur de Guatemala

Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos  
Aires en Meteorología Agrícola

Maestrando: Ing. Agr. Elmer Adolfo Orrego León  
Director de tesis: M Sc. Rafael Horacio Hurtado  
Codirectora de tesis: M Sc. María Fernández Long

Buenos Aires, Argentina, 2019.

Fecha de defensa: junio, 2019.

# **Variables meteorológicas que influyen en el rendimiento de la caña de azúcar en el sur de Guatemala**

## **RESUMEN**

Las fluctuaciones del rendimiento de la caña de azúcar a nivel mundial dependen del clima y su variabilidad temporal. En países como México, Etiopía, Brasil, Argentina, y Honduras, se ha estudiado la influencia de variables meteorológicas sobre el rendimiento de la caña de azúcar para aprovechar los resultados y optimizar el rendimiento. En Guatemala estos índices han sido poco investigados, a pesar de ser el principal cultivo agrícola que aporta al PIB del país. El cultivo se desarrolla en la zona sur del país y abarca una superficie de 268,735 hectáreas, con una producción de 2,822,590 toneladas de azúcar, de las cuales el 30% se utiliza para abastecer el mercado nacional y el 70% se exporta, generando USD 825 millones de dólares de ingreso según datos del año 2017.

Por lo que el objetivo del presente trabajo es analizar y comprender la influencia de las variables meteorológicas sobre el rendimiento de la caña de azúcar y generar modelos de estimación del rendimiento. Se analizaron dos bases de datos con escala diferente; una a nivel de país y otra a nivel de lote. Los primeros datos a nivel de país corresponden a las zafas comprendidas entre los periodos 1975/76 hasta 2014/15. A nivel de lote, se utilizaron 32,453 datos de rendimiento, correspondientes a las zafas 2003/04 hasta 2017/18 pertenecientes al ingenio la Unión S.A. (latitud 14.27, longitud -91.10).

A nivel país se analizó la influencia de las variables meteorológicas desde las etapas fenológicas de rebrote hasta la cosecha (12 meses de edad), y a nivel de lote, desde la elongación (rápido crecimiento) hasta la maduración (desde uno hasta el séptimo mes previo a la cosecha). A nivel país se evaluaron siete variables (temperatura máxima, media, mínima, amplitud térmica, precipitación, humedad relativa y evapotranspiración potencial) calculados a partir de datos diarios (1975-2015) de estaciones meteorológicas convencionales. A nivel lote, se evaluaron 11 variables (velocidad del viento máxima y media, temperatura máxima, media y mínima, amplitud térmica, radiación solar, humedad relativa, precipitación, días sin precipitación y evapotranspiración potencial) y se utilizaron datos recolectados cada 15 minutos de estaciones meteorológicas automáticas, las cuales reciben control de calidad semanal y mantenimiento mensual.

Los datos de rendimiento a nivel de lote que se utilizaron fueron seleccionados por las siguientes características; cultivados en el estrato bajo (40-100 m.s.n.m.), con 12 meses

antes de su cosecha, la variedad CP 722086 (representa el 60% de las variedades del ingenio), lotes con al menos 11 años de rendimiento continuo, lotes que fueron cosechados en diciembre, marzo y abril.

A nivel país, los índices de temperatura máxima y media, amplitud térmica, precipitación, humedad relativa y evapotranspiración potencial fueron altamente significativos durante agosto, cuando los cañaverales se encuentran en las etapas de macollamiento y elongación. Mientras la temperatura mínima fue altamente significativa en abril, cuando los cañaverales que quedan por cosechar (abril y mayo) están en la etapa de maduración.

A nivel de lote, los índices que influyen para las cosechas (diciembre, marzo y abril) son: velocidad máxima del viento, temperatura máxima, media y mínima, radiación solar, humedad relativa, precipitación, días sin precipitación y evapotranspiración potencial. Los índices que no son comunes en ambas cosechas son: amplitud térmica, considerada para diciembre y marzo, y la velocidad media del viento para la cosecha de abril. Cabe mencionar que hay índices que pueden influir en el rendimiento dependiendo del mes de cosecha del lote, los elementos del clima y el tiempo, de cada índice durante el año, la edad y la etapa fenológica del cañaveral.

El modelo creado a nivel país, estima el rendimiento con los índices humedad relativa y evapotranspiración del mes de agosto, con un coeficiente de determinación ajustado de 0.54; lo que permite estimar el rendimiento tres meses antes del inicio de la zafra. A nivel lote se obtuvieron tres modelos de estimación de rendimiento, aunque solo se recomienda utilizar para lotes cosechados en diciembre. Para lotes cosechados en diciembre, los índices seleccionados son; precipitación de julio y evapotranspiración de noviembre y diciembre.

## **Effects of meteorological variables on the performance of sugarcane in southern Guatemala**

### **ABSTRACT**

The worldwide fluctuations of the sugarcane performance are up to the climate and its temporal variability. In countries such as Mexico, Ethiopia, Brazil, Argentina, and Honduras, the influence of the weather indexes over the performance of sugar cane has been researched to take advantage of it. In other hand, in Guatemala those variables and their influence over sugar cane performance has been barely researched, despite the fact that this is the main agriculture product that contributes to the GDP of the country. Sugarcane is located in the south of the country, in a surface of 268,735 ha of crops, with a total production of 2,822,590 tons of sugar, which 30% out of it are for the local market, while the 70% is exported, generating USD 825 million income for the country in 2017.

The research and comprehension of the influence of those weather variables over the performance of sugar cane has not been sufficiently developed in southern Guatemala. Thus the objective of this project is to analyze and comprehend the influence of weather variables over the performance of sugar cane, and then to create models to estimate performance.

Two data bases with different measurements were analyzed. One at the country level, and the other one at the plot level. Data at the level country was analyzed from the harvest 1975/1976 until 2014/2015, data obtained from the document "Historic series of production, exports, and consumption of sugar in Guatemala", while for the plot level data 32453 performance data were used, since the harvest 2003/2004 until the 2017/2018 of the La Union Sugar Mill.

At the country level, the influence of the variables was analyzed from regrowth until harvest (12 months old), and at the plot level, from one up to seven months before harvest. At the country level, seven variables were evaluated (maximum, average and minimum temperature, thermal amplitude, rainfall, relative humidity, and potential evapotranspiration) calculated from daily data (1975-2015) gathered through conventional weather stations. At the country level, 11 variables were evaluated (maximum and average speed; maximum, average, and minimum temperature, thermal amplitude, solar radiation, relative humidity, rainfall, days without rainfall, and potential evapotranspiration) and we used data collected every 15 minutes from automated weather stations, which receive weekly quality control and

monthly maintenance. A quality control check procedure was performed in both weather and performance data basis. Also, the leftovers were calculated to delete trends in the variables and the technological effect in the performance data.

Performance data at the plot level that was used were chosen due to the following characteristics: crops in the low stratum (40-100 meters above sea level) 12 months before harvest with the CP722086 variety (represents 60% of the varieties of the sugar mill), plots with at least 11 years of continuous performance, and plots that were harvested in December, March, and April. To identify the influence of the variables, the Spearman correlations were used. To elaborate the models, the Stepwise Forward multiple regression method was used.

At the country level, the variables of maximum and average temperature, thermal amplitude, rainfall, relative humidity, and potential evapotranspiration were highly significant during August, when the sugar cane fields are in the elongation and tiller stages. While the minimum temperature was highly significant in April, when the sugar cane fields that are still to be harvested (April and May) are in the ripening stage.

While at the plot level, the variables that influence for the harvest in December, March, and April are: maximum wind speed, maximum, average, and minimum temperature, solar radiation, relative humidity, rainfall, days without rainfall, and potential evapotranspiration. The indexes that are not common between both harvest are: thermal amplitude, considered for December and March, and the average wind speed for the harvest of April. Variables can influence in the performance due to the month of harvest for the plot, the climate advancement for each variable during the year, the age, and phenological stage of the sugar cane.

The model created at the country level estimates performance with the indexes relative humidity and evapotranspiration for August, with a coefficient of determination adjusted to 0.54, which allows to estimate performance three months in advance of harvesting. At the plot level, three performance models in function of the harvesting month were obtained. It is only recommended to use the generated models for batches harvested in December. For the plots harvested in December, the chosen indexes are: rainfall in July and evapotranspiration in November and December.

# Índice general

Contenido	Página
1. Introducción .....	1
2. Objetivos .....	3
3. Marco referencial .....	4
3.1. Ubicación de la caña de azúcar .....	4
3.2. Importancia económica de la caña de azúcar en Guatemala .....	4
3.3. Ingenios azucareros de Guatemala .....	5
3.4. Sistema de producción de la caña de azúcar en Guatemala .....	5
3.4.1. Variedades de caña de azúcar .....	5
3.4.2. Zonas altitudinales .....	6
3.4.3. Manejo agronómico .....	6
3.4.3.1. Preparación del suelo .....	6
3.4.3.2. Siembra o resiembra .....	7
3.4.3.3. Riego .....	7
3.4.3.4. Malezas .....	9
3.4.3.5. Plagas y enfermedades .....	10
3.4.3.6. Cosecha .....	11
3.4.4. Productividad .....	12
3.5. Clima de Guatemala .....	12
3.5.1. El clima en el sur de Guatemala .....	14
4. Marco teórico .....	16
4.1. Requerimientos de la caña de azúcar .....	16
4.1.1. Temperaturas .....	16
4.1.2. Amplitud térmica .....	16
4.1.3. Radiación solar global en superficie .....	17
4.1.4. Precipitación .....	17
4.2. Generación del rendimiento y calidad .....	17
4.2.1. Etapa de emergencia .....	18
4.2.2. Etapa de macollaje .....	18
4.2.3. Etapa de elongación .....	19
4.2.4. Etapa de maduración .....	20
5. Materiales y métodos .....	21
5.1. Datos .....	21
5.2. Métodos .....	24
5.2.1. Datos de rendimiento de la caña de azúcar .....	24
5.2.2. Variables meteorológicas .....	25
5.2.3. Influencia de los índices sobre el rendimiento de la caña de azúcar .....	27
5.2.4. Selección de índices explicativos para estimar el rendimiento .....	28
5.2.5. Limitaciones .....	28
6. Resultados .....	29
6.1. Variables que influyen en el rendimiento de azúcar .....	29
6.1.1. Variables a nivel país .....	29

6.1.2.	Variables a nivel de lote .....	29
6.1.2.1.	Cosechados en diciembre.....	30
6.1.2.2.	Cosechados en marzo .....	30
6.1.2.3.	Cosechados en abril .....	31
6.2.	Modelos de estimación del rendimiento de la caña de azúcar.....	32
6.2.1.	Modelo a nivel país .....	32
6.2.2.	Modelo a nivel lote .....	33
7.	Discusión .....	34
7.1.	Variables meteorológicas que influyen en el rendimiento de la caña de azúcar ....	34
7.1.1.	Variables a nivel país .....	34
7.1.1.1.	En abril.....	34
7.1.1.2.	En agosto.....	35
7.1.2.	Variables a nivel lote .....	39
7.1.3.1.	Velocidad media del viento .....	40
7.1.3.2.	Velocidad máxima del viento.....	41
7.1.3.3.	Temperatura máxima .....	43
7.1.3.4.	Temperatura media.....	44
7.1.3.5.	Temperatura mínima.....	45
7.1.3.6.	Amplitud térmica .....	46
7.1.3.7.	Radiación solar en superficie .....	47
7.1.3.8.	Precipitación .....	49
7.1.3.9.	Humedad relativa .....	51
7.1.3.10.	Días sin precipitación .....	52
7.1.3.11.	Evapotranspiración potencial .....	53
7.2.	Modelos de estimación del rendimiento de la caña de azúcar.....	56
7.2.1.	Modelos a nivel país .....	56
7.2.2.	Modelos a nivel lote .....	57
8.	Conclusiones.....	60
9.	Recomendaciones y futuros estudios.....	61
10.	Bibliografías .....	62

## Índice de cuadros

<b>Cuadro</b>	<b>Contenido</b>	<b>Página</b>
<b>Cuadro 1:</b>	Factor de pérdida e índice de daño estimado para las principales plagas. ....	11
<b>Cuadro 2:</b>	Ubicación de las estaciones y variables que miden.....	24
<b>Cuadro 3:</b>	Coeficiente de correlación entre los índices y el rendimiento a nivel de país..	29
<b>Cuadro 4:</b>	Coeficientes de correlación de lotes cosechados en diciembre.....	30
<b>Cuadro 5:</b>	Coeficientes de correlación de lotes cosechado en marzo. ....	31
<b>Cuadro 6:</b>	Coeficientes de correlación de lotes cosechados en abril.....	31
<b>Cuadro 7:</b>	Modelos de estimación del rendimiento a nivel de lote.....	33
<b>Cuadro 8:</b>	Correlación de la velocidad del viento y el rendimiento. ....	41
<b>Cuadro 9:</b>	Correlación de la velocidad máxima del viento y el rendimiento. ....	42
<b>Cuadro 10:</b>	Correlación de la temperatura máxima y el rendimiento. ....	43
<b>Cuadro 11:</b>	Correlación de la temperatura media y el rendimiento.....	44
<b>Cuadro 12:</b>	Correlación de la temperatura mínima y el rendimiento.....	45
<b>Cuadro 13:</b>	Correlación de la amplitud térmica y el rendimiento. ....	47
<b>Cuadro 14:</b>	Correlación de la radiación solar global en superficie y el rendimiento. ....	48
<b>Cuadro 15:</b>	Correlación de la precipitación y el rendimiento.....	50
<b>Cuadro 16:</b>	Correlación de la humedad relativa y el rendimiento. ....	51
<b>Cuadro 17:</b>	Correlación de los días sin precipitación y el rendimiento.....	53
<b>Cuadro 18:</b>	Correlación de la evapotranspiración potencial y el rendimiento. ....	55

## Índice de figuras

<b>Figura</b>	<b>Contenido</b>	<b>Página</b>
<b>Figura 1:</b>	Zona cañera del sur de Guatemala. ....	4
<b>Figura 2:</b>	Composición varietal de la Agroindustria Azucarera de Guatemala. ....	5
<b>Figura 3:</b>	Estrato altitudinales de la zona cañera de Guatemala.....	6
<b>Figura 4:</b>	Evolución del uso de riego en la agroindustria azucarera de Guatemala. ....	8
<b>Figura 5:</b>	Información de días promedio de déficit hídrico, días para riego después y antes del corte en cada periodo de zafra y estrato altitudinal. ....	9
<b>Figura 6:</b>	Principales malezas según su importancia en la agroindustria azucarera. ....	10
<b>Figura 7:</b>	Comparativo del área de caña de azúcar cosechada manual y mecanizada. ..	11
<b>Figura 8:</b>	Comparativo de área de caña de azúcar cosechada en verde y quemado. ....	12
<b>Figura 9:</b>	Evolución del rendimiento de azúcar por hectárea (TAH) en Guatemala. ....	12
<b>Figura 10:</b>	Regiones climáticas de Guatemala. ....	13
<b>Figura 11:</b>	Etapas fenológicas de la caña de azúcar. ....	18
<b>Figura 12:</b>	Lotes con series de 11 años de rendimiento consecutivo. ....	22
<b>Figura 13:</b>	Selección de los datos de rendimiento a nivel de lote. ....	23
<b>Figura 14:</b>	Polinomio del rendimiento de azúcar por hectáreas. ....	25
<b>Figura 15:</b>	Marcha de las temperaturas y coeficientes de correlación. ....	35
<b>Figura 16:</b>	Marcha de la amplitud térmica media y el coeficiente de correlación. ....	36
<b>Figura 17:</b>	Marcha de la precipitación acumulada y el coeficiente de correlación.....	37
<b>Figura 18:</b>	Marcha del déficit y el coeficiente de correlación. ....	38
<b>Figura 19:</b>	Marcha de la evapotranspiración y el coeficiente de correlación. ....	38
<b>Figura 20:</b>	Racha de la humedad relativa y el coeficiente de correlación. ....	39
<b>Figura 21:</b>	Marcha de la velocidad media del viento en el estrato bajo. ....	40
<b>Figura 22:</b>	Marcha de la velocidad máxima del viento en el estrato bajo. ....	43
<b>Figura 23:</b>	Marcha de la temperatura máxima en el estrato bajo. ....	44
<b>Figura 24:</b>	Marcha de la temperatura media en el estrato bajo. ....	45
<b>Figura 25:</b>	Marcha de la temperatura mínima en el estrato bajo. ....	46
<b>Figura 26:</b>	Marcha de la amplitud térmica en el estrato bajo. ....	47
<b>Figura 27:</b>	Marcha de la radiación solar global acumulada en superficie. ....	48
<b>Figura 28:</b>	Marcha de la precipitación mensual en el estrato bajo. ....	51
<b>Figura 29:</b>	Marcha de la humedad relativa media en el estrato bajo. ....	52
<b>Figura 30:</b>	Marcha de los días sin lluvia en el estrato bajo. ....	53
<b>Figura 31:</b>	Marcha de la evapotranspiración potencial en el estrato bajo. ....	55
<b>Figura 32:</b>	Rendimiento real y estimado a nivel país. ....	56
<b>Figura 33:</b>	Rendimiento real y estimado en lotes cosechados en diciembre. ....	57

## Agradecimientos

A Dios por apoyarme durante estos dos años con paz, sabiduría, paciencia, salud y motivación para lograr esta meta en mi vida.

A la Universidad de Buenos Aires y a la maestría en Meteorología Agrícola, les agradezco por su labor, muchas veces subestimada, se enfocan en cuidar los saberes del mundo, y permitirles a otros expandir sus conocimientos. Nos ayudan a vivir el sueño de superarnos y cumplir nuestras expectativas, y de siempre ir por la constante mejora, para ser mejores seres humanos. En esta ocasión no ha sido la excepción y exalto su trabajo y agradezco por ayudarme a lograr esta meta en mi vida.

A mi director Rafael Horacio Hurtado y codirectora de tesis Maria Fernández Long, me han ayudado a expandir mis conocimientos y terminar la tesis en tiempo récord, agradezco mucho el tiempo dedicado y por compartir sus conocimientos durante todo el proceso de la tesis.

A mis compañeros Gustavo Medina, Francisco Mora, Marcelo Medina, Johaner Flores y Jorgito, que durante dos años fueron más que eso y se convirtieron en amigos, que juntos vivimos todo este proceso de aprendizaje integral, gracias a ustedes todo este proceso fue menos difícil.

A Alex Guerra director del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC) por confiar en mí y apoyarme para lograr una meta más en mi vida.

A Olga Penalba directora de la maestría, por su dedicación, paciencia y por compartir sus conocimientos durante estos dos años.

A mi esposa Graciela Alvarez por su apoyo, amor, comprensión y por siempre ser mi mano derecha a pesar de la distancia, me ha demostrado que la distancia no es un obstáculo cuando realmente hay amor.

A mi madre por todo su apoyo durante cada una de las etapas de mi vida, he logrado muchas cosas gracias al apoyo de ella durante mi formación.

Han sido los dos mejores años de mi vida, llenos de alegrías, tristezas, esfuerzo, dedicación, sacrificio, estrés y sobre todo muchas sabidurías, pero he logrado la meta gracias a todas las personas que contribuyeron de una u otra manera a lograr esta meta en mi vida, les doy gracias y que Dios los bendiga siempre.

## 1. Introducción

La caña de azúcar representa el 70% de la producción total de azúcar del mundo y se extiende a lo largo de los trópicos y subtropicos, entre latitudes 36.5°N hasta los 31°S (Romero et al., 2009). En Guatemala se producen 2.82 millones de toneladas de azúcar de las cuales el 70% se exporta (ASAZGUA, 2018), generando USD 825 millones de dólares ingreso al país para el año 2017 (Banco de Guatemala, 2018a). La producción se concentra en el sur de Guatemala, la cual está dividida en cuatro estratos altitudinales, estrato alto (>300 m.s.n.m.), medio (100-300 m.s.n.m.), bajo (40-100 m.s.n.m.) y litoral (0-40 m.s.n.m.). Inicia su cosecha en noviembre de cada año y termina en mayo del año siguiente, alcanzando sus mejores rendimientos en diciembre (por arriba de 11 toneladas de azúcar por hectárea -TAH), disminuyendo cada mes, hasta terminar en mayo (9.2 TAH) (Castro, 2014a).

Pero esta producción tiene sus dificultades, siendo el clima el principal factor que influye en la variabilidad del rendimiento en Guatemala, especialmente durante El Niño Oscilación del Sur (ENOS), donde, durante su fase cálida (El Niño) el rendimiento aumenta, y disminuye en su fase fría (Niña) (Suarez, 2012).

En varios países productores se ha estudiado la influencia del clima sobre el rendimiento o maduración de la caña de azúcar, a través de variables meteorológicas: en México se determinó (durante las zafas 2008/09-2012/13) que la precipitación y amplitud térmica influyen significativamente en la concentración de azúcar y en el rendimiento del cultivo (Vásquez, 2017); en Etiopía, señalaron que la temperatura y el déficit desempeñan un papel importante en la maduración del cultivo (Ayele et al., 2016); en Brasil demostraron, que la restricción de la precipitación mejora la maduración (Cardozo et al., 2013); en Argentina se estudió que la precipitación no influye significativamente sobre el rendimiento de biomasa (Ferraro et al., 2009); en Honduras se evidenció la influencia significativa entre la temperatura mínima y precipitación sobre el rendimiento del cultivo (Arias, 2008); y en Colombia calcularon con datos de 8 años, correlaciones negativas entre la precipitación y temperatura mínima, y el rendimiento de azúcar en campo (Amaya et al., 1995) y fabrica (Cock et al., 1993. Consultado por Amaya et al., 1995), que ocurre dos meses antes de la cosecha; en Guatemala se observaron influencias significativas entre la temperatura

mínima y la amplitud térmica sobre el rendimiento de azúcar en el estrato medio<sup>1</sup> (Castro et al., 2010; Castro et al., 2012).

Sin embargo, no hay suficientes estudios de la influencia de otras variables meteorológicas sobre el rendimiento. Por ello se plantea estudiar las siguientes variables: velocidad del viento media y máxima, evapotranspiración potencial, temperatura media y máxima, radiación solar global, humedad relativa, días sin precipitación, y déficit hídrico. Esto se analizó en dos bases de datos completamente distintas, a nivel de país (datos en promedio anual de Guatemala) y a nivel de lote, este último con datos de rendimiento en lotes que se encuentran en el estrato bajo del sur de Guatemala. Para analizar y comprender la influencia de estas variables meteorológicas en el rendimiento del cultivo en el estrato bajo del Sur de Guatemala, para lo cual se plantearon los siguientes objetivos: identificar las principales variables meteorológicas y el momento de su influencia en el rendimiento a nivel de país y de lote, y crear un modelo de estimación de rendimiento en función de las variables que más contribuyen en el rendimiento del cultivo a nivel de país y de lote.

---

<sup>1</sup> Cañaverales que se encuentran entre los 41 y 100 m.s.n.m.

## **2. Objetivos**

### **General**

- Analizar y explicar la influencia de variables meteorológicas sobre el rendimiento de la caña de azúcar a nivel de país y a nivel de lote en el Sur de Guatemala.

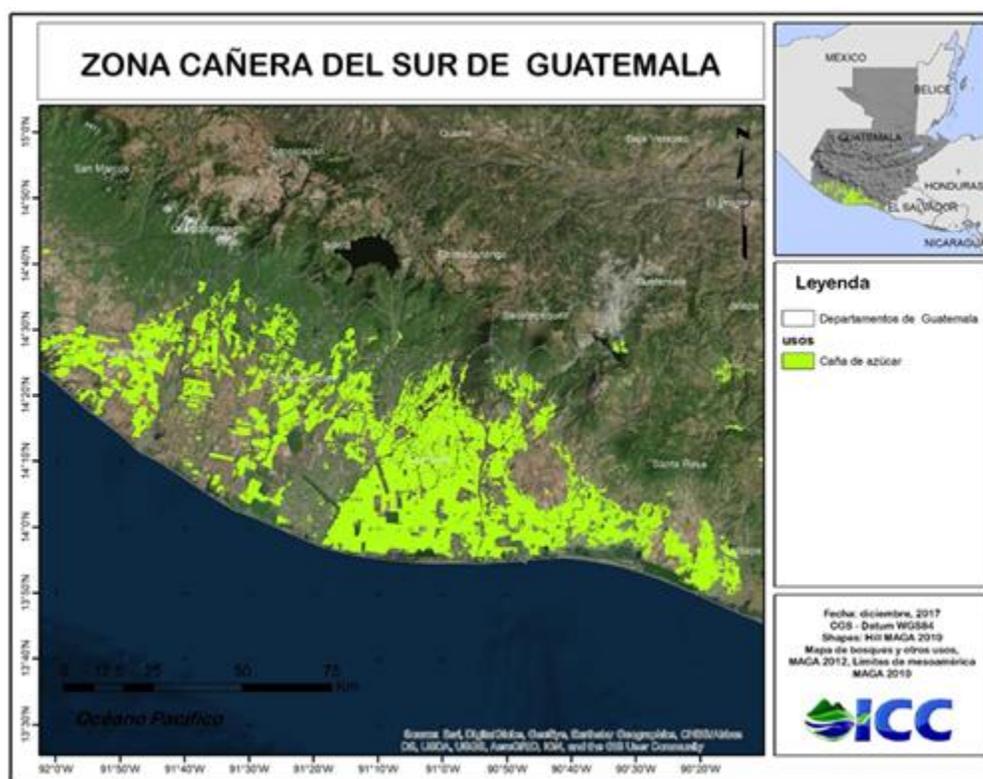
### **Específicos**

- Identificar las principales variables meteorológicas y las etapas fenológicas sobre las que indican en la determinación del rendimiento del cultivo a nivel de país y a nivel de lote en el sur de Guatemala.
- Crear modelos de estimación de rendimiento en función de las variables que más contribuyen en la determinación del rendimiento a nivel de país y a nivel de lote en el sur de Guatemala.

### 3. Marco referencial

#### 3.1. Ubicación de la caña de azúcar

El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala se encuentra en el sur del país (entre latitud 13.71° y 14.70°; y entre longitud 90.10° y 92.00°), en los departamentos de Retalhuleu, Suchitepéquez, Escuintla y Santa Rosa. La superficie cultivada alcanza las 268.735 hectáreas (Figura 1), con una producción de 2.822.590 toneladas de azúcar, de las cuales el 70% se exporta y el resto se utiliza para abastecer el mercado nacional (CENGICANA, 2016).



**Figura 1:** Zona cañera del sur de Guatemala.

Fuente: Mapa de bosques y otros usos, MAGA (2012).

#### 3.2. Importancia económica de la caña de azúcar en Guatemala

El azúcar es el principal producto agroindustrial de exportación de Guatemala, en 2016, representó el 9.3% de las exportaciones totales del país y ocupó el segundo lugar en

exportaciones de azúcar de Latinoamérica y cuarto exportador a nivel mundial. Además, es el tercero en productividad a nivel global (ASAZGUA, 2018).

En 2016 se exportó azúcar y sus derivados, equivalentes a USD 979 millones (Banco de Guatemala, 2018b). Esto generó 82 mil empleos directos que representa el 5.33% de los empleos formales del país, y 410 mil empleos indirectos (ASAZGUA, 2018).

### 3.3. Ingenios azucareros de Guatemala

Actualmente existen 11 Ingenios en el Sur de Guatemala, entre ellos: El Pilar, Tulumá, Palo Gordo, Madre Tierra, Pantaleón-Concepción, Magdalena, Santa Ana, Trinidad-San Diego, Santa Teresa, La Sonrisa y La Unión.

### 3.4. Sistema de producción de la caña de azúcar en Guatemala

#### 3.4.1. Variedades de caña de azúcar

Durante la zafra 2017-2018 las principales variedades de la Agroindustria Azucarera de Guatemala fueron; Cp72-2086 ocupando un 32.7% del área, la CP73-1547 el 12.3%, la CG02-163 el 10.8%, la CG98-78 el 8.5%, CP88-1165 el 5%, la CG98-46 el 3.8%, la SP71-6161 el 3.2%, la RB84-5210 el 2.5%, la SP79-1287 el 2.3%, la Mex79-431 el 2.1%, la CG00-102 el 1.1%, la RB73-2577 el 1.1%, la CG04-10267 el 1% (Figura 2) y otras variedades ocupan el resto del área.

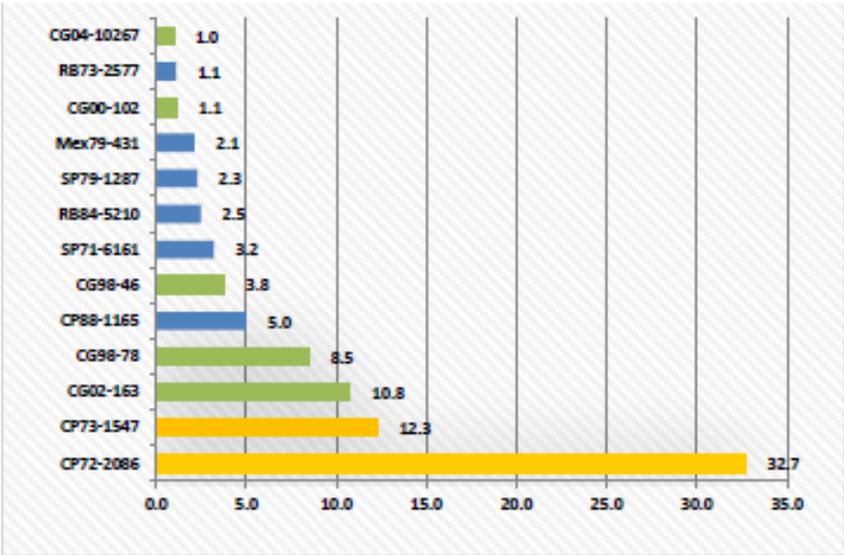
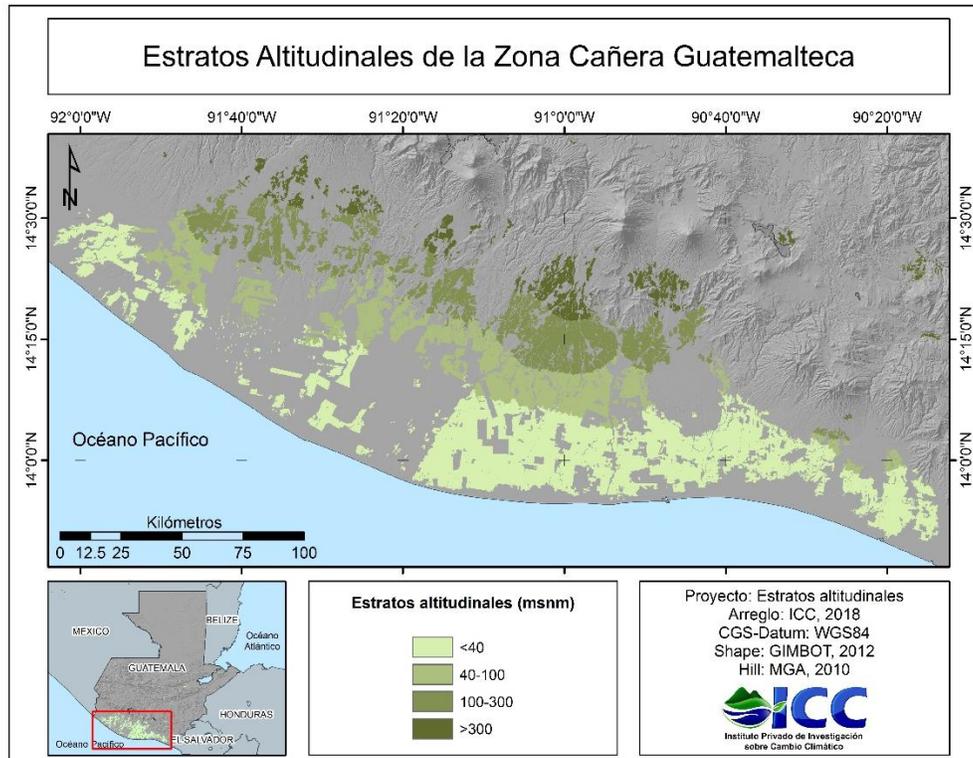


Figura 2: Composición varietal de la Agroindustria Azucarera de Guatemala.

Fuente: Meneses et al., 2019.

### 3.4.2. Zonas altitudinales

La producción de la caña de azúcar se encuentra en el sur de Guatemala y está dividida en cuatro estratos altitudinales, en el estrato alto se ubican lotes arriba de los 300 m.s.n.m., en el estrato medio lotes entre los 100 y 300 m.s.n.m., en el estrato bajo lotes entre los 40 y 100 m.s.n.m. y en el estrato litoral lotes por debajo de los 40 m.s.n.m. En la siguiente figura se puede apreciar los estratos.



**Figura 3:** Estrato altitudinales de la zona cañera de Guatemala.

Fuente: ICC, 2018c.

### 3.4.3. Manejo agronómico

#### 3.4.3.1. Preparación del suelo

Para ello se utiliza maquinaria agrícola, utilizando el paso de arado y rastra. El primero permite voltear el suelo y el segundo romper en pequeños agregados el mismo. Además, se realiza el surqueado del suelo, el cual permite trazar los surcos sobre el terreno para posteriormente realizar la siembra.

### **3.4.3.2. Siembra o resiembra**

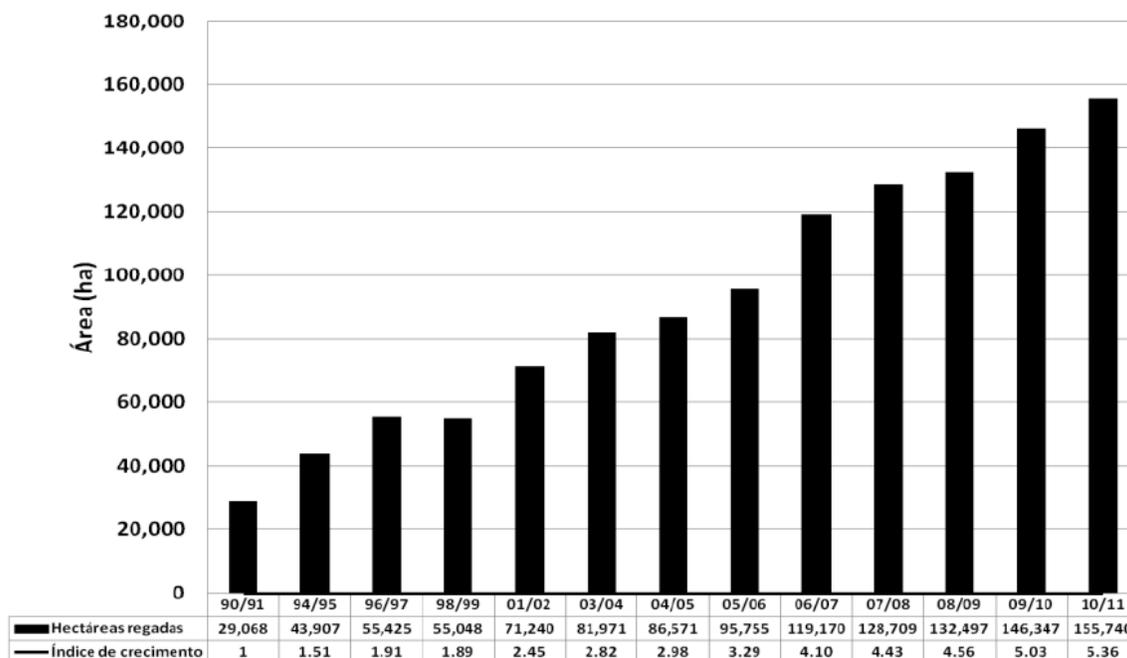
Según Ovalle et al. (2014), la siembra se divide en dos métodos, el surco simple y el surco doble.

Método de surco simple: Es el más utilizado en Guatemala. Se deben preparar paquetes de semilla de 30 esquejes con longitud aproximada de 0.60 m y de preferencia con 3-4 yemas por esqueje. La distancia entre surcos puede variar entre 1.5 m y 1.75 m, dependiendo de la topografía, potencial de producción del campo, altitud, variedad y otros factores como el tipo de cosecha y la disponibilidad de maquinaria adecuada para cada caso. La siembra se realiza manualmente y los esquejes se pueden distribuir en diferentes modalidades, siendo una de ellas la de “cadena doble traslapada”, con la cual se logra ubicar aproximadamente 15 yemas viables por metro lineal cuando la semilla es de buena calidad, garantizando de esta manera una buena densidad poblacional en los surcos. El distanciamiento para distribuir un paquete de 30 esquejes de semilla en el surco (estaquillado) depende de la variedad y la calidad de la semilla, por lo regular son 9 m. Según Orozco et al., 2000 (consultado por Ovalle et al., 2014), en estudios realizados por CENGICAÑA, se ha demostrado que estaquillados a 12 m muestran resultados similares a los de 9 m. La profundidad de siembra oscila entre 0.20 m y 0.35 m. En la siembra tradicional, la semilla debe quedar tapada aproximadamente con 0.05 m de suelo, mientras que en las siembras de humedad la cobertura debe estar entre 0.10 m y 0.15 m.

Método de surco doble: A este método se le conoce también como “Surco australiano” o “Tipo Piña”. La distancia entre surcos simples de cada par de surcos puede ser entre 0.40 m y 0.70 m, y la distancia entre los pares de surcos pueden variar entre 1.40 m y 1.80 m. Con este tipo de modificaciones se aumenta la densidad de tallos por hectárea, por lo cual se deberán considerar los correspondientes ajustes en los niveles de fertilización, dosis de maduradores, y otros.

### **3.4.3.3. Riego**

La evolución del riego en la agroindustria azucarera de Guatemala radica desde la década de 1990, los sistemas predominantes eran por gravedad, tipo inundación y aspersión (Castro, 2014b). Durante la zafra 1990/1991 solo se regaba cerca de 29,000 hectáreas, mientras en la zafra 2010/2011 se alcanzaron 155.740 hectáreas (Figura 4).

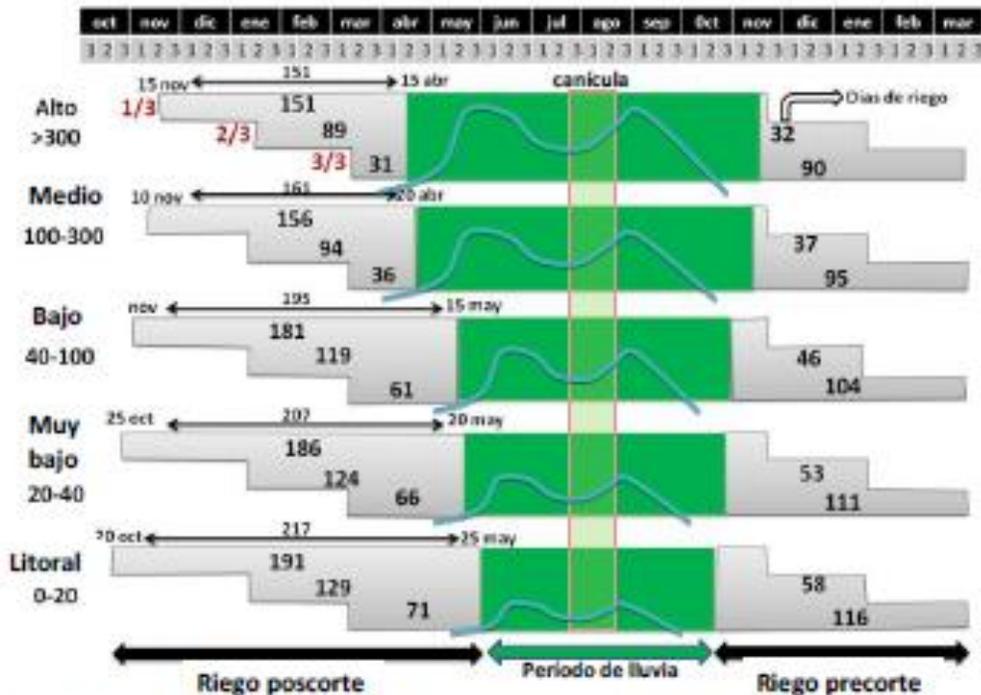


**Figura 4:** Evolución del uso de riego en la agroindustria azucarera de Guatemala.

Fuente: Castro, 2014b.

Los principales sistemas de riego son; sistemas de riego presurizados (riego por aspersión tipo cañón, aspersión con desplazamiento continuo, ramales desplazables o mecanizados, pivotes fijos y móvil, avance frontal, aspersion gigante y riego por goteo (Castro, 2014b).

La época de aplicación del riego es durante la estación seca, depende de cada estrato altitudinal y el mes de cosecha, en la Figura 5 se muestra los días promedio para riego después y antes del corte en cada periodo de zafra y estrato altitudinal. El periodo de zafra se divide en tercios, en el primer tercio se cosechan los lotes en noviembre y diciembre, en el segundo los lotes en enero y febrero, y el tercer tercio se cosechan los lotes en marzo, abril y algunas veces mayo (Castro, 2014b).



**Figura 5:** Información de días promedio de déficit hídrico, días para riego después y antes del corte en cada periodo de zafra y estrato altitudinal.

Fuente: Castro, 2014b.

#### 3.4.3.4. Malezas

El coyolillo (*Cyperus rotundus*), es la maleza más importante, la caminadora (*Rottboellia cochinchinensis*) es la maleza que ocupa el segundo lugar en importancia y es una de las malezas más difíciles de controlar, debido a la biología, la alta competencia con la caña y el rápido crecimiento. Las malezas presentes en la Agroindustria Azucarera (AIA) no solo afectan en los primeros días de crecimiento del cultivo, sino que algunas como las especies de la familia Convolvulaceae (*Ipomoea* y *Merremia*), por su tipo de crecimiento, invaden los tallos de la caña al final de su ciclo, causan problemas al momento de la cosecha con pérdidas en la eficiencia en el corte. En los últimos años se ha observado un difícil control de dos especies de malezas presentes en toda la zona cañera: *Momordica charantia* y *Croton lobatus*, y que hasta el momento se desconoce si poseen algún tipo de tolerancia a ciertos herbicidas utilizados en Guatemala. Por último, existen algunas gramíneas difíciles de controlar debido a su sistema de reproducción como el *Sorghum halepense* y *Panicum maximum* (Espinoza, 2014.).

No.	Maleza	Nombre técnico
	<b>Ciperácea</b>	
1	Coyolillo, coquito	<i>Cyperus rotundus</i>
	<b>Gramíneas</b>	
2	Caminadora	<i>Rottboellia cochinchinensis</i>
3	Plumilla o pajilla	<i>Leptocloa filiformis</i>
4	Pasto Johnson, johnson, sorgo, sorgo forrajero	<i>Sorghum halepense</i>
5	Zacatón, guinea, zacate Jamaica	<i>Panicum maximum</i>
6	Bermuda	<i>Cynodon dactylon</i>
	<b>Hojas Anchas</b>	
7	Bejuco peludo	<i>Merremia quinquefolia</i>
8	Campanilla, lavaplato, quiebracajetes	<i>Ipomoea nil</i>
9	Campanilla, quimamul, bejuco	<i>Ipomoea triloba</i>
10	Jaibilla, melón amargo	<i>Momordica charantia</i>
11	Papayita, manita crotón	<i>Croton lobatus</i>
12	Falsa verdolaga,	<i>Trianthema portulacastrum</i>
13	Verdolaga, portulaca	<i>Portulaca oleraceae</i>
14	Verdolaga de playa	<i>Kallstroemia maxima</i>

**Figura 6:** Principales malezas según su importancia en la agroindustria azucarera de Guatemala.

Fuente: Espinoza, 2014.

### 3.4.3.5. Plagas y enfermedades

Las principales plagas de la caña de azúcar en Guatemala son; la chinche salivosa, gallina ciega, rata de campo, barrenador del tallo, chinche hedionda y termitas subterráneas. Los valores de pérdida e índices de daño para las principales plagas se muestran en el **Cuadro 1**. Estos valores son relativos y variables, según las condiciones locales y valores de manejo para cada ingenio.

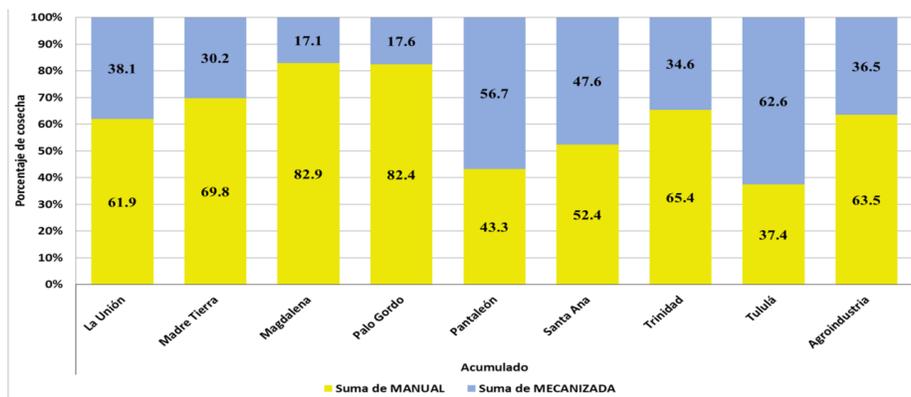
**Cuadro 1:** Factor de pérdida e índice de daño estimado para las principales plagas en Guatemala.

Plaga	Factor de pérdida	Índice de daño	Umbral económico
Chinche salivosa	8.21 TCH/1 ad/tallo 5.83 kg Az/t/1adulto/tallo	1465kg Az/ha/1 adulto/tallo	0.05-0.10 ninfas y adultos/tallo
Gallina ciega	0.62 TCH/larva/m <sup>2</sup>	70.9 kg Az/ha/1 larva/m <sup>2</sup>	10 larvas/m <sup>2</sup>
Rata de campo	0.5 TCH/1 % infestación. 2.19 kg Az/t/1% i.i	65 kg Az/ha/1% infestación	6 % de tallos dañados
Barrenador del tallo	0.36 kg Az/t/1% intensidad de infestación	32.4 kg Az/ha/1% intensidad de infestación	7 % de intensidad de infestación
Chinche hedionda	0.053 TCH/insecto/m <sup>2</sup>	6.09 kg Az/ha/insecto/m <sup>2</sup>	100 insectos/m <sup>2</sup>
Termitas subterráneas	0.45 TCH (CP72-1312) 0.22 TCH (CP72-2086)	23.3 -47.7 kg Az/ha/1 % infestación	10 % de tallos dañados en cosecha

Fuente: Márquez, 2014.

### 3.4.3.6. Cosecha

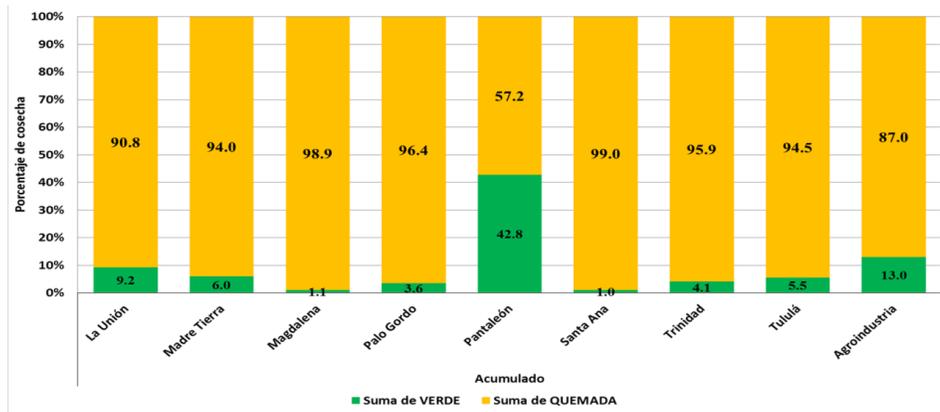
Durante la zafra 2017-2018 el 63.5% del área de caña fue cosechada de forma manual y el 36.5% mecanizada (Meneses et a., 2019).



**Figura 7:** Comparativo del área de caña de azúcar cosechada manual y mecanizada.

Fuente: Meneses et al., 2019.

Mientras, el 13% fue cosechado en verde y el 87% quemado (Meneses et a., 2019).

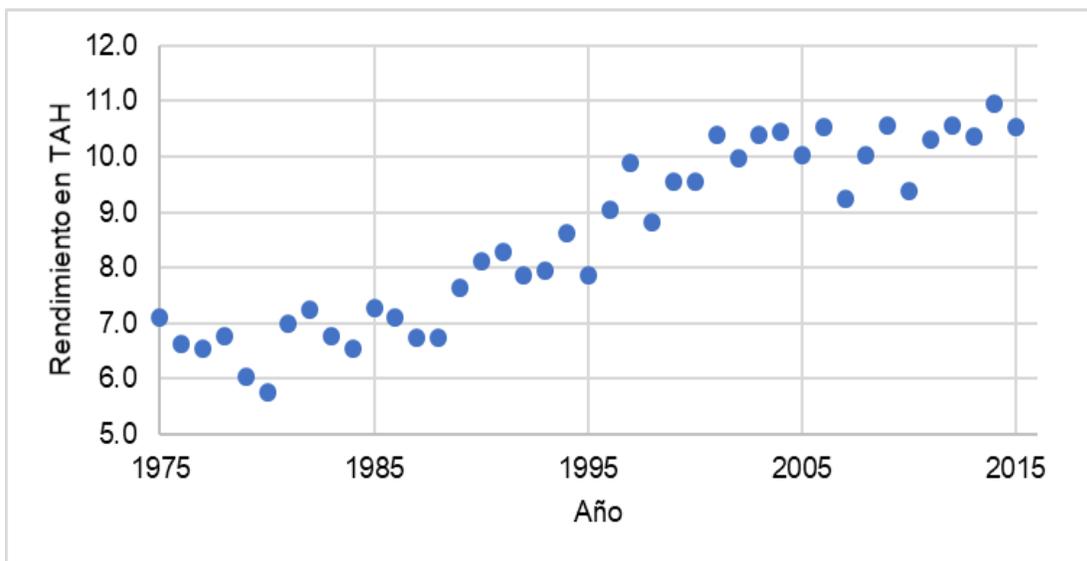


**Figura 8:** Comparativo de área de caña de azúcar cosechada en verde y quemado.

Fuente: Meneses et al., 2019.

### 3.4.4. Productividad

La productividad del rendimiento de azúcar por hectárea (TAH) ha evolucionado desde 1975 cuando se tenían rendimientos menores a 7 TAH, por su parte en la zafra 2015/2016 se alcanzaron rendimientos cercanos a 11 TAH (Figura 9).



**Figura 9:** Evolución del rendimiento de azúcar por hectárea (TAH) en Guatemala.

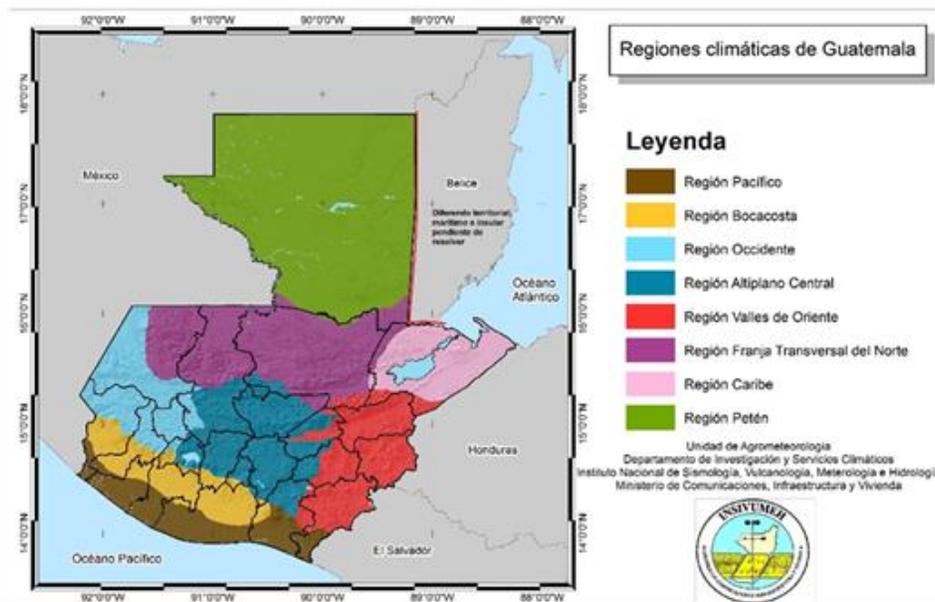
### 3.5. Clima de Guatemala

Según el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), el clima de Guatemala se origina a partir de los fenómenos que se generan

por efecto de la circulación general de la atmósfera y la influencia oceánica, dependiendo de la posición geográfica y topografía del país.

En Guatemala no existen las estaciones del año y solo existen dos épocas que se definen como la época seca y lluviosa. La época seca se manifiesta de noviembre a abril y la lluviosa de mayo a octubre. Durante la época seca se incrementa la presión atmosférica y el desplazamiento de masas de aire provenientes de la zona polar (frentes fríos del norte), causando un descenso de la temperatura y aumentando la velocidad del viento. La época lluviosa se produce cuando se establece el régimen de vientos Alisios del Noreste, por lo que la Zona de Convergencia Intertropical (ZCTI) se aproxima a Guatemala. Además, ingresan ondas del Este que general lluvias a su paso por el país, las cuales se desprenden de los sistemas nubosos desde la Costa Africana. En julio y agosto existe una disminución de las lluvias (canícula) que se origina por la inversión de los alisios y el fortalecimiento del anticiclón del Golfo de México (INSIVUMEH, 2018c).

Las condiciones descritas son de carácter general, pero cada región tiene sus propias características climáticas locales, permitiendo definir seis regiones: región Caribe, región de los Valles de Oriente, región de Occidente, región Boca Costa, región Pacífico, región del Altiplano Central, región Franja Transversal del Norte y región Norte (INSIVUMEH, 2018c).



**Figura 10:** Regiones climáticas de Guatemala.

Fuente: INSIVUMEH, 2018c.

### **3.5.1. El clima en el sur de Guatemala**

La región del Pacífico se encuentra en color café en la figura 10, en dicha región se encuentra la producción de caña de azúcar del ingenio La Unión S.A., con lotes cercanos al Océano Pacífico (3.5 kilómetros) desde los 0 m.s.n.m. hasta los 300 m.s.n.m. (Ingenio La Unión, 2018).

A continuación, se describen las variables climáticas de esta región, las cuales son: temperaturas, amplitud térmica, radiación solar global, humedad relativa, precipitación, días sin precipitación y evapotranspiración potencial. Para ello se utilizaron datos de las estaciones meteorológicas del Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC), desde noviembre de 2007 a mayo de 2018.

La temperatura máxima media mensual oscila entre los 33°C a 36°C durante el año, siendo abril el mes con mayor temperatura, mientras, septiembre y octubre con la mínima (ICC, 2018).

La temperatura media mensual ronda entre los 26°C y 29°C durante el año, siendo abril el mes con la temperatura media más alta, mientras, enero y diciembre registran las temperaturas medias más bajas (ICC, 2018).

La temperatura mínima media mensual oscila entre los 19°C y 23°C durante el año, siendo mayo el que presenta la mayor temperatura mínima, enero y diciembre las menores temperaturas mínimas (ICC, 2018).

La amplitud térmica media anual, oscila entre 10°C y 15°C, alcanzando los valores más altos durante enero, febrero y marzo, mientras las menores amplitudes se presentan durante junio y septiembre de cada año (ICC, 2018).

La radiación solar global acumulada mensual fluctúa entre los 5500 W/m<sup>2</sup> y 7000 W/m<sup>2</sup> durante el año. Siendo marzo, julio y agosto los meses con mayores acumulados, mientras febrero y junio son los meses con los menores valores de radiación durante el año (ICC, 2018).

La humedad relativa promedio mensual oscila entre el 70% y 90%, siendo enero, febrero, marzo y abril los meses con los porcentajes más bajos, mientras junio, septiembre y octubre los meses con los más altos (época con mayores precipitaciones) (ICC, 2018).

En el sur de Guatemala existen dos épocas muy marcadas en cuanto a la precipitación. La época seca, que ocurre de noviembre a abril, y la época lluviosa que ocurre de mayo a

octubre, con una disminución en julio y agosto, debido al fenómeno llamado canícula (INSIVUMEH, 2018c).

Los acumulados durante la época lluviosa oscilan entre los 200mm y 350mm. Mientras, durante la época seca los acumulados oscilan entre 0mm y 100, que son causados por el ingreso de frentes fríos provenientes del polo norte (INSIVUMEH, 2018c).

La evapotranspiración potencial mensual oscila entre los 110mm y 150mm, siendo noviembre, diciembre, enero y febrero los meses con menor evapotranspiración (época seca de noviembre a abril y con temperaturas medias más bajas), mientras julio y agosto los meses con la mayor evapotranspiración potencial (ICC, 2018).

## **4. Marco teórico**

### **4.1. Requerimientos de la caña de azúcar**

El requerimiento de las variables meteorológicas de la caña de azúcar depende de la edad, latitud, variedad y etapa fenológica (Buenaventura, C. 1995; CENICAÑA, 1995). A continuación, se describen los elementos más importantes durante la elongación y maduración.

#### **4.1.1. Temperaturas**

Temperaturas máximas mensuales superiores a los 35°C ocasionan estrés en la planta (Vásquez, 2017). Mientras que, el rango óptimo para el crecimiento la temperatura media es entre 26°C y 30°C durante la elongación; en la maduración requiere temperaturas mínimas menores a 21°C. En Colombia observaron correlaciones negativas significativas entre la temperatura mínima mensual y el rendimiento de azúcar (Amaya et al., 1995). En Guatemala las temperaturas mínimas mensuales por debajo de los 18°C pueden aumentar la concentración de azúcar durante la maduración (Castro et al., 2010; Castro et al., 2012). En el sur de Guatemala se alcanzan valores de temperatura mínima de hasta los 16°C en el sur de Guatemala, especialmente en el estrato bajo y en algunos días de los meses de diciembre, enero y febrero.

#### **4.1.2. Amplitud térmica**

Las variaciones de temperatura durante el día y la noche, se le denomina amplitud térmica, tiene importancia en la elaboración de la sacarosa. En Colombia Buenaventura (1995) reporta que amplitudes uniformes provocan que la caña de azúcar crezca sin cesar.

Durante la elongación, la amplitud térmica mayor provoca un aumento en el crecimiento de los tallos y entrenudos, siempre y cuando la temperatura máxima no sea crítica para el crecimiento (mayor a 35°C). Las noches cálidas inciden el aumento de la respiración y disminuyen la fotosíntesis neta (Nickell y Takashi, 1972; Rugai y Notoa, 1979; Yates y Bates, 1958; Consultado por Villegas et al., 1995).

Por su parte durante la maduración, amplitudes térmicas mayores a 15°C contribuyen a la concentración de azúcar (Castro et al., 2010; Castro et al., 2012). Además, condiciones de temperaturas más frescas favorecen a la disminución de la enzima invertasa acida y el incremento de la invertasa neutra, esta última provoca el aumento de la concentración de azúcar (Cardozo et al., 2013; Cardozo et al., 2015).

#### **4.1.3. Radiación solar global en superficie**

Los mejores rendimientos se obtienen con radiación solar óptima de 6250 Watts/m<sup>2</sup> a 12500 Watts/m<sup>2</sup> al mes en promedio (Vásquez, 2017). Durante la elongación, la radiación solar se utiliza para el crecimiento y durante la maduración para la concentración de sacarosa en los tallos. En Hawaii Clements (1940. Consultado por Cardozo et al, 2013) concluyó durante un estudio de dos años, que las diferencias entre los cultivares durante la maduración fueron más influenciadas por la radiación solar que por las temperaturas.

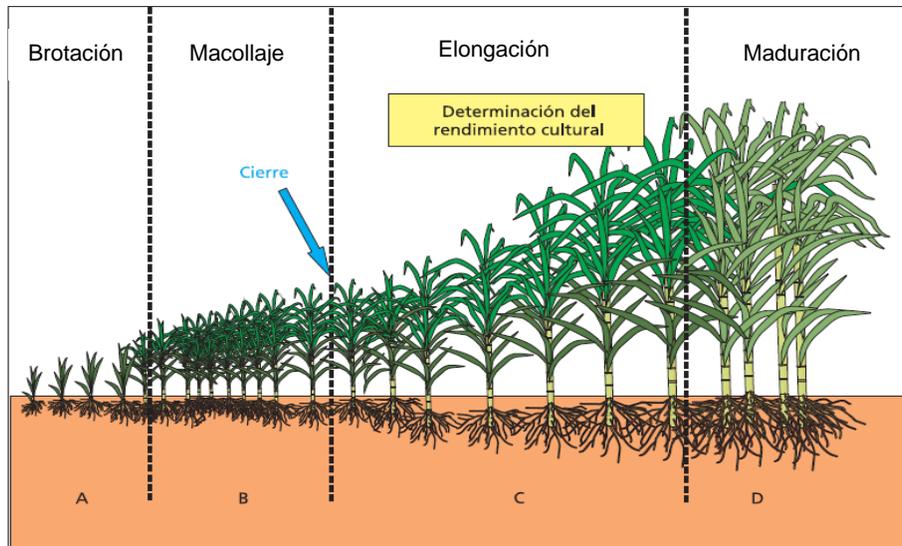
#### **4.1.4. Precipitación**

En ausencia de riego, durante el crecimiento se necesitan precipitaciones entre los 1200mm y 1700mm para su desarrollo, mientras en la maduración y cosecha, son necesarias condiciones más frescas y secas (Vásquez, 2017). En Guatemala se observó que acumulados mensuales por arriba de 20mm durante la maduración reducen la acumulación de azúcar (Castro et al., 2010, Castro et al., 2012).

El contenido de humedad en el suelo tiene un impacto en la maduración, ya que al disminuir el contenido de agua en la planta provoca la conversión de los azúcares reductores en sacarosa. Por otro lado, al ocurrir lluvias o riego durante la etapa de maduración, la calidad de los jugos disminuye (Vásquez, 2017).

### **4.2. Generación del rendimiento y calidad**

La caña de azúcar cuenta con cuatro etapas fenológicas durante todo su ciclo. A: Emergencia. B: Macollaje. C: Elongación, y D: Maduración (Figura 11). La duración de cada etapa fenológica depende principalmente de la temperatura. Esta puede aumentar o disminuir la duración de cada etapa (Romero et al., 2009).



**Figura 11:** Etapas fenológicas de la caña de azúcar.

Fuente: Adaptado de Romero et al., 2009.

#### 4.2.1. Etapa de emergencia

También se le denomina brotación. En ella se establece la población inicial de tallos; su importancia radica en una adecuada distribución espacial de los tallos primarios en el surco. Emergencias pobres y prolongadas afectarán el cumplimiento efectivo de las siguientes fases y finalmente la producción del cañaveral. La brotación se activa con temperaturas superiores a 10°C, pero hasta los 16-18°C la velocidad es baja, aumentando con valores mayores a 20°C. Las temperaturas óptimas para emergencia y macollaje fluctúan entre los 28-32°C (Romero et al., 2009).

#### 4.2.2. Etapa de macollaje

Es una etapa muy importante en la definición del rendimiento, en esta se establece la cantidad de tallos potenciales para la cosecha. Su característica es el rápido aumento de la población total de los mismos. La altura media de la población se mantiene estable hasta la mitad de esta etapa, para luego registrarse un drástico cambio en el ritmo de elongación, que coincide con la finalización del macollaje y el cierre del cañaveral (Romero et al., 2009).

El número de hojas verdes por tallo no aumenta de manera significativa hasta la segunda mitad del macollaje, mientras que la cantidad de hojas verdes se duplica debido al incremento de la población de tallos (Romero et al., 2009).

El ritmo de expansión del canopeo resulta favorecido por los cambios significativos que se registran en las dimensiones de las láminas foliares, provocando un aumento del índice de área foliar, permitiendo de esta manera el cierre del cañaveral (Romero et al., 2009).

La radiación solar incide y ejerce un rol central en la regulación del macollaje, otros factores adquieren una influencia destacable como el régimen térmico, la disponibilidad de agua y nutrientes, la variedad, malezas, plagas y enfermedades, entre otros. La temperatura óptima para esta fase fluctúa entre los 28 y 32°C (Romero et al., 2009).

#### **4.2.3. Etapa de elongación**

La elongación o periodo de gran crecimiento es la etapa donde se determina el rendimiento cultural, en ella se establece la población final de tallos molibles y el peso fresco por tallo. Además, se inicia el almacenamiento de azúcar en los entrenudos que van completando su desarrollo. En esta fase el cultivo expresa la máxima respuesta a los factores ambientales y de manejo (Romero et al., 2009).

Con el cierre del cañaveral se inicia una competencia severa que deriva en la muerte de tallos, por lo que ocurre una disminución significativa de la población de estos. El porcentaje de mortalidad más frecuente es entre 45-50% (Romero et al., 2009).

El ritmo intenso de crecimiento se sustenta en el aumento del número de hojas verdes por tallo, que alcanza su valor máximo (8-12 hojas verdes/tallo) al término de esta fase. Por ello el IAF<sup>2</sup> no resulta afectado por la brusca disminución de estos. Registrándose un aumento de las dimensiones foliares y del área foliar por tallo. Los aspectos señalados permiten que el cultivo alcance y mantenga su IAF máximo, el ritmo de crecimiento del peso fresco y la acumulación de biomasa (Romero et al., 2009).

La fecha de inicio, su intensidad y la duración de esta etapa dependen estrechamente del comportamiento de los factores ambientales, que resultan definidos en gran medida por la época de plantación y/o cosecha en el ciclo anterior y por el manejo suministrado. En esta etapa adquieren una sustancial importancia el cumplimiento efectivo y rápido de las etapas anteriores; donde las temperaturas medias óptimas oscilan entre 28-35°C (Romero et al., 2009).

---

<sup>2</sup> Índice de área foliar

#### **4.2.4. Etapa de maduración**

Durante esta etapa se define el contenido final de sacarosa en los tallos y la producción de azúcar por unidad de área. Su ocurrencia se relaciona con una progresiva disminución del ritmo de elongación y el mantenimiento temporal del área foliar fotosintéticamente activa, su magnitud disminuye progresivamente con la senescencia (Romero et al., 2009).

En el ritmo de envejecimiento foliar influyen el cultivar, la disponibilidad de agua y nutrientes, la radiación solar incidente y el comportamiento térmico, resultando agudizado por la ocurrencia de bajas temperaturas (Romero et al., 2009).

Según Cardozo et al. (2013), en Brasil durante la maduración de la caña de azúcar se requieren temperaturas mínimas por debajo de los 20°C, mientras en Guatemala observaron mejores concentraciones de azúcar cuando la temperatura mínima estuvo por debajo de 18°C (Castro et al., 2010; Castro et al., 2012).

## 5. Materiales y métodos

### 5.1. Datos

La presente tesis se desarrolló con dos bases de datos a diferentes escalas, una a nivel de país y la otra a nivel de lote (con información del ingenio La Unión S.A.) y con los rendimientos anuales de la caña de azúcar, en el sur de Guatemala.

Para realizar un análisis inicial se han utilizado datos de rendimiento a nivel de país de las zafras 1975/76 a 2016/17 (Meneses et al., 2016), considerando las toneladas de azúcar por hectárea (TAH) de tres estaciones convencionales (Camantulul, Retalhuleu y San José, ver Cuadro 2) del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH, 2018), esto porque estas cuentan con datos meteorológicos desde las mismas fechas de los rendimientos a nivel de país.

Las variables meteorológicas mensuales evaluados a nivel de país son; a) Temperatura máxima, b) Temperatura media, c) Temperatura mínima, d) Precipitación, e) Amplitud térmica, f) Evapotranspiración potencial (Hargreaves-Samani, 1985), g) La diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial y h) Humedad relativa.

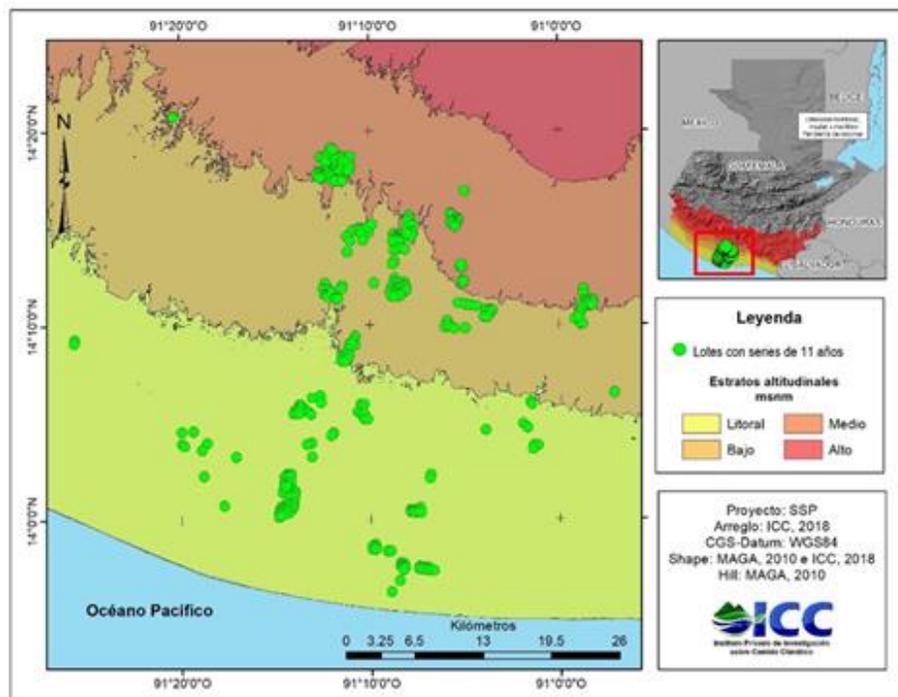
Y las variables meteorológicas mensuales calculadas a nivel de lote fueron: velocidad del viento promedio, velocidad del viento máxima, temperatura mínima (Tmin), media (Tm), y máxima (Tmax), amplitud térmica promedio, radiación solar en superficie acumulada diaria (radiación solar diaria acumulada), precipitación acumulada, los días sin precipitación, evapotranspiración potencial (Allen, 2006), y la diferencia entre la precipitación y evapotranspiración potencial. Se evaluaron otras variables que no se evaluaron a nivel de país porque se contaban con esos datos y porque podrían tener algún impacto sobre el rendimiento.

Para seleccionar la estación meteorológica más cercana al lote<sup>3</sup>, se consideraron las coordenadas del centroide de este. En el presente trabajo se realizaron datos del Ingenio La Unión S.A., ubicado en el departamento de Escuintla, con un área de producción para la zafra 2015/16 de 30,603 hectáreas, obteniendo 3,059,652 toneladas métricas de caña y 330,206 toneladas de azúcar (en promedio 10.79 toneladas de azúcar por hectárea). La

---

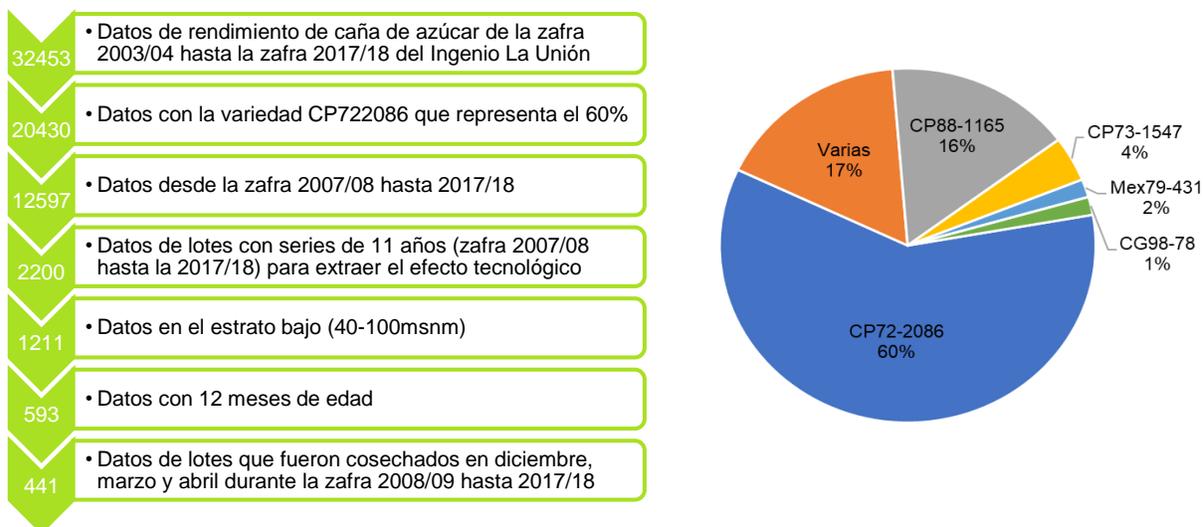
<sup>3</sup> Unidad mínima de producción entre 5 y 15 hectáreas del Ingenio La Unión S.A.

distribución de los lotes con series de 11 años consecutivos del ingenio La Unión se muestra en la Figura 12.



**Figura 12:** Lotes con series de 11 años de rendimiento consecutivo.  
Fuente: Ingenio La Unión S.A.

Del universo de datos de rendimiento a nivel de lote, únicamente fueron seleccionados aquellos con información correspondiente a la variedad CP-722086, con rendimiento continuo desde la zafra 2007/08 hasta 2017/18, del estrato bajo, con 12 meses de edad antes de la cosecha y aquellos meses de cosecha con suficientes datos para realizar las correlaciones (Figura 13).



**Figura 13:** Selección de los datos de rendimiento a nivel de lote.

Fuente: Autor, 2018. Basado en datos de La Unión S.A., 2018.

La variedad CP722086 posee un hábito de crecimiento de tallos semirrecto, con poco deshoje natural, la cantidad de follaje es intermedio; el entrenudo es de color verde amarillento con manchas negras, la forma de crecimiento es cilíndrico y ligeramente curvado al costado de la yema; el nudo tiene una forma de crecimiento obconoidal, yema redonda con alas de base angosta, anillo de crecimiento protuberante; la vaina posee un desprendimiento intermedio, color rosado y quebradizo por el centro, tiene presencia de afate intermedio; la lámina foliar posee un borde aserrado; la aurícula presenta una forma transicional y la lígula generalmente es deltoide con rombo; el cuello es café con superficie semilisa (Aguirre, 2006; Schueneman, et al 2008. Consultado por Monzón, 2014).

Posee una adecuada germinación, macollamiento bueno y temprano, buen desarrollo cuando se siembra en la época adecuada; despaje regular, las hojas permanecen adheridas al tallo, se desprenden fácilmente con la mano, resistente al acame, regular tenacidad, abundante floración, prospera bien en suelos húmedos y bajo riego a una altitud de 0 a 220 m, se adapta bien a suelos francos, franco-limosos, franco arenoso y franco arcilloso profundos. A pesar de que posee una coloración verde amarillento en los primeros estadios de desarrollo presenta tonalidades cafés. Posee buen vigor, buen cierre de calle y su crecimiento es erecto (Aguirre, 2006; Schueneman, et al 2008; Consultado por Monzón, 2014).

Se utilizaron datos meteorológicos de estaciones automáticas marca ADCON Telemetry® (perteneciente a la empresa OTT- Hydromet Group con sede en Alemania), administradas

por el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC) en el sur de Guatemala. Los mismos reciben control de calidad semanal y mantenimiento mensual (ICC, 2018). La ubicación, variables y periodo de la información, se muestran en el Cuadro 2.

**Cuadro 2:** Ubicación de las estaciones y variables que miden.

Estación	Tipo de estación	Latitud	Longitud	Precipitación	Tmin	Tmax	Tm	Radiación global	Velocidad del viento	Humedad relativa	Datos	
											Desde	Hasta
El bálsamo	Automática	14°16'49.38"N	91° 0'11.00"O	X	X	X	X	X	X	X	nov-07	dic-17
Bonanza	Automática	14° 4'42.25"N	91°11'13.88"O	X	X	X	X	X	X	X	nov-07	dic-17
Bougamvilia	Automática	14° 7'11.88"N	90°56'28.95"O	X	X	X	X	X	X	X	nov-07	dic-17
Cengicaña	Automática	14°19'47.82"N	91° 3'15.18"O	X	X	X	X	X	X	X	nov-07	dic-17
Irlanda	Automática	14° 8'45.43"N	91°25'36.38"O	X	X	X	X	X	X	X	nov-07	dic-17
Puyumate	Automática	14°15'41.93"N	91°15'37.98"O	X	X	X	X	X	X	X	nov-07	dic-17
San Antonio EV	Automática	13°59'43.31"N	91°12'3.46"O	X	X	X	X	X	X	X	nov-07	dic-17
Tehuantepec	Automática	14°10'1.45"N	91° 6'12.66"O	X	X	X	X	X	X	X	nov-07	dic-17
San José	Convencional	13°56'11.40"N	90°50'7.08"O	X	X	X	X	-	-	X	ene-73	dic-17
Camantulul	Convencional	14°19'18.12"N	91° 3'1.80"O	X	X	X	X	-	-	X	oct-70	abr-16
Retalhuleu	Convencional	14°31'11.28"N	91°41'28.68"O	X	X	X	X	-	-	X	sep-77	dic-17

Fuente: Elaboración propia. Basado en estaciones del ICC e INSIVUMEH, 2018.

## 5.2. Métodos

### 5.2.1. Datos de rendimiento de la caña de azúcar

A nivel país, los datos de rendimiento presentan tendencia positiva. La cual se elimina estimando los residuos de la siguiente manera:

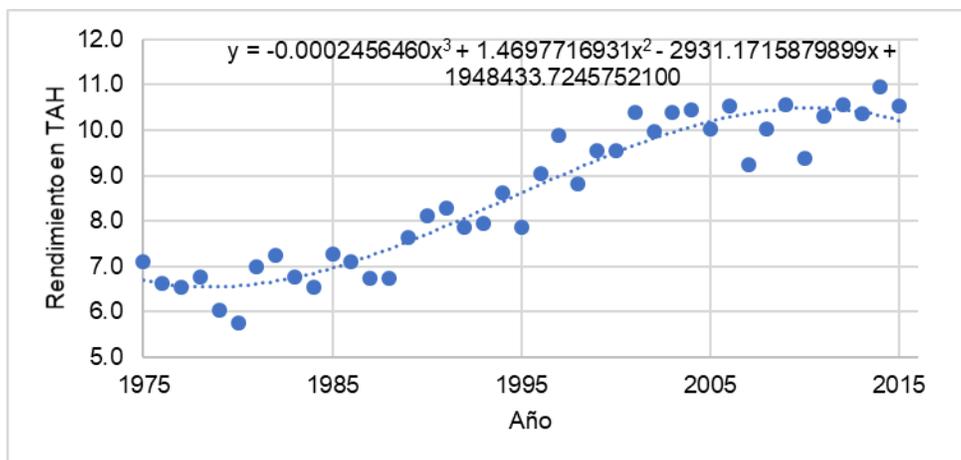
$$y_i = x_i - z_i$$

*y<sub>i</sub>*: Residuo sin tendencia de cada zafra

*x<sub>i</sub>*: Valor observado de cada zafra

*z<sub>i</sub>*: Valor estimado con el polinomio de cada zafra

La ecuación del polinomio que se utiliza se muestra en la Figura 14. Este proceso se realiza debido a que la evolución de los rendimientos a lo largo de los años presenta una tendencia (Vossen, 1989; Dagnelie et al., 1983; Denet et al., 1980; Odumodu & Griffiths, 1980; Palm y Dagnelie, 1993; Swanson y Nyankori, 1979; Sakamoto, 1978; Agrawal y Jain, 1982; Winter y Musick, 1993; Hough, 1990b y Smith, 1975). Para poder apreciar con claridad el efecto de la variable climática analizada sobre los rendimientos se procedió a filtrar la tendencia y se trabaja con los residuos de los mismos respecto a ella.



**Figura 14:** Polinomio del rendimiento de azúcar por hectáreas.

Fuente: Autor, 2018. Basado en datos de Meneses et al., 2016.

A nivel de lote, se extrajo el efecto tecnológico de cada serie<sup>4</sup>. Se utiliza el mismo método que a nivel país para estimar los residuos, substrayendo el valor estimado al valor observado, del polinomio de cada serie. En total se calcularon los residuos de 200 series (Figura 12).

Para poder comparar lotes de diferentes fincas ha sido necesario estandarizar los residuos de cada serie, debido a que cada finca podría tener diferentes prácticas de manejo y rendimientos, por lo que fue necesario estandarizar para únicamente reflejar el efecto del clima.

### 5.2.2. Variables meteorológicas

A nivel país se calcularon las siguientes variables diarias: amplitud térmica, evapotranspiración potencial por el método de Hargreaves y diferencia entre la precipitación y evapotranspiración potencial. Realizando la acumulación de la Eto en forma mensual y la amplitud térmica promediada. Las expresiones de estimación utilizadas para cada uno son las siguientes:

Amplitud térmica

$$AT = T_{max} - T_{min}$$

En donde:

*AT:* Amplitud térmica en promedio mensual

*Tmax:* Temperatura máxima promedio mensual

*Tmin:* Temperatura mínima promedio mensual

<sup>4</sup> Son datos de rendimiento desde la zafra 2007/08 hasta 2017/18 de un mismo lote y con la variedad CP-722086.

Evapotranspiración potencial por el método de Hargreaves-Samani (1985).

$$Eto = 0.0135 (Tm + 17.78) * Rs$$

$$Rs = Ra * Kt * (Tmax - Tmin)0.5$$

En donde:

*Rs* = Radiación solar incidente

*Ra* = Radiación solar extraterrestre

*Kt* = constante 0.0023

*Tmax* = temperatura máxima diaria

*Tmin* = temperatura mínima diaria

Mientras que a nivel de lote se calculan las siguientes variables meteorológicas: amplitud térmica, evapotranspiración potencial por el método FAO Penman Montieth (Allen, 2006), y los días sin precipitación de cada mes. Los dos primeros se calcularon diarios y el otro mensual. Las fórmulas utilizadas son:

Evapotranspiración potencial (Allen, 2006)

$$ET_o = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)}$$

En donde:

*Eto*: Evapotranspiración potencial diaria (mm/día)

*Rn*: Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m<sup>2</sup>\*día)

*G*: Flujo del calor de suelo (Mj/m<sup>2</sup>\*día)

*T*: Temperatura media del aire (°C)

*u<sub>2</sub>*: Velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

*e<sub>s</sub>*: Presión de vapor de saturación (kPa)

*e<sub>a</sub>*: Presión real de vapor (KPa)

$\Delta$ : Pendiente de la curva de presión de vapor (KPa/°C)

$\gamma$ : Constante psicométrica (KPa/°C)

Días sin precipitación (Dspp)

$$Dspp = \text{No. de dias del mes con pp} = 0 \text{ mm}$$

A nivel de lote, se utilizaron índices meteorológicos mensuales desde noviembre del 2007 hasta abril del 2018. Y a nivel de país, datos mensuales desde enero de 1975 hasta diciembre del 2015 y se han calculado los residuos estandarizados utilizando la siguiente formula:

$$Z_i = (X_i - Y_i) / \sigma$$

En donde:

*Z<sub>i</sub>*: Residual del índice meteorológico o agrometeorológico, estandarizado

*X<sub>i</sub>*: Valor observado del índice meteorológico o agrometeorológico

*Y<sub>i</sub>*: Valor estimado por la recta del índice meteorológico o agrometeorológico de cada mes

*σ*: Desviación estándar de la recta de los datos observados del índice meteorológico o agrometeorológico de cada mes.

### 5.2.3. Influencia de los índices sobre el rendimiento de la caña de azúcar

Para conocer la influencia de los índices, se realizaron correlaciones lineales simples entre los índices (hasta los 7 meses antes de la cosecha a nivel de lote) y el rendimiento de azúcar en toneladas por hectárea (TAH).

Se utilizaron correlaciones de Spearman, debido a que algunos índices no se distribuyen de manera normal. La fórmula es la siguiente (Martinez et al., 2009):

$$r_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n}$$

En donde

*r<sub>s</sub>* o *R<sub>s</sub>*: Coeficiente de correlación de Spearman entre las variables asociadas ó Rho de Spearman

*d*: Es la diferencia entre los rangos de los índices meteorológicos estandarizados (*r<sub>x<sub>i</sub></sub>*) y el rendimiento de azúcar estandarizado (*r<sub>y<sub>i</sub></sub>*)

*n*: No. De datos utilizados para correlacionar

Se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman (*r<sub>s</sub>*) para determinar la asociación entre cada índice y el rendimiento. Tomando de referencia aquellas correlaciones con un 99% de confianza. Para estimar el coeficiente de correlación crítico (coeficiente que se debe superar para que sea una correlación significativa) se utilizó la siguiente expresión:

$$rs: (T^2/((n-2) + T^2))^{1/2}$$

En donde

*T: Es el valor de la tabla de "T de student" en función del nivel de confianza*

*n: Total de datos*

Se analizan los "rs" de hasta siete meses antes de la cosecha, obteniendo el mes con la asociación (cuando se tiene el mayor r significativo) de los índices meteorológicos y agrometeorológicos durante la etapa de elongación y maduración de la caña de azúcar, siendo ésta última la etapa crítica para la concentración de azúcar en los entrenudos (CENICANA, 1995; Castro et al., 2012; Cardozo et al., 2013).

#### **5.2.4. Selección de índices explicativos para estimar el rendimiento**

Para mostrar la variabilidad de los rendimientos a nivel regional y de lote (por mes de cosecha), en función de los índices meteorológicos, se ha empleado una regresión lineal múltiple por el método de Stepwise Forward para poner en evidencia las variables que mejor explican este parámetro fenométrico.

Dicho método selecciona entre los índices, el que mejor explica la variable dependiente, eligiendo solo aquellas que aportaron un 99% de significancia (altamente significativas) para ingresar y permanecer en el modelo, configurando (constituye) un grupo o subconjunto que define lo más explicativo.

#### **5.2.5. Limitaciones**

Las correlaciones a nivel de país y de lote tienen algunas limitaciones, porque no se consideran; la maduración química que se utiliza en algunos cañaverales, la caña plantía y soca, el tipo de cosecha (manual o mecanizado), si el cañaveral es quemado o es cosechado en verde y el tipo de suelo.

## 6. Resultados

### 6.1. Variables que influyen en el rendimiento de azúcar

Los índices evaluados a nivel de país son importantes para conocer cómo influyen para tomar decisiones a escala macro. Mientras los índices evaluados a nivel de lote son importantes para brindar un detalle de cómo el tiempo (meteorológico) está influyendo en el rendimiento de la caña de azúcar. Por lo que se presentan los resultados en ambas escalas.

#### 6.1.1. Variables a nivel país

Los resultados a esta escala muestran que agosto es un mes crítico para el rendimiento de azúcar en toneladas métricas por hectárea (TAH). Todas las variables evaluadas, excepto la temperatura mínima, proporcionan correlaciones altamente significativas en dicho mes (cañaverales en etapas fenológicas de macollamiento y elongación), mientras que la temperatura mínima únicamente presenta esta característica en el mes de abril; en este mes solo quedan pendientes de cosechar aquellos cañaverales que se encuentran en la etapa de maduración (Cuadro 3).

**Cuadro 3:** Coeficiente de correlación entre los índices y el rendimiento a nivel de país.

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<i>Temperatura media</i>	-0.16	-0.06	-0.29	-0.25	-0.17	0.01	0.25	<b>0.44**</b>	0.13	0.09	0.10	0.11
<i>Temperatura máxima</i>	-0.15	-0.03	-0.35	-0.20	-0.11	-0.02	0.31	<b>0.52**</b>	0.15	0.15	0.02	0.15
<i>Temperatura mínima</i>	-0.17	-0.14	-0.21	<b>-0.41**</b>	-0.17	-0.24	-0.06	0.08	-0.17	-0.13	0.02	0.01
<i>Amplitud térmica</i>	0.14	0.16	-0.02	0.08	0.06	0.18	0.34	<b>0.57**</b>	0.26	0.26	-0.17	0.04
<i>Precipitación (Pp)</i>	0.03	-0.04	0.22	-0.06	0.04	0.05	-0.33	<b>-0.53**</b>	-0.12	0.17	0.30	-0.13
<i>Evapotranspiración (Eto)</i>	0.06	0.01	-0.20	-0.05	0.00	0.12	0.37	<b>0.58**</b>	0.20	0.20	-0.16	0.03
<i>Déficit (Pp-Eto)</i>	0.02	-0.06	0.22	-0.07	0.05	0.04	-0.34	<b>-0.52**</b>	-0.12	0.15	0.29	-0.10
<i>Humedad relativa</i>	0.15	0.02	0.25	0.09	0.17	-0.05	-0.30	<b>-0.61**</b>	-0.33	-0.01	0.35	0.29

Fuente: Autor, 2018. \*\* Diferencia significativa al 99%. Coeficientes de correlación de Spearman.

En el Cuadro 3, se muestra que la mayoría de los índices térmicos son muy significativos con correlaciones positivas (excepto la mínima). Los índices hídricos lo son, con correlaciones negativas (excepto la Eto).

#### 6.1.2. Variables a nivel de lote

A nivel de lote, los resultados de las correlaciones se dividen en función del mes de cosecha. Se presentan las correlaciones de los lotes que se cosecharon en diciembre, marzo y abril. El resto de los meses (noviembre, enero, febrero y mayo) no tuvieron suficientes datos para realizar las mismas.

### 6.1.2.1. Cosechados en diciembre

Los resultados de los lotes que fueron cosechados en diciembre se muestran en el Cuadro 4 y están divididos por las últimas dos etapas fenológicas de la caña de azúcar. Donde la elongación ocurre de junio a octubre (cinco meses de duración en promedio) y la maduración de noviembre a diciembre (dos meses de duración en promedio).

**Cuadro 4:** Coeficientes de correlación de lotes cosechados en diciembre.

Variables	Elongación					Maduración	
	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<i>Velocidad del viento máxima</i>	-0.05	-0.04	-0.01	0.09	<b>-0.42**</b>	-0.15	-0.12
<i>Velocidad del viento media</i>	-0.05	-0.05	0.04	0.05	-0.09	-0.11	0.08
<i>Temperatura máxima</i>	0.16	0.16	-0.04	<b>-0.39**</b>	<b>-0.43**</b>	-0.23	<b>-0.39**</b>
<i>Temperatura media</i>	-0.17	0.02	-0.22	<b>-0.40**</b>	-0.15	-0.10	<b>-0.40**</b>
<i>Temperatura mínima</i>	0.01	0.00	-0.25	<b>-0.42**</b>	<b>-0.45**</b>	0.02	<b>-0.42**</b>
<i>Amplitud térmica</i>	<b>-0.37**</b>	0.07	-0.24	<b>-0.32**</b>	<b>0.36**</b>	0.19	<b>0.26**</b>
<i>Radiación solar acumulada</i>	<b>-0.37**</b>	0.18	<b>-0.34**</b>	<b>-0.36**</b>	0.09	0.15	0.06
<i>Humedad relativa</i>	0.03	-0.10	0.14	0.22	-0.04	<b>-0.36**</b>	-0.22
<i>Precipitación (Pp)</i>	0.02	<b>0.37**</b>	0.19	<b>0.31**</b>	0.09	<b>-0.40**</b>	-0.07
<i>Días sin precipitación</i>	-0.14	0.02	-0.23	<b>-0.48**</b>	0.24	<b>0.36**</b>	0.06
<i>Evapotranspiración (Eto)</i>	-0.25	<b>0.45**</b>	<b>-0.47**</b>	-0.10	<b>0.39**</b>	<b>-0.56**</b>	<b>-0.32**</b>
<i>Déficit (Pp- Eto)</i>	0.05	<b>0.35**</b>	0.24	<b>0.32**</b>	0.10	<b>-0.40**</b>	0.11

Fuente: Autor, 2018. \*\* Diferencia significativa al 99%.

La mayoría de las variables presentan correlaciones muy significativas durante la elongación, excepto la velocidad del viento y la humedad relativa. Algo semejante ocurre durante la maduración, con relación a la velocidad del viento (máxima y media) y la radiación solar.

De junio a agosto, durante la elongación, pocas correlaciones son muy significativas; en septiembre y octubre, al final de esta etapa aumenta la cantidad de variables con significancia estadística.

### 6.1.2.2. Cosechados en marzo

En el Cuadro 5 se muestran las correlaciones de los lotes cosechados en marzo, cuya elongación ocurre de septiembre a enero y la maduración de febrero a marzo.

**Cuadro 5:** Coeficientes de correlación de lotes cosechado en marzo.

Variables	Elongación					Maduración	
	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Velocidad del viento máxima	-0.03	-0.18	<b>-0.23**</b>	-0.01	<b>0.33**</b>	-0.11	-0.11
Velocidad del viento media	0.01	-0.01	-0.10	0.07	0.17	-0.10	-0.03
Temperatura máxima	<b>-0.27**</b>	-0.15	<b>-0.21**</b>	0.19	<b>0.39**</b>	0.08	<b>0.24**</b>
Temperatura media	<b>0.31**</b>	<b>0.43**</b>	<b>0.45**</b>	<b>0.47**</b>	0.05	0.01	<b>0.24**</b>
Temperatura mínima	-0.14	<b>0.41**</b>	<b>0.37**</b>	<b>0.45**</b>	0.12	<b>0.22**</b>	<b>0.27**</b>
Amplitud térmica	<b>0.27**</b>	<b>0.40**</b>	<b>0.43**</b>	<b>0.47**</b>	-0.17	-0.05	0.00
Radiación solar acumulada	<b>0.33**</b>	<b>0.45**</b>	<b>0.48**</b>	<b>0.46**</b>	-0.10	<b>0.24**</b>	<b>-0.29**</b>
Humedad relativa	0.05	<b>-0.24**</b>	<b>-0.37**</b>	<b>-0.41**</b>	<b>0.25**</b>	<b>0.23**</b>	0.06
Precipitación (Pp)	<b>-0.39**</b>	<b>-0.37**</b>	<b>-0.52**</b>	<b>-0.42**</b>	<b>0.23**</b>	0.09	<b>-0.21**</b>
Días sin precipitación	0.00	<b>0.32**</b>	<b>0.46**</b>	<b>0.28**</b>	-0.17	<b>0.21**</b>	<b>0.27**</b>
Evapotranspiración (Eto)	0.19	<b>0.33**</b>	<b>0.43**</b>	<b>0.45**</b>	0.10	<b>0.28**</b>	<b>-0.25**</b>
Déficit (Pp-Eto)	<b>-0.41**</b>	<b>-0.38**</b>	<b>-0.51**</b>	<b>-0.41**</b>	<b>0.21**</b>	0.06	-0.13

Fuente: Autor, 2018. \*\* Diferencia significativa al 99%.

Los lotes cosechados en marzo presentan similitud a los cosechados en diciembre, donde velocidad del viento es la única variable que no presenta significancia en ningún mes previo a la cosecha.

Por otro lado, las variables velocidad del viento (máxima y media), amplitud térmica y el déficit, no presentan correlaciones significativas en la maduración. En los meses de octubre, noviembre y diciembre se observan las correlaciones significativas en la etapa de elongación de la caña de azúcar.

### 6.1.2.3. Cosechados en abril

Por último, para lotes cosechados en abril, las correlaciones se muestran en el Cuadro 6. En ellos, la elongación ocurre entre los meses de octubre a febrero y la maduración de marzo a abril.

**Cuadro 6:** Coeficientes de correlación de lotes cosechados en abril.

Variables	Elongación					Maduración	
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Velocidad del viento máxima	0.05	<b>-0.25**</b>	0.01	0.21	0.13	0.05	0.11
Velocidad del viento media	-0.06	0.03	0.13	<b>0.31**</b>	0.12	<b>-0.29**</b>	-0.03
Temperatura máxima	-0.17	0.05	0.14	-0.19	-0.08	<b>-0.23**</b>	<b>-0.23**</b>
Temperatura media	-0.10	<b>0.36**</b>	<b>0.25**</b>	<b>0.27**</b>	-0.06	0.03	-0.12
Temperatura mínima	-0.14	<b>0.42**</b>	<b>0.32**</b>	<b>0.30**</b>	-0.12	-0.20	-0.18
Amplitud térmica	0.03	0.18	0.06	<b>0.27**</b>	0.17	0.18	0.20
Radiación solar acumulada	-0.12	<b>0.36**</b>	0.21	<b>0.29**</b>	-0.13	<b>0.27**</b>	-0.05
Humedad relativa	-0.09	<b>-0.28**</b>	<b>-0.24**</b>	<b>-0.33**</b>	-0.20	-0.18	-0.12
Precipitación (Pp)	-0.18	-0.22	-0.21	<b>-0.35**</b>	<b>0.28**</b>	-0.19	<b>-0.25**</b>
Días sin precipitación	0.09	<b>0.34**</b>	<b>0.34**</b>	0.19	<b>0.23**</b>	<b>0.30**</b>	<b>0.23**</b>
Evapotranspiración (Eto)	<b>-0.23**</b>	<b>0.37**</b>	-0.08	<b>0.32**</b>	0.12	<b>-0.27**</b>	<b>-0.24**</b>
Déficit (Pp-Eto)	-0.18	<b>-0.26**</b>	-0.22	<b>-0.32**</b>	<b>0.29**</b>	-0.19	-0.22

Fuente: Autor, 2018. \*\* Diferencia significativa al 99%.

Los lotes cosechados en ese mes difieren con los de diciembre y marzo, en cuanto a que todas las variables tienen correlaciones significativas en algún mes antes de la cosecha, durante la etapa de elongación o maduración. Por otro lado, los valores más altos de correlación se concentran a mediados de la etapa de elongación (noviembre, diciembre y enero).

Por lo tanto, la elongación y la maduración a nivel de lote, en los tres meses de cosecha, se evidencia que son etapas fenológicas donde las variables meteorológicas influyen en el rendimiento de azúcar (TAH).

## **6.2. Modelos de estimación del rendimiento de la caña de azúcar**

Se han realizado modelos que estiman el rendimiento del cultivo a nivel de país y lote, este último en función del mes de cosecha de los cañaverales.

Para ello, se probaron diferentes variaciones del modelo de regresión lineal múltiple “Stepwise”, desde eliminación hacia atrás, selección hacia adelante y selección paso a paso. En este procedimiento, en el proceso de elaboración del modelo definitivo, hay una continua reevaluación de los predictores incluidos en el modelo, de forma que si algún regresor queda explicado por los restantes (en el sentido de que carece de contribución específica propia) queda eliminado. El criterio para la selección del modelo a utilizar es el que mejor coeficiente de determinación ajustado obtuvo, por lo que solo se muestran los modelos a nivel de país y de lote con mejor resultado.

### **6.2.1. Modelo a nivel país**

Las variables que influyen significativamente en el modelo para estimar el rendimiento son; la humedad relativa y la evapotranspiración de agosto. El modelo que mejor describe la estimación del rendimiento en un 54%, de la variabilidad total, y un 46% restante se debe a otras variables que no están incorporadas al modelo y es el siguiente:

$$y = 0.000000014 - 0.075049296 * Hr8 + 0.879973573 * Eto8$$

En donde:

*y*: Residual del rendimiento del azúcar

*Hr8*: Residual de la Humedad relativa de agosto

*Eto8*: Residual de la Evapotranspiración potencial (Hargreaves-Samani, 1985) de agosto

Por lo tanto, al tomar de referencia las variables que utiliza el modelo, el rendimiento se puede estimar hasta tres meses antes que inicie la zafra.

Es evidente que el mes de agosto es crítico para la biomasa (TCH), que al final se traduce en el rendimiento potencial de azúcar por hectárea (TAH).

### 6.2.2. Modelo a nivel lote

Para cada mes de cosecha se creó un modelo de estimación con las variables que mayor aportaron en los mismos. En el Cuadro 7 se muestran y las variables de cada uno con sus respectivos coeficientes.

**Cuadro 7:** Modelos de estimación del rendimiento a nivel de lote.

Mes de cosecha	Variables evaluadas	Cantidad de variables retenidas	R <sup>2</sup> ajustado	AIC	BIC	Nombre de variable	Valores
Diciembre	27	3	0.44	200.42	213.78	Constante	0.105341673
						Evapotranspiración de noviembre	-0.946566004
						Precipitación de julio	-0.431166843
						Evapotranspiración de diciembre	-0.309355100
Marzo	46	3	0.30	315.49	331.67	Constante	-0.032484238
						Amplitud térmica de diciembre	0.228552230
						Radiación solar de febrero	0.222642523
						Evapotranspiración de octubre	0.147500954
Abril	28	3	0.21	289.76	304.71	Constante	-0.025683063
						Amplitud térmica de enero	0.411988759
						Temperatura máxima de marzo	-0.488221541
						Precipitación de abril	-0.217506656

Fuente: Autor, 2018. Análisis de regresión lineal múltiple (Stepwise forward).

Los coeficientes de determinación son; 0.44 para diciembre, 0.30 para marzo y 0.21 para abril. Aunque son coeficientes relativamente bajos, se pueden mejorar al incorporar o introducir más datos.

El modelo de los lotes que se cosechan en diciembre estima el rendimiento de la caña de azúcar hasta el mes de cosecha, de igual manera que los lotes cosechados en abril. Mientras el modelo de los lotes cosechados en marzo estima el rendimiento con un mes de anticipación.

Algo importante sobre el uso de estos modelos es que, solo se puede estimar el rendimiento de aquellos lotes que posean las siguientes características; estar en el estrato bajo, tener sembrada la variedad CP-722086, 12 meses de edad antes de la cosecha y que tengan al menos 10 años de registros continuos (para eliminar el efecto tecnológico).

## **7. Discusión**

### **7.1. Variables meteorológicas que influyen en el rendimiento de la caña de azúcar**

Recapitulando, en los objetivos de identificar las principales variables meteorológicas y el momento de su influencia en productividad del cultivo, y crear modelos de estimación del rendimiento a partir de estos, se evaluaron 20 variables en cañaverales de 12 meses de edad, con la variedad CP722086 y en el estrato bajo.

Esto se divide en dos partes; a nivel de país y a nivel de lote. En el primero se evaluaron las siguientes variables: temperatura mínima, media, máxima, amplitud térmica, precipitación, déficit, evapotranspiración potencial y humedad relativa. Y en el segundo se evaluaron las siguientes variables: velocidad media y máxima del viento, temperatura mínima, media y máxima, amplitud térmica, radiación solar acumulada, humedad relativa, precipitación, déficit, días sin precipitación y evapotranspiración potencial. Además, a nivel de lote se subdivide en tres meses: diciembre, marzo y abril, (la zafra tiene una duración de siete meses).

#### **7.1.1. Variables a nivel país**

A continuación se discuten las variables en los meses de abril y agosto (Cuadro 3), en los cuales fueron significativos.

##### **7.1.1.1. En abril**

Durante abril la etapa fenológica del cultivo que predomina es la maduración, principalmente para los lotes cosechados en abril y mayo, tomando como referencia que se cosecha de noviembre a mayo en cada zafra.

La única variable significativa fue la temperatura mínima (Cuadro 3), la correlación es negativa, indicando que a medida que este disminuye (en el sur de Guatemala hasta los 16°C), el rendimiento aumenta. En dicho mes, la temperatura mínima promedio (de 1975 al 2015) es de 22°C (Figura 15). Lo anterior coincide con lo observado por CENGICAÑA (2011; Castro et al., 2012), en donde determinaron que el cultivo requiere temperaturas mínimas por debajo de los 18°C durante la maduración en el estrato medio. Algo similar describen Cardozo et al. (2013), pero con un requerimiento de 20°C.

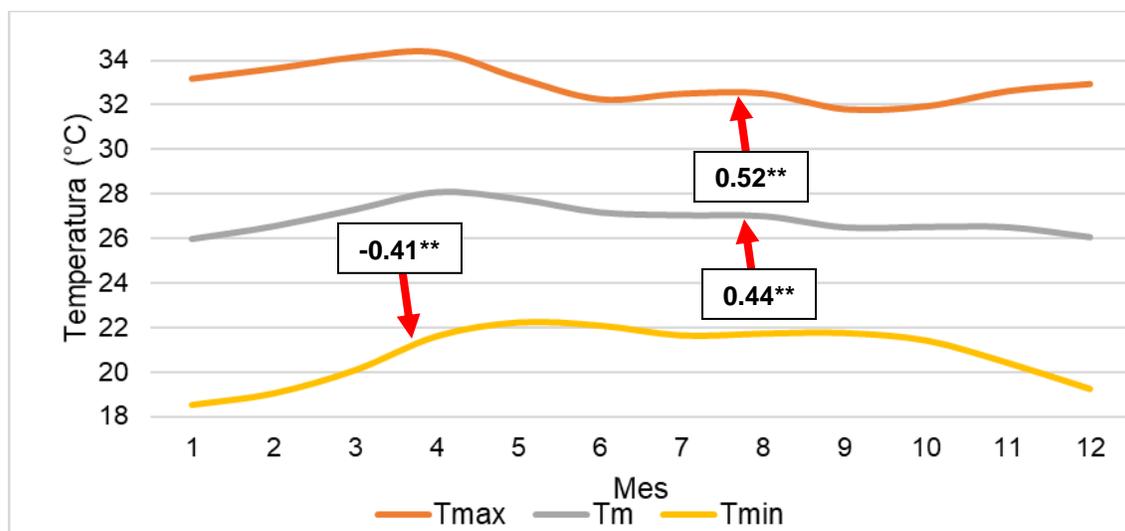
Lo anterior se debe a que la temperatura mínima está muy relacionada con la enzima invertasa neutra, la cual se encuentra en las hojas, y sus niveles ascienden a medida que

la temperatura mínima desciende. Su función en la planta es la acumulación de azúcares en los entrenudos del tallo (Cardozo et al., 2013; Amaya et al., 1995), por ello la correlación negativa entre la temperatura mínima durante la etapa de maduración y el rendimiento de azúcar.

### 7.1.1.2. En agosto

Durante agosto, las etapas fenológicas que predominan en los lotes son el macollamiento y la elongación. Las variables altamente significativas fueron las siguientes: temperatura media, máxima, amplitud térmica, precipitación, evapotranspiración, déficit y humedad relativa (Cuadro 3).

Las variables térmicas como la temperatura media, máxima y amplitud térmica (Cuadro 3), presentan correlaciones positivas, lo cual indica que, al aumentar estas variables, aumenta el rendimiento de azúcar. Durante agosto la temperatura media es 27°C, la temperatura máxima en promedio es de 33°C (Figura 15) y la amplitud promedio es de 11°C (Figura 16).



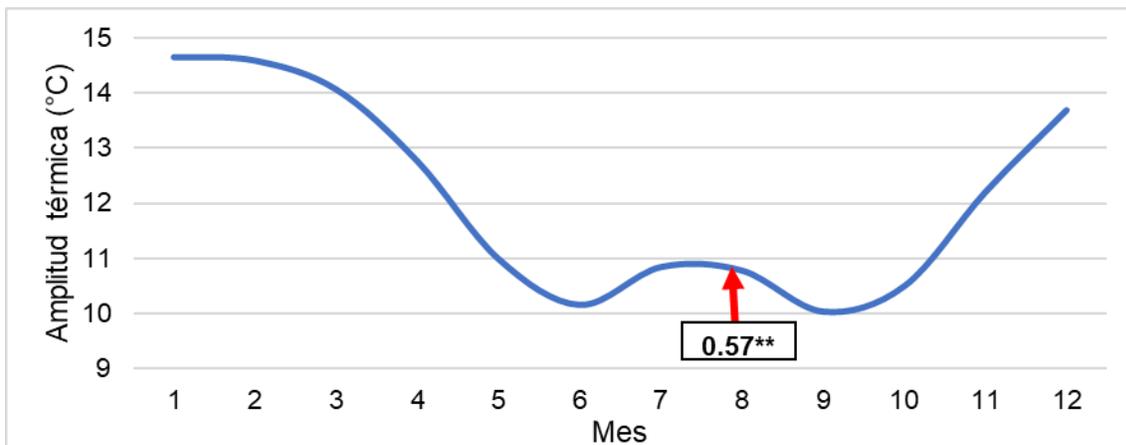
**Figura 15:** Marcha de las temperaturas y coeficientes de correlación.

Fuente: Autor, 2018. Datos de estaciones, Retalhuleu, San José y Camantulul del INSIVUMEH.

La temperatura media coincide con el requerimiento del cultivo durante el macollamiento y elongación, la cual es 27°C a 32°C (Romero et al., 2010), mientras, Amaya et al. (1995) agrega que la temperatura media optima es de 26°C a 30°C.

La temperatura máxima coincide con el requerimiento del cultivo de temperaturas mayores a 30°C y menores a 35°C, durante el macollamiento y la elongación (Vásquez, 2017; CONADESUCA, 2015).

Por su parte, la amplitud térmica (diferencia de la temperatura máxima y mínima) provoca que la temperatura máxima sea la principal fuente de variabilidad de ésta, es por lo cual durante el macollamiento y elongación la amplitud térmica es igual de positiva en la correlación (Figura 16). Durante estas etapas fenológicas, mayores amplitudes térmica provocan el incremento de la cantidad y longitud de los tallos, y del área foliar, siempre que la temperatura máxima no sea crítica para el crecimiento (mayor a 35°C). Las noches cálidas provocan el aumento de la respiración y disminuyen la fotosíntesis neta (Nickell y Takashi, 1972; Rugai y Notoa, 1979; Yates y Bates, 1958; Consultado por Villegas et al, 1995).



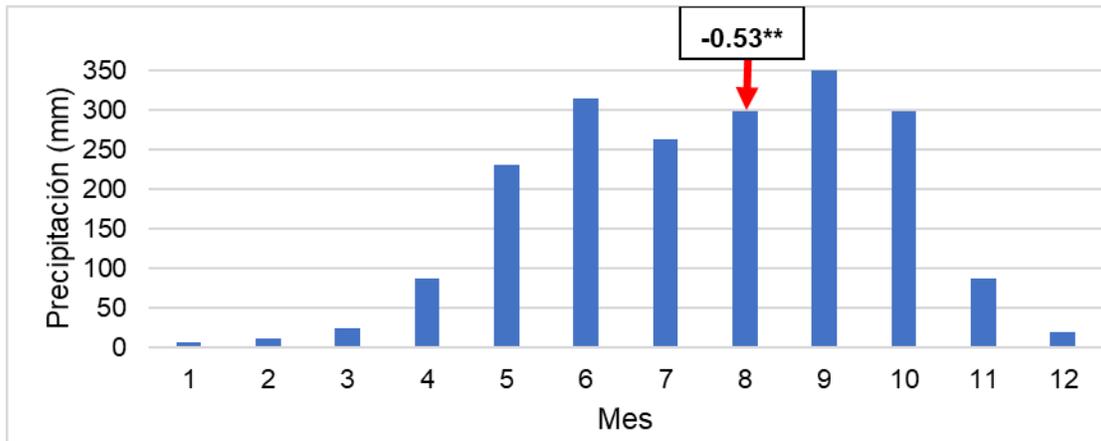
**Figura 16:** Marcha de la amplitud térmica media y el coeficiente de correlación.

Fuente: Autor, 2018. Datos de estaciones, Retalhuleu, San José y Camantulul del INSIVUMEH.

La precipitación excesiva influye de manera negativa (Cuadro 3) en el rendimiento de azúcar (Figura 17) en este mes, por ello al aumentar la precipitación, disminuye el rendimiento. Esto sucede durante la etapa de macollamiento y elongación del cultivo. Estas etapas requieren mayor cantidad de radiación solar global para el crecimiento de los tallos, entrenudos y hojas; y la nubosidad genera precipitación que disminuye la radiación solar global durante agosto. Esto coincide con lo observado por Cardozo et al. (2013), que encontraron correlaciones negativas entre la precipitación y la concentración Pol<sup>5</sup> (%) de hasta cinco meses antes de la cosecha. Por lo tanto, la disminución de las lluvias durante

<sup>5</sup> Contenido de sacarosa en el jugo.

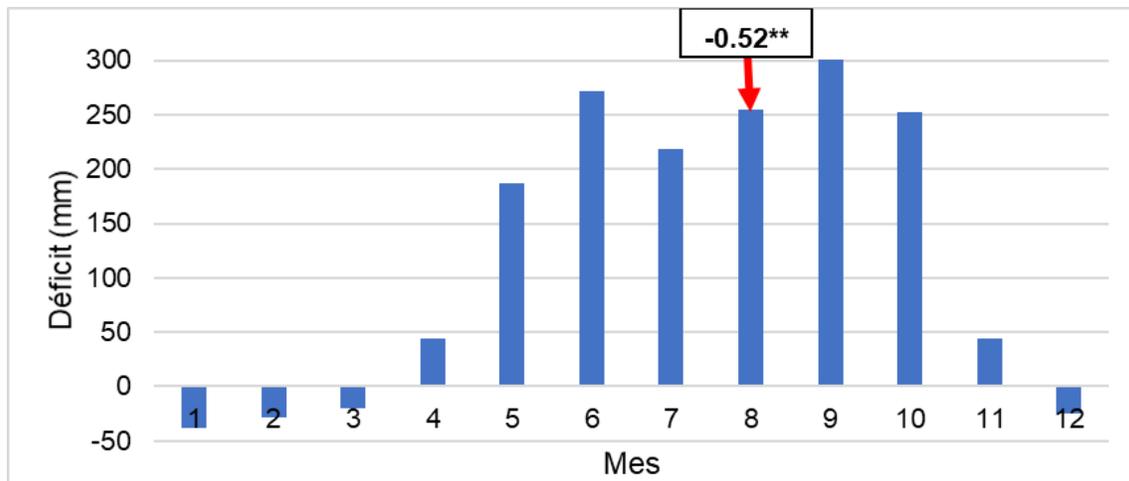
agosto beneficia la generación de biomasa (cantidad de tallos y hojas, y aumento del grosor de los tallos).



**Figura 17:** Marcha de la precipitación acumulada y el coeficiente de correlación.

Fuente: Autor, 2018. Promedios mensuales de las estaciones, Retalhuleu, San José y Camantulul del INSIVUMEH.

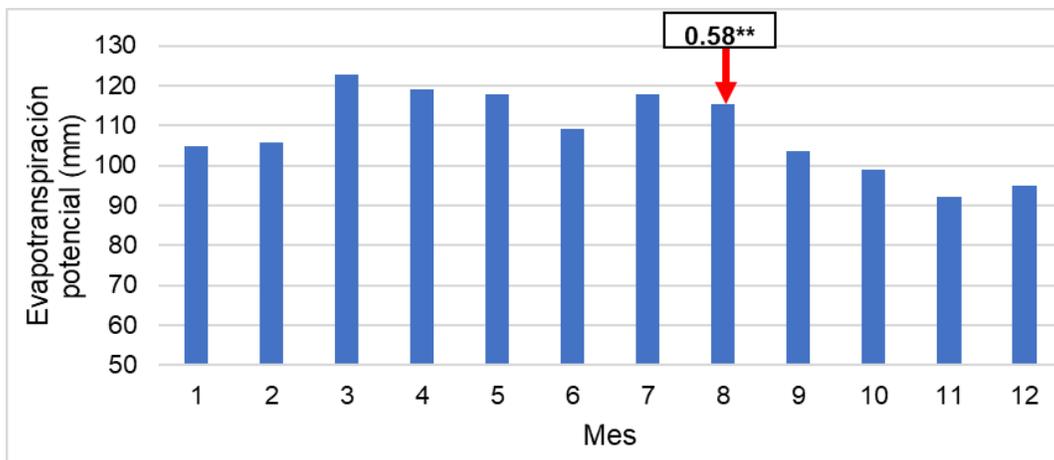
A su vez, el déficit hídrico esta dado por la diferencia entre la precipitación mensual y la evapotranspiración potencial mensual. Cuando es positivo indica mayor precipitación y menor evapotranspiración durante el mes, por lo tanto, su comportamiento durante agosto es muy similar a la precipitación, ya que hay excesos, provocando disminución de la radiación solar en superficie y con ello, disminuye la acumulación de biomasa en este mes. Por ello la correlación es negativa, lo cual indica que, al disminuir la diferencia, aumenta la concentración de biomasa y por ende la concentración potencial de azúcar al final del ciclo. Lo cual coincide con Cardozo et al., (2013).



**Figura 18:** Marcha del déficit y el coeficiente de correlación.

Fuente: Autor, 2018. Promedios mensuales de las estaciones, Retalhuleu, San José y Camantulul del INSIVUMEH.

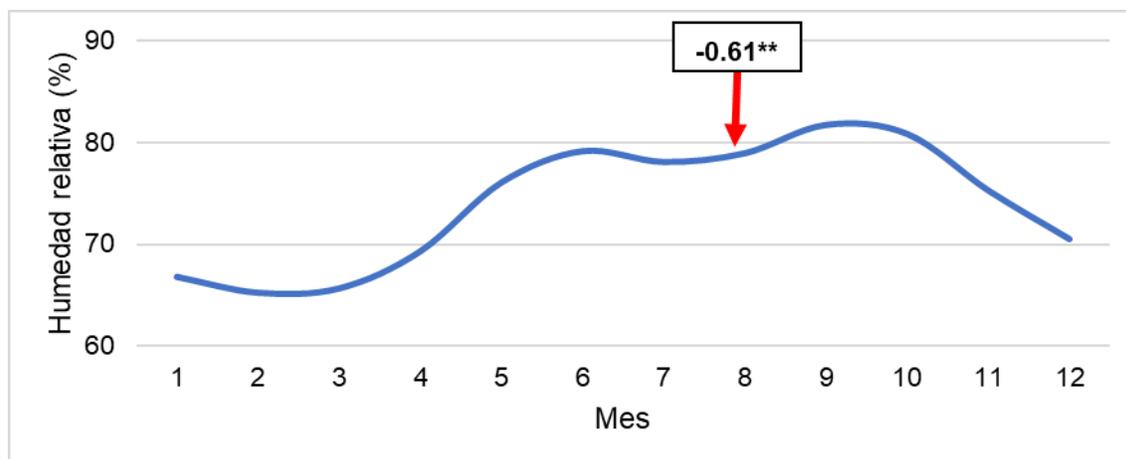
La evapotranspiración potencial (Eto) calculada por el método de Hargreaves-Samani (1985), depende de la temperatura máxima y esta influye mucho sobre el macollamiento y elongación de la caña de azúcar, por lo cual, la correlación es positiva (Figura 19). Al aumentar la temperatura máxima durante este mes (siempre y cuando no sea mayor a 35°C), aumenta la Eto. y aumenta el crecimiento de los tallos, entrenudos y hojas de la caña de azúcar (Nickell y Takashi, 1972; Rugai y Notoa, 1979; Yates y Bates, 1958; Consultado por Villegas et al, 1995).



**Figura 19:** Marcha de la evapotranspiración y el coeficiente de correlación.

Fuente: Autor, 2018. Promedios mensuales de las estaciones, Retalhuleu, San José y Camantulul del INSIVUMEH.

Finalmente, la humedad relativa es un índice que brinda información indirecta de lo que está sucediendo con la temperatura, además su comportamiento durante cada mes coincide con los acumulados de precipitación. En los meses de la época lluviosa la humedad relativa promedio aumenta, y en los meses de época seca, esta disminuye (Figura 17 y Figura 20). Durante el mes de agosto la correlación es negativa (Figura 20), precisamente por el efecto inverso que tienen las precipitaciones sobre la temperatura media y máxima. Durante el macollamiento y elongación se requieren temperaturas máximas en promedio altas (no mayores a los 35°C. Vásquez, 2017), significa que entre menor es la humedad relativa durante agosto, mejores serán los rendimientos de azúcar. Nuevamente, todo está relacionado con el balance de las enzimas invertasa acida e invertasa neutra. Altas concentraciones de invertasa acida y baja invertasa neutra, indica alto crecimiento de los tallos, entrenudos y hojas, mientras bajas concentraciones de invertasa acida y altas concentraciones de invertasa neutra, indica mayor acumulación de sacarosa en los tallos y menor crecimiento (Cardozo et al., 2013).



**Figura 20:** Racha de la humedad relativa y el coeficiente de correlación.

Fuente: Autor, 2018. Promedios mensuales de las estaciones, Retalhuleu, San José y Camantulul del INSIVUMEH.

Este análisis a nivel de país solo permite describir de manera general cómo influye el clima en la caña de azúcar. Por lo tanto, solo se debe utilizar para tomadores de decisiones a nivel general, y no se debería utilizar para toma de decisiones a nivel de lote o finca.

### 7.1.2. Variables a nivel lote

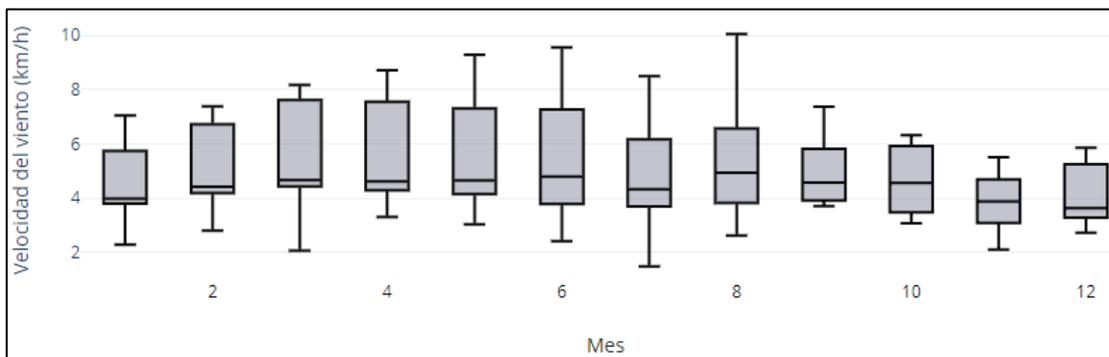
En esta sección se presenta la discusión de resultados de las variables a nivel de lote, para identificar los índices y el momento de su máxima influencia sobre el rendimiento del cultivo.

Las variables que se analizaron son: velocidad media y máxima del viento, temperatura máxima, media y mínima, amplitud térmica, radiación solar, humedad relativa, precipitación, días sin precipitación, evapotranspiración potencial y el déficit.

La discusión se realizó para las etapas fenológicas de elongación y maduración (hasta 7 meses antes de la cosecha), y solo para los meses en los cuales hay correlaciones altamente significativas al 99% de confianza.

### 7.1.3.1. Velocidad media del viento

El primer índice que se analiza es la velocidad del viento y para ello es necesario describir cómo es el comportamiento de este en el sur de Guatemala. Los vientos locales en esa zona están influenciados por las brisas marinas y terrestres. Durante el día se produce brisa marina, ya que la superficie terrestre se calienta más que el Océano Pacífico, provocando que los vientos mantengan predominancia del Sur hacia el Norte. Lo contrario ocurre durante la noche (brisa terrestre). De noviembre a febrero, la velocidad del viento promedio disminuye (Figura 21) debido a la disminución de la radiación solar, por ser invierno en el hemisferio norte; lo que trae aparejado una disminución de la temperatura (Figura 24: Marcha de la temperatura media en el estrato bajo).



**Figura 21:** Marcha de la velocidad media del viento en el estrato bajo.

Fuente: Autor, 2018. Basado en datos de la Estación Tehuantepec.

Por lo tanto, los vientos en el sur de Guatemala se ven afectados por Sistemas de Alta Presión (SAP) provenientes del norte, aumentando la velocidad y provocando escasas precipitaciones. Esto puede suceder desde octubre hasta marzo de cada año (INSIVUMEH, 2018b). Además, el aumento de la velocidad del viento durante marzo provoca el aumento de la evapotranspiración, como lo indica la Figura 21.

El viento puede causar daños a la caña de azúcar, dependiendo de la etapa fenológica en la que se encuentre. Las correlaciones realizadas fueron significativas para los lotes cosechados en abril; en enero es positiva (fase de elongación), en marzo es negativa (fase de maduración) (Cuadro 8).

**Cuadro 8:** Correlación de la velocidad media del viento y el rendimiento.

Datos	R critico	Mes de cosecha	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
107	0.260	Diciembre	-0.05	-0.05	0.04	0.05	-0.09	-0.11	0.08				
188	0.200	Marzo				0.01	-0.01	-0.10	0.07	0.17	-0.10	-0.03	
146	0.224	Abril					-0.06	0.03	0.13	<b>0.31**</b>	0.12	<b>-0.29**</b>	-0.03
Elongación						Maduración							

Fuente: Autor, 2018. \*\* Significativo al 99% de confianza.

Durante la elongación, los SAP ingresan a Guatemala generando lluvias escasas a su paso que benefician el crecimiento del cultivo, por ocurrir durante la época seca.

Mientras que en marzo (primer mes de maduración) el cultivo requiere estrés hídrico para aumentar la enzima invertasa neutra en las hojas (atribuida la maduración) y disminuir la enzima invertasa neutra en los tallos (atribuida al crecimiento) para almacenar los azúcares en los tallos (Cardozo et al., 2013).

Por lo tanto, la influencia de la velocidad del viento se debe principalmente por dos causas; primero, a las lluvias que causan los SAP que ingresan y provocan precipitaciones escasas durante la época seca, y segundo, al volcamiento que pueden provocar, especialmente durante la maduración del cultivo, cuando los SAP llegan al sur de Guatemala, provocando vientos anormales con velocidades superiores a los 18km/h.

### 7.1.3.2. Velocidad máxima del viento

Los vientos normales en el sur de Guatemala oscilan 0 y 18km/h, vientos con mayor velocidad son ocasionados por eventos anormales, como los SAP y ciclones tropicales (ICC, 2018). Durante la elongación las correlaciones negativas significativas (octubre y noviembre), indican que la velocidad máxima corresponde a eventos que aumentan la velocidad provocando el volcamiento de los tallos, repercutiendo en la brotación de las yemas de los nudos, por lo tanto, el cultivo retorna a la etapa de macollamiento por ello disminuye el rendimiento de azúcar.

Mientras que, en los lotes cosechados en marzo, presentan en enero (Cuadro 9), una correlación positiva, debido a las precipitaciones provocadas por los SAP (frentes fríos) durante la época seca en el sur del país.

**Cuadro 9:** Correlación de la velocidad máxima del viento y el rendimiento.

Datos	R crítico	Mes de cosecha	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
107	0.260	Diciembre	-0.05	-0.04	-0.01	0.09	<b>-0.42**</b>	-0.15	-0.12				
188	0.200	Marzo				-0.03	-0.18	<b>-0.23**</b>	-0.01	<b>0.33**</b>	-0.11	-0.11	
146	0.224	Abril					0.05	<b>-0.25**</b>	0.01	0.21	0.13	0.05	0.11
Elongación						Maduración							

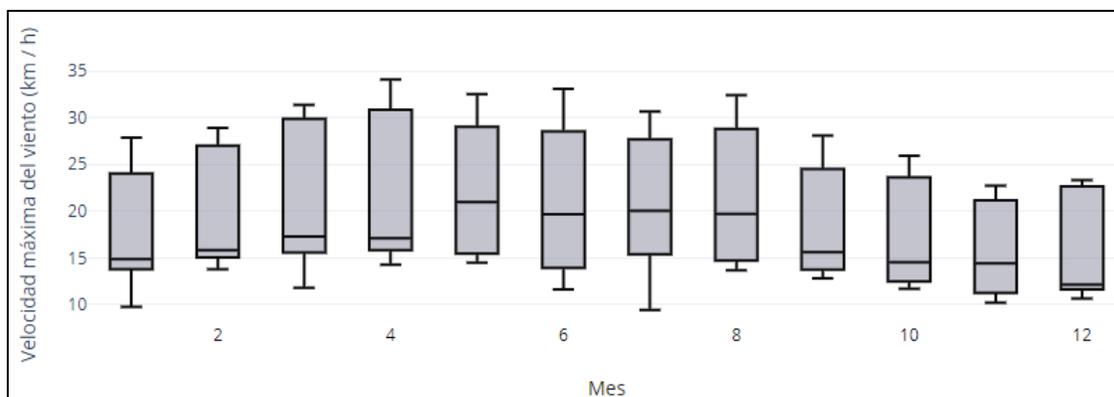
Fuente: Autor, 2018. \*\* Significativo al 99% de confianza.

Los vientos normales en el sur de Guatemala oscilan 0 y 18km/h, vientos con mayor velocidad son ocasionados por eventos anormales, como los SAP y ciclones tropicales (ICC, 2018). Durante la elongación las correlaciones negativas significativas (octubre y noviembre), indican que la velocidad máxima corresponde a eventos que aumentan la velocidad provocando el volcamiento de los tallos, repercutiendo en la brotación de las yemas de los nudos, por lo tanto, el cultivo retorna a la etapa de macollamiento por ello disminuye el rendimiento de azúcar.

Mientras que, en los lotes cosechados en marzo, presentan en enero (Cuadro 9), una correlación positiva, debido a las precipitaciones provocadas por los SAP (frentes fríos) durante la época seca en el sur del país.

Cuadro 9 muestra los coeficientes de correlación entre velocidades máxima del viento y el rendimiento de la caña de azúcar, ocurriendo el mismo proceso descrito anteriormente; los valores negativos se atribuyen a las rachas de máxima velocidad en octubre y noviembre. El valor de enero resulta positivo por la ocurrencia de las precipitaciones en ese mes.

En la Figura 22, se muestra el comportamiento mensual de la velocidad máxima del viento, originada por el ingreso de SAP. Durante los meses de marzo a junio, el viento mantiene una componente sur por la presencia de sistemas de baja presión, ubicados a lo largo del Océano Pacífico, responsables de gobernar la circulación o flujo del viento; y debido a que en el mes de abril ocurren las máximas temperatura del aire, se produce el fenómeno de rachas de máximas velocidades del viento.



**Figura 22:** Marcha de la velocidad máxima del viento en el estrato bajo.

Fuente: Autor, 2018. Basado en datos de la Estación Tehuantepec.

### 7.1.3.3. Temperatura máxima

Al analizar las correlaciones del rendimiento y la temperatura máxima (Cuadro 10), se observa que hay asociaciones negativas en la elongación (meses de cosecha; diciembre y marzo), excepto en enero, donde las temperaturas máximas son más altas que los meses anteriores, provocando que los entrenudos crezcan más rápido hasta no sobre pasar los 35°C (Figura 23).

En la maduración, para lotes cosechados en diciembre, ocurre algo similar, correlaciones son negativas. La temperatura máxima durante el día no es tan elevada (33.5°C), pero las temperaturas mínimas son adecuadas para la concentración de sacarosa (Figura 25). Lo que explica por qué cuando desciende la máxima aumenta la concentración en los entrenudos.

Por otro lado, para los lotes cosechados en marzo, también responden a la disminución de la temperatura máxima provocando esa relación directa con el rendimiento de azúcar.

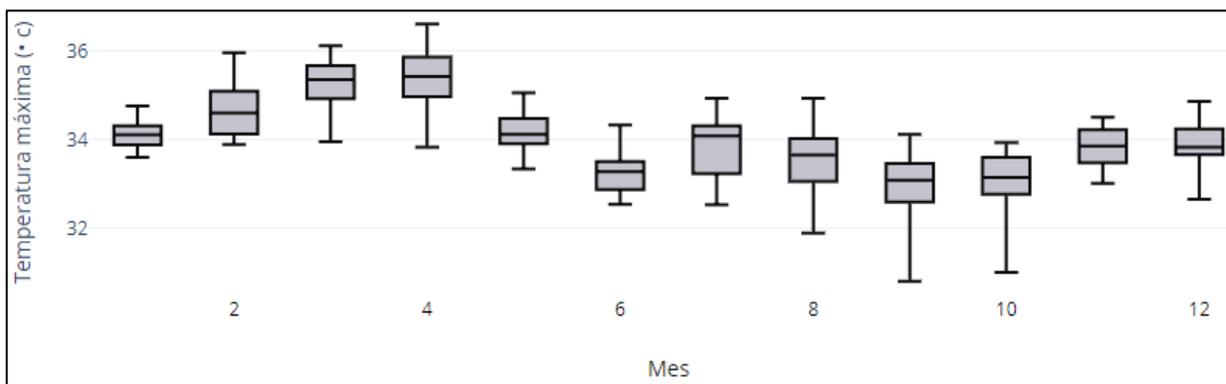
**Cuadro 10:** Correlación de la temperatura máxima y el rendimiento.

Datos	R crítico	Mes de cosecha	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
107	0.260	Diciembre	0.16	0.16	-0.04	-0.39**	-0.43**	-0.23	-0.39**				
188	0.200	Marzo				-0.27**	-0.15	-0.21**	0.19	0.39**	0.08	0.24**	
146	0.224	Abril					-0.17	0.05	0.14	-0.19	-0.08	-0.23**	-0.23**
Elongación						Maduración							

Fuente: Autor, 2018. \*\* Significativo al 99% de confianza.

Mientras que, en los lotes cosechados en abril, la maduración tiene una relación inversa en marzo y abril, porque las temperaturas máximas y mínimas son las más altas del año.

Además, inicia la época lluviosa, por lo que no se cumple con lo que menciona Chaves (1982) y CONADESUCA (2015), de días cálidos, noches frescas y secas.



**Figura 23:** Marcha de la temperatura máxima en el estrato bajo.

Fuente: Autor, 2018. Basado en datos de la Estación Tehuantepec.

Lo anterior se debe a que las temperaturas son un factor importante para la elongación de los tallos y la maduración de la caña de azúcar. En la primera requieren temperaturas medias por encima de los 30 °C (Vázquez, 2017; CONADESUCA, 2015). Mientras para la maduración, se necesitan noches frías (por debajo de los 18 °C), días cálidos y secos (Chaves, 1982; CONADESUCA, 2015).

#### 7.1.3.4. Temperatura media

Las correlaciones de la temperatura media son muy similares a la temperatura mínima. Para los lotes cosechados en diciembre con correlaciones negativas en septiembre (elongación) y diciembre (maduración). Para los cosechados en marzo y abril, correlaciones positivas durante la elongación y maduración (Figura 24 y Cuadro 11).

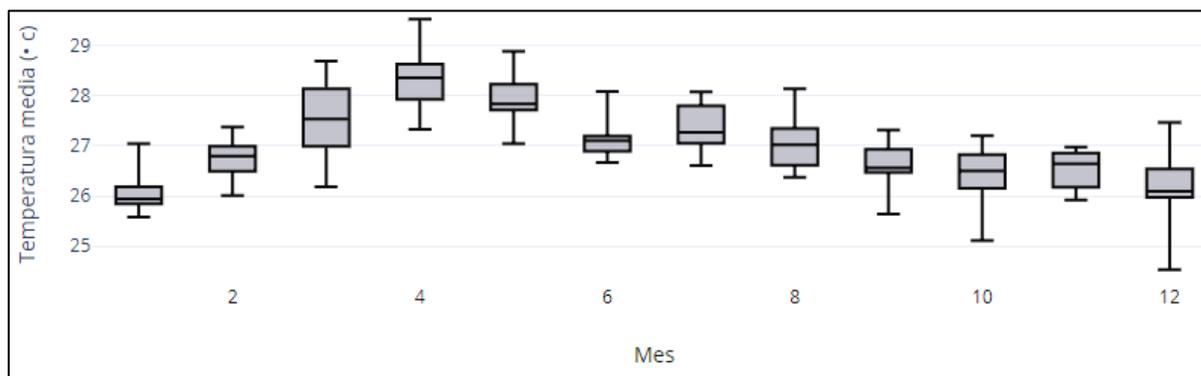
**Cuadro 11:** Correlación de la temperatura media y el rendimiento.

Datos	R crítico	Mes de cosecha	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
107	0.260	Diciembre	-0.17	0.02	-0.22	<b>-0.40**</b>	-0.15	-0.10	<b>-0.40**</b>				
188	0.200	Marzo				<b>0.31**</b>	<b>0.43**</b>	<b>0.45**</b>	<b>0.47**</b>	0.05	0.01	<b>0.24**</b>	
146	0.224	Abril					-0.1	<b>0.36**</b>	<b>0.25**</b>	<b>0.27**</b>	-0.06	0.03	-0.12
Elongación						Maduración							

Fuente: Autor, 2018. \*\* Significativo al 99% de confianza.

Esto sucede porque el requerimiento de la temperatura media en el cultivo de la caña de azúcar depende de la etapa fenológica; en la elongación necesita temperaturas por arriba de 30 °C, mientras en la maduración por debajo de ese nivel (Vázquez, 2017; CONADESUCA, 2015). En Guatemala la temperatura media no es tan variable, durante la

elongación y maduración ocurren temperaturas medias cercanas a los 27.5°C (Cuadro 11 y Figura 24).



**Figura 24:** Marcha de la temperatura media en el estrato bajo.

Fuente: Autor, 2018. Basado en datos de la Estación Tehuantepec.

### 7.1.3.5. Temperatura mínima

Para lotes cosechados en diciembre, hay correlaciones negativas significativas en la elongación (septiembre y octubre), al igual en la maduración (Cuadro 12). Por lo que a medida que la temperatura disminuye, el rendimiento aumenta (esto tomando en cuenta que en el sur de Guatemala las mínimas pueden llegar hasta los 16°C). Similar a los resultados de Cardozo et al (2015).

Lo contrario sucede en lotes cosechados en marzo y abril, obteniendo correlaciones positivas en la elongación. Y en la maduración de los lotes que se cosechan en marzo, cuando aún prevalecen las temperaturas por debajo de los 21°C (diurna) y las temperaturas diurnas altas (Figura 23).

**Cuadro 12:** Correlación de la temperatura mínima y el rendimiento.

Datos	R crítico	Mes de cosecha	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
107	0.260	Diciembre	0.01	0.00	-0.25	-0.42**	-0.45**	0.02	-0.42**				
188	0.200	Marzo				-0.14	0.41**	0.37**	0.45**	0.12	0.22**	0.27**	
146	0.224	Abril					-0.14	0.42**	0.32**	0.30**	-0.12	-0.20	-0.18
Elongación						Maduración							

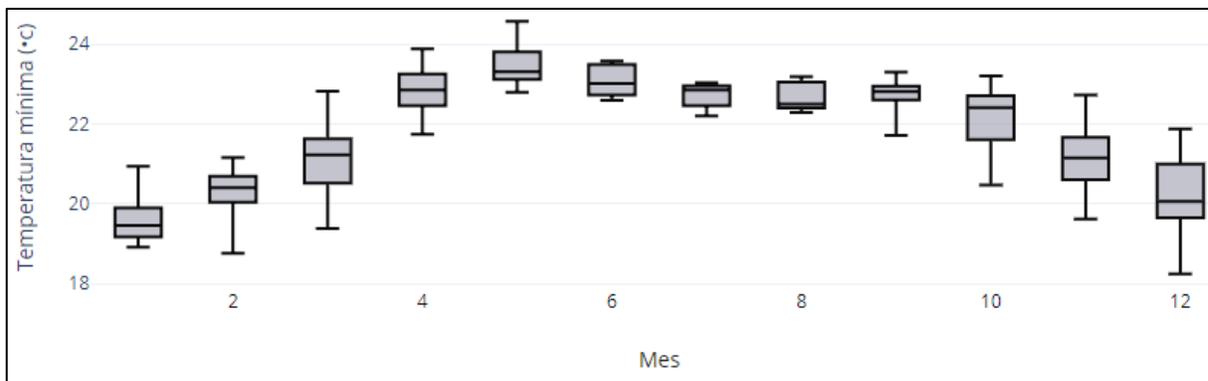
Fuente: Autor, 2018. \*\* Significativo al 99% de confianza.

Para lotes cosechados en abril, solo existe correlaciones con significancia en la etapa de elongación; en la maduración se evidencia la correlación negativa, pero sin significancia (Figura 25).

Castro et al. (2012), encontraron que las mínimas por debajo de los 18 °C en el estrato medio proporcionan mayor acumulación de azúcar de forma natural. Mientras Scarpari (2004) y Beauclair (2009), consultado por Cardozo et al (2013), describen que las temperaturas por debajo de los 20°C disminuyen las tasas de crecimiento de la caña de azúcar y aumentan la acumulación de sacarosa en los tallos. Y viceversa durante la elongación.

Esto debido a que las bajas temperaturas disminuyen los niveles de la encima invertasa acida en los tallos y en consecuencia aumenta la concentración de la invertasa neutra (Alexander and Samuels 1968. Consultado por Cardozo et al. 2015), provocando mayor acumulación de sacarosa en los tallos.

Cardozo et al (2015), corrobora que la temperatura mínima tiene correlaciones inversas con el rendimiento de caña de azúcar, desde 30 hasta 150 días antes de la cosecha en el Sudeste de Brasil. En Guatemala estas dependen de cuándo se cosecha la caña.



**Figura 25:**Marcha de la temperatura mínima en el estrato bajo.

Fuente: Autor, 2018. Basado en datos de la Estación Tehuantepec.

#### 7.1.3.6. Amplitud térmica

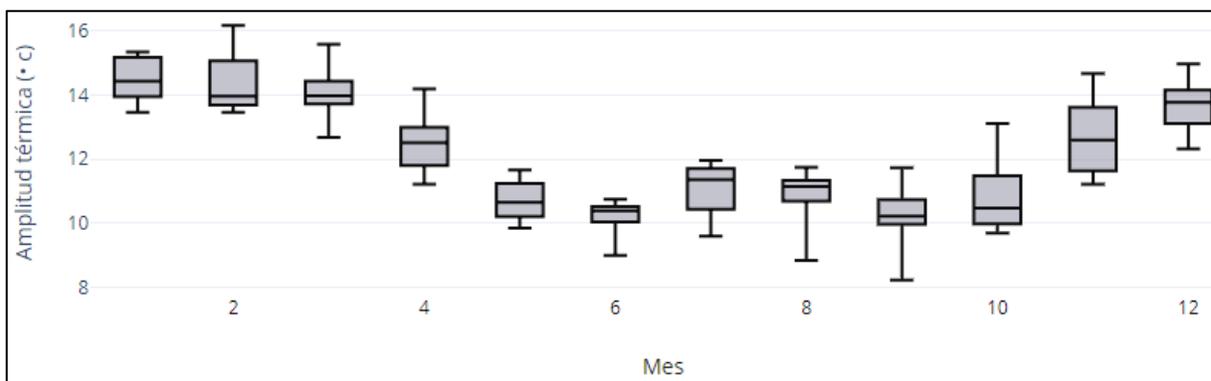
Los resultados que se muestran en el Cuadro 13, evidencian que la amplitud influye dependiendo del mes de cosecha y la etapa fenológica. Durante la elongación, los lotes cosechados en diciembre presentan una relación inversa, especialmente en junio y septiembre. A medida que disminuye la amplitud, mejora el crecimiento del entrenudo del tallo. En octubre y diciembre esta relación es directa, y a medida que aumenta la amplitud, mejora la concentración de sacarosa en los entrenudos. Lo cual coincide con lo observado por CENGICAÑA (2012) en donde las amplitudes térmicas mayores a 15°C influyen directamente en la concentración del azúcar en el estrato medio (100 a 400 msnm).

**Cuadro 13:** Correlación de la amplitud térmica y el rendimiento.

Datos	R crítico	Mes de cosecha	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
107	0.260	Diciembre	-0.37**	0.07	-0.24	-0.32**	0.36**	0.19	0.26**				
188	0.200	Marzo				0.27**	0.40**	0.43**	0.47**	-0.17	-0.05	0.00	
146	0.224	Abril					0.03	0.18	0.06	0.27**	0.17	0.18	0.20
Elongación						Maduración							

Fuente: Autor, 2018. \*\* Significativo al 99% de confianza.

Por otro lado, para los lotes cosechados en marzo, la amplitud térmica está influyendo directamente en la elongación, a medida que esta se amplía, el rendimiento aumenta en los meses de septiembre a diciembre, y en enero para los cosechados en abril (Figura 26).



**Figura 26:** Marcha de la amplitud térmica en el estrato bajo.

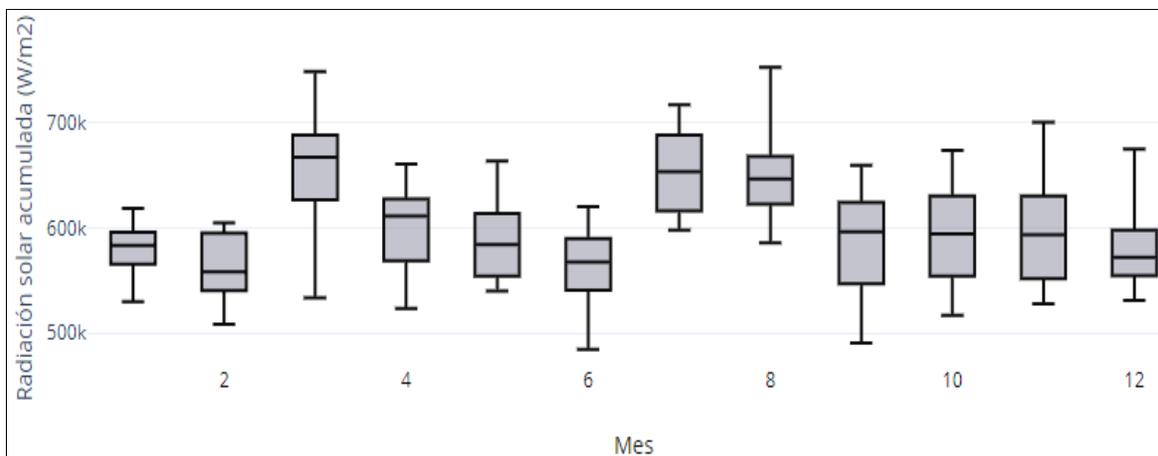
Fuente: Autor, 2018. Basado en datos de la Estación Tehuantepec.

Cassalett et al. (1995) menciona, que las correlaciones positivas entre la amplitud térmica y el rendimiento de la caña de azúcar puede deberse a que altas amplitudes que coinciden con días soleados y cielos despejados, provocando el aumento de la radiación solar incidente en la superficie, lo que beneficia la elongación, y la concentración del azúcar durante la maduración. Durante el día, existen altas tasas de fotosíntesis y durante la noche, bajo consumo de los fotosintatos por respiración, acumulándose en los tallos como azúcares.

### 7.1.3.7. Radiación solar en superficie

La cantidad de radiación astronómica que se recibe en cualquier lugar del planeta depende de la época del año, la latitud del lugar y la hora del día. Guatemala se encuentra entre la latitud 14 y 16° N.

La variabilidad durante el año de la radiación solar en superficie se muestra en la Figura 27.



**Figura 27:** Marcha de la radiación solar global acumulada en superficie.

Fuente: Autor, 2018. Basado en datos de la Estación Tehuantepec.

La radiación solar en superficie es la fuente de energía de las plantas y la caña de azúcar la utiliza dependiendo de su etapa fenológica, para el crecimiento (acumulación de biomasa y sacarosa). En la elongación se utiliza para el crecimiento de los entrenudos y durante la maduración para almacenar energía como sacarosa en los entrenudos del tallo.

La radiación influye en el rendimiento de la caña dependiendo de la etapa fenológica y del mes de cosecha. Para lotes cosechados en diciembre, esta relación es inversamente proporcional al rendimiento, especialmente durante la elongación (Cuadro 14). Ya que esta etapa fenológica coincide con la mayor cantidad de radiación solar recibida (verano en el hemisferio norte).

**Cuadro 14:** Correlación de la radiación solar global en superficie y el rendimiento.

Datos	R critico	Mes de cosecha	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
107	0.260	Diciembre	-0.37**	0.18	-0.34**	-0.36**	0.09	0.15	0.06				
188	0.200	Marzo				0.33**	0.45**	0.48**	0.46**	-0.10	0.24**	-0.29**	
146	0.224	Abril					-0.12	0.36**	0.21	0.29**	-0.13	0.27**	-0.05
Elongación						Maduración							

Fuente: Autor, 2018. \*\* Significativo al 99% de confianza.

En los lotes cosechados en marzo, la radiación solar influye directamente sobre el crecimiento de los entrenudos del tallo. Por lo que a medida que aumenta la radiación, se incrementa el crecimiento de los entrenudos. Posiblemente debido a la menor cantidad de radiación solar recibida durante esos meses (otoño-invierno), al compararse con los lotes cosechados de diciembre (Figura 27). En la maduración, el primer mes (febrero) es similar al de la elongación, pero en el mes de cosecha (marzo), la relación es inversa,

disminuyendo la concentración de azúcares en los entrenudos a medida que aumenta la radiación solar, esto debido a que febrero recibe menos radiación solar que marzo (Figura 27).

Mientras, para los lotes cosechados en abril, la relación con la radiación solar es similar a la elongación de los lotes cosechados en marzo. Pero durante la maduración, el primer mes contribuye de manera directa, necesitando menos tiempo para la acumulación de la sacarosa en los entrenudos, esto porque altas tasas de radiación solar contribuyen a la acumulación de sacarosa en los tallos (Amaya et al., 1995).

#### **7.1.3.8. Precipitación**

La precipitación tiene correlaciones inversas durante la elongación y maduración. Pero esto varía en función del mes de cosecha. Las correlaciones de diciembre, enero y febrero de todos los meses de cosecha, que poseen precipitaciones menores a 10mm, provocando que la variabilidad disminuya (Figura 28), y que alguna precipitación que ocurra en esos meses, influya en las correlaciones y pueda que no represente lo que está sucediendo en el cultivo, especialmente porque durante estos meses el cultivo se riega.

Para lotes cosechados en diciembre, las correlaciones son directas durante la elongación del entrenudo del tallo; o sea que a medida que aumenta la precipitación, aumenta el crecimiento de los entrenudos. Mientras en la maduración la correlación es inversa, porque la planta requiere de un estrés hídrico para aumentar la concentración de sacarosa en esta etapa (Castillo, 2015). Lo que significa, al disminuir la precipitación de noviembre, aumenta el rendimiento de la caña de azúcar (Cuadro 15).

Por otro lado, en lotes cosechados en marzo, durante la elongación la correlación es inversa en los meses de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero. Los dos primeros, son meses con la mayor precipitación anual (por encima de 350mm. Figura 28). Mientras que, en noviembre y diciembre, la precipitación disminuye por el cambio de la época lluviosa a seca. Pese a esto las correlaciones son negativas y puede deberse a que la precipitación disminuye (0-15mm), provocando que cualquier lluvia (por pequeña que fuera) pueda condicionar el signo de la correlación, especialmente en los meses de diciembre y enero (Cuadro 15). Además, en estos meses, el cultivo de la caña de azúcar es regado para cumplir con la demanda de agua en el suelo del cultivo.

En la maduración, el cultivo necesita de estrés hídrico para la disminución de la enzima invertasa ácida (pH 5.1) en los entrenudos y el aumento de la enzima invertasa neutra (pH

7) en las hojas, para aumentar la concentración de sacarosa en los entrenudos del tallo (Cardozo et al., 2013), por ello la correlación es inversa en el mes de cosecha (Cuadro 15).

Para los lotes cosechados en abril, durante la elongación persiste el mismo patrón que los lotes cosechados en marzo. Durante enero y febrero la correlación está condicionada por la baja variabilidad de las precipitaciones en estos meses (0-10mm), provocando que cualquier lluvia pueda orientar el signo del coeficiente de correlación. Mientras en la maduración, la correlación es inversa en abril, porque requiere de estrés hídrico para acumular sacarosa en los entrenudos del tallo.

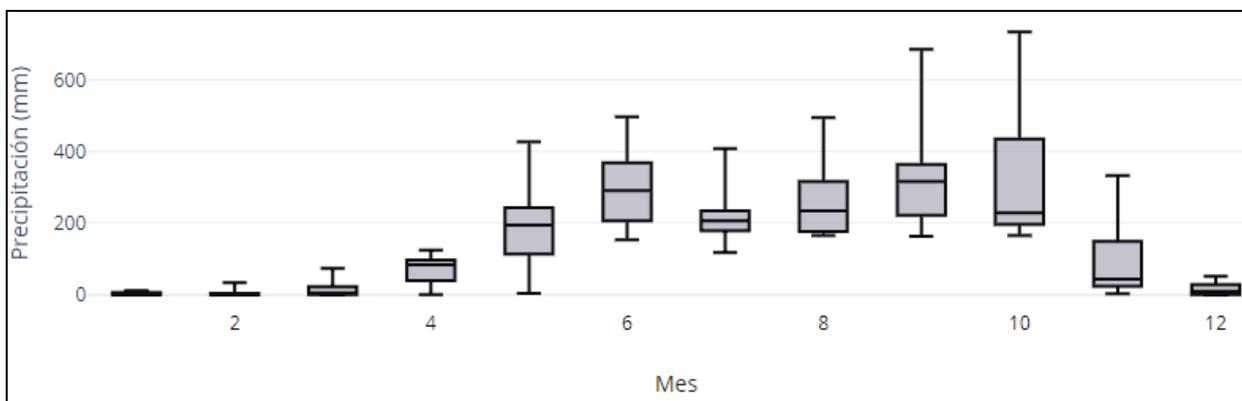
En Brasil Cardozo et al. (2015), determinaron correlaciones negativas entre el total de azúcar recuperable y la precipitación, desde uno hasta seis meses antes de la cosecha. Esto sucede en un ámbito donde existen precipitaciones durante todo el año con una disminución en los meses de verano como ocurre en la región central del sur de Brasil.

**Cuadro 15:** Correlación de la precipitación y el rendimiento.

Datos	R crítico	Mes de cosecha	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
107	0.260	Diciembre	0.02	0.37**	0.19	0.31**	0.09	-0.40**	-0.07				
188	0.200	Marzo				-0.39**	-0.37**	-0.52**	-0.42**	0.23**	0.09	-0.21**	
146	0.224	Abril					-0.18	-0.22	-0.21	-0.35**	0.28**	-0.19	-0.25**
Elongación						Maduración							

Fuente: Autor, 2018. \*\* Significativo al 99% de confianza.

La climatología de las precipitaciones en el estrato bajo para la producción de la caña de azúcar en Guatemala se muestra en la Figura 28. Se observa que, a partir de noviembre hasta abril, las precipitaciones disminuyen. Mientras que, desde mayo a octubre se evidencia la época de mayores precipitaciones, típico del régimen de precipitación monzónico. La caña de azúcar, en la elongación requiere precipitación por arriba de los 150 milímetros al mes. Lo contrario sucede en la maduración, necesitando un periodo de estrés hídrico para concentrar la sacarosa en los entrenudos de los tallos (Vásquez, 2017; Cardozo et al, 2013; CENICAÑA, 1995). Pero ocurre lo contrario cuando las precipitaciones son excesivas durante el mes (Figura 29).



**Figura 28:** Marcha de la precipitación mensual en el estrato bajo.

Fuente: Autor, 2018. Basado en datos de la Estación Tehuantepec.

### 7.1.3.9. Humedad relativa

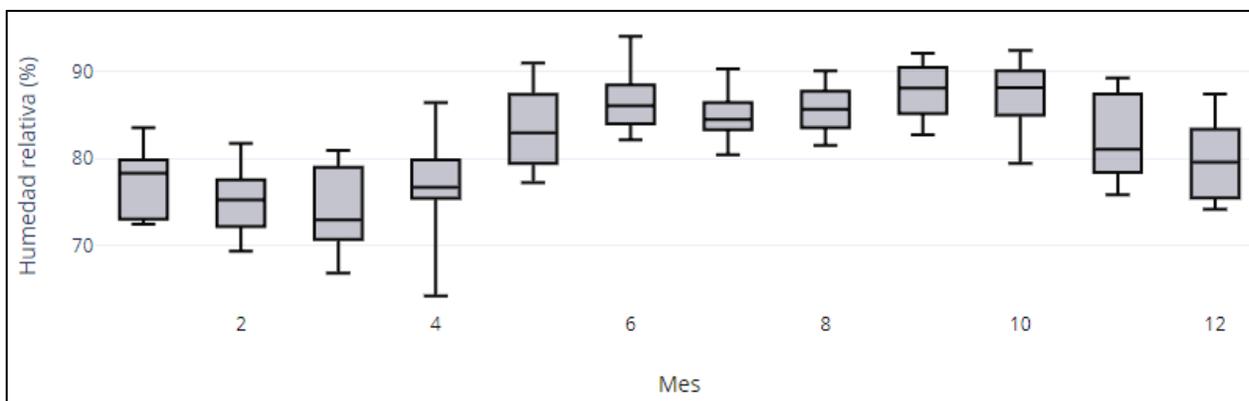
La humedad relativa (Figura 29) tiene un comportamiento similar a lo que ocurre con la precipitación (Figura 28). La mayoría de las correlaciones son inversas durante la elongación y directa durante la maduración de la caña de azúcar (Cuadro 16). Aunque esto varía en función del mes de cosecha.

**Cuadro 16:** Correlación de la humedad relativa y el rendimiento.

Datos	R crítico	Mes de cosecha	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
107	0.260	Diciembre	0.03	-0.10	0.14	0.22	-0.04	<b>-0.36**</b>	-0.22				
188	0.200	Marzo				0.05	<b>-0.24**</b>	<b>-0.37**</b>	<b>-0.41**</b>	<b>0.25**</b>	<b>0.23**</b>	0.06	
146	0.224	Abril					-0.09	<b>-0.28**</b>	<b>-0.24**</b>	<b>-0.33**</b>	-0.20	-0.18	-0.12
Elongación						Maduración							

Fuente: Autor, 2018. \*\* Significativo al 99% de confianza.

El comportamiento de la humedad relativa durante cada mes acompaña al comportamiento de la precipitación, por ende, la influencia sobre el rendimiento del cultivo es similar en cada etapa fenológica y por cada mes de cosecha.



**Figura 29:** Marcha de la humedad relativa media en el estrato bajo.

Fuente: Autor, 2018. Basado en datos de la Estación Tehuantepec.

#### 7.1.3.10. Días sin precipitación

Por otro lado, en el Cuadro 17 se muestran las correlaciones entre los días sin precipitación<sup>6</sup> de cada mes, con el rendimiento de la caña de azúcar. Como los demás índices la asociación y la significancia está en función de la etapa fenológica. Durante la elongación para lotes cosechados en diciembre, las correlaciones son negativas, ósea, al disminuir los días sin precipitaciones, aumenta el rendimiento.

En la maduración, es positiva, coincidiendo con el requerimiento del cultivo a un estrés hídrico para la acumulación de sacarosa en los entrenudos del tallo, provocando el aumento del transporte y almacenamiento de sacarosa de las hojas al tallo (Cardozo et al., 2013).

A su vez, para lotes cosechados en marzo, las correlaciones durante la elongación son positivas, en los tres meses intermedios, lo que implica que, mientras mayor sea la cantidad de días sin lluvia, mayores serán los rendimientos, posiblemente debido al crecimiento de los entrenudos, siempre y cuando se satisfaga con el requerimiento hídrico de la caña en esta etapa. Algo importante que sucede en estos lotes durante la elongación (octubre, noviembre y diciembre), es la disminución de la radiación solar que llega a la superficie y por ello las correlaciones de la precipitación son negativas (Cuadro 15) y los días sin lluvias positivas (Cuadro 17). Mientras en la maduración las correlaciones son positivas debido a que, se necesita de estrés hídrico para acumular la sacarosa en los entrenudos de los tallos.

<sup>6</sup> Un día sin precipitación es igual a precipitación menor a 0.1mm.

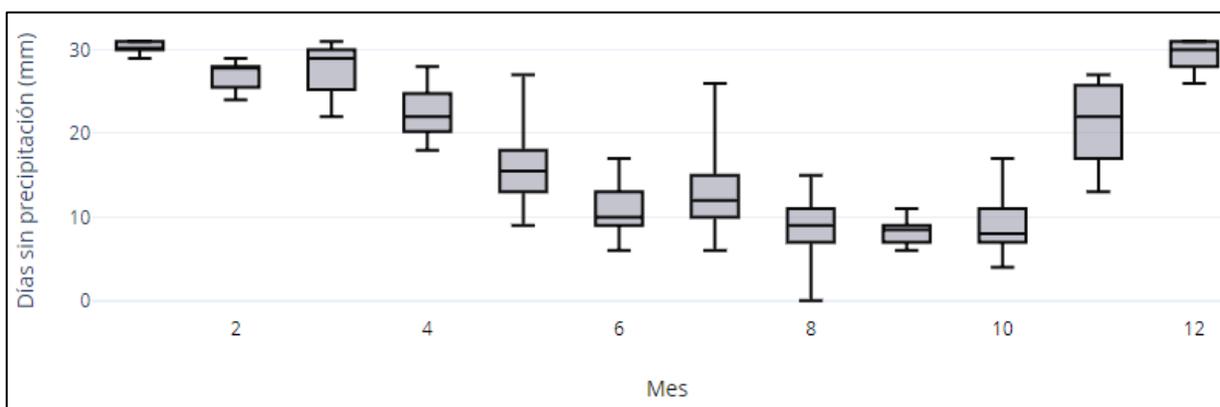
En lotes cosechados en abril, ocurre similar comportamiento que los cosechados en marzo (Cuadro 17).

**Cuadro 17:** Correlación de los días sin precipitación y el rendimiento.

Datos	R critico	Mes de cosecha	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
107	0.260	Diciembre	-0.14	0.02	-0.23	-0.48**	0.24	0.36**	0.06				
188	0.200	Marzo				0.00	0.32**	0.46**	0.28**	-0.17	0.21**	0.27**	
146	0.224	Abril					0.09	0.34**	0.34**	0.19	0.23**	0.30**	0.23**
Elongación						Maduración							

Fuente: Autor, 2018. \*\* Significativo al 99% de confianza.

Como se mencionó anteriormente, los días sin precipitación están inversamente relacionados con las precipitaciones de cada mes (ver Figura 28 y Figura 30). Durante la época seca (noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril) los días sin precipitación son los más altos, mientras en la época lluviosa (de mayo a octubre) disminuyen. Aunque, durante la época lluviosa, julio es el mes con más días sin precipitación (Figura 30).



**Figura 30:** Marcha de los días sin lluvia en el estrato bajo.

Fuente: Autor, 2018. Basado en datos de la Estación Tehuantepec.

### 7.1.3.11. Evapotranspiración potencial

Por otro lado, la evapotranspiración potencial calculada por el método de Allen et al. (2006), es un índice que involucra muchas variables para su estimación, siendo estas; la temperatura media, velocidad del viento y radiación solar. Por consiguiente, puede brindar mejor información en la influencia sobre el rendimiento de la caña de azúcar.

Para lotes cosechados en diciembre, durante la elongación hay correlaciones positivas en julio y octubre; y negativa en agosto (Cuadro 18). En julio y agosto ocurre la disminución de las lluvias, mayormente en julio. Esta disminución provoca el aumento de la radiación solar

incidente y ocurre durante el segundo mes de la elongación, precisamente cuando los entrenudos están creciendo rápidamente.

Mientras en agosto, las lluvias aumentan y disminuye la radiación solar incidente, pero ocurre dos meses después que los entrenudos de los tallos inician el crecimiento, lo cual justifica el hecho de no necesitar más radiación solar para fotosintetizar sacarosa que se pueda utilizar en la elongación de los entrenudos. Mientras en octubre nuevamente la correlación es positiva, lo que podría ocurrir es que la planta se prepara para el inicio de la maduración.

En la maduración las correlaciones son negativas (Cuadro 18), lo cual se debe a que durante estos meses las temperaturas disminuyen (máxima, media y mínima), además de la radiación solar. Esto provoca que las temperaturas mínimas (menores a 20°C; Cardozo, 2013) y amplitudes térmicas (mayores a 15°C; Castro et al., 2012), sean las adecuadas para la concentración de sacarosa en los entrenudos del tallo (Figura 25 y Figura 26).

Para lotes cosechados en marzo, durante la elongación las correlaciones son positivas en octubre, noviembre y diciembre (Cuadro 18), aumentando el crecimiento del entrenudo a medida que la evapotranspiración potencial aumenta (Figura 31). En estos tres meses, la oferta de la radiación solar disminuye (Figura 27), especialmente en noviembre y diciembre, a su vez disminuye la precipitación (Figura 28), pero aumenta la radiación solar global (por la disminución de los días nublados), beneficiando el desarrollo del entrenudo del tallo de la caña de azúcar (por ello son correlaciones positivas).

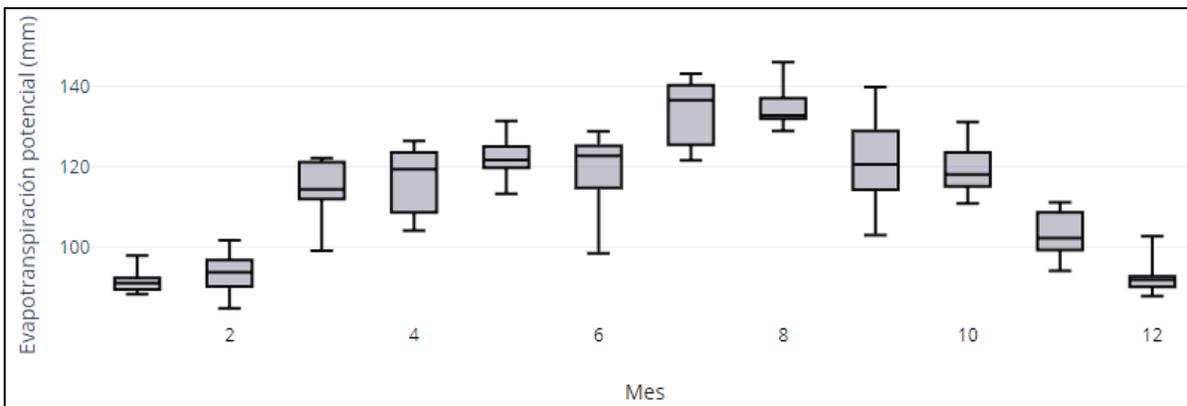
En la maduración la correlación de febrero es positiva y en marzo negativa (Cuadro 18), esto sucede por lo siguiente; en febrero hay menos oferta de radiación solar (Figura 27) por ser invierno en el hemisferio norte, por ello a medida que aumenta la radiación solar global, aumenta la evapotranspiración y la concentración de sacarosa en los entrenudos; y en marzo aumenta la intensidad de la radiación solar, hasta 2500 W/m<sup>2</sup> (Figura 27), aumentando la evapotranspiración potencial, hasta 25mm en el acumulado mensual (Figura 31), lo cual dificulta la concentración de la sacarosa por el aumento del estrés hídrico en la planta.

**Cuadro 18:** Correlación de la evapotranspiración potencial y el rendimiento.

Datos	R crítico	Mes de cosecha	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
107	0.260	Diciembre	-0.25	0.45**	-0.47**	-0.10	0.39**	-0.56**	-0.32**				
188	0.200	Marzo				0.19	0.33**	0.43**	0.45**	0.10	0.28**	-0.25**	
146	0.224	Abril					-0.23**	0.37**	-0.08	0.32**	0.12	-0.27**	-0.24**
Elongación						Maduración							

Fuente: Autor, 2018. \*\* Significativo al 99% de confianza.

Por su parte, los lotes cosechados en abril, durante la elongación en octubre, la correlación es negativa, mientras en noviembre y enero es positiva (Cuadro 18). Octubre es el inicio de la etapa de elongación y mayor oferta de radiación solar al compararla con noviembre, diciembre y enero (Figura 27). Al inicio de esta etapa está finalizando el macollamiento de la caña y no requiere de mucha radiación solar para iniciar la elongación, pero a medida que pasan los meses, es necesario el incremento de esta, para utilizar los azúcares producidos por la fotosíntesis en la elongación de los entrenudos. Mientras en noviembre, diciembre y enero, sucede lo contrario, porque la oferta de radiación solar disminuye (Figura 27), provocando que disminuya la evapotranspiración potencial en estos meses (Figura 31). Por lo cual las correlaciones son positivas (Cuadro 18).



**Figura 31:** Marcha de la evapotranspiración potencial en el estrato bajo.

Fuente: Autor, 2018. Basado en datos de la Estación Tehuantepec.

En la Figura 31, se muestra el comportamiento de la climatología de la evapotranspiración potencial durante cada mes. Los meses de noviembre a febrero presentan bajos valores de ETP; mientras que el resto del año los valores superiores a los 130mm mensuales.

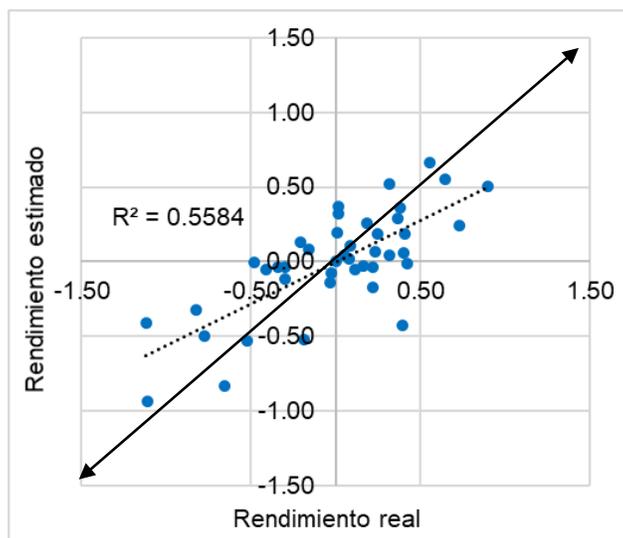
Los resultados generales obtenidos al analizar la influencia de los índices meteorológicos muestran que depende de la época de cosecha y la etapa fenológica del cultivo. Y todos los índices influyen en el balance de la enzima invertasa neutra y ácida, provocando que

aumente la concentración de azúcares o aumente el crecimiento. Un balance positivo para la enzima invertasa neutra, provoca la acumulación de azúcares en el tallo y hojas, mientras un balance positivo de la enzima invertasa acida, provoca el crecimiento y grosor del tallo y hojas.

## 7.2. Modelos de estimación del rendimiento de la caña de azúcar

### 7.2.1. Modelos a nivel país

En el modelo creado para estimar el rendimiento a nivel de país, utiliza dos variables; la humedad relativa y evapotranspiración potencial (Hargreaves-Samani, 1985) del mes de agosto. Se estima el rendimiento con un coeficiente de determinación ajustado de 0.54 y no ajustado de 0.56. En la Figura 32, se muestra la comparación entre el rendimiento estimado por el modelo y el rendimiento real a nivel de país.



**Figura 32:** Rendimiento real y estimado a nivel país.

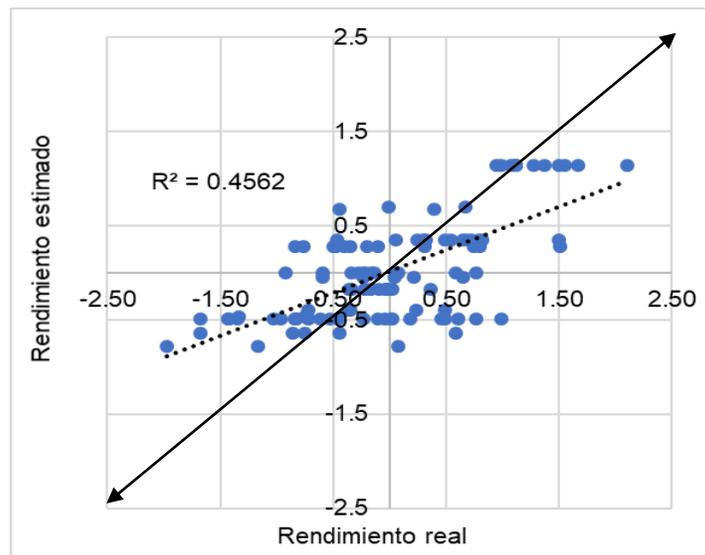
Con esta metodología se obtiene una aproximación del rendimiento con tres meses de anticipación. Aunque de manera general brinda información de lo que está impactando en el rendimiento de la caña de azúcar, la utilidad del mismo es para tomadores de decisión de la Agroindustria Azucarera y no se aconseja utilizarlo para menor escala (ingenio, finca o lote).

El modelo en general sobrestima los rendimientos, aunque existan algunos valores que se alejan bastante de la relación 1:1, subestimando los valores. Se espera que a través de las zafras posteriores se ajuste mejor el modelo y los coeficientes empíricos se vean modificados.

### 7.2.2. Modelos a nivel lote

Por su parte, a nivel de lote los índices que mejor explican el rendimiento varían en función del mes de cosecha.

Para lotes que se cosechan en diciembre, los índices que mejor explican el rendimiento en el modelo son; a) evapotranspiración potencial de noviembre, b) precipitación de julio, y c) evapotranspiración potencial de diciembre. El modelo creado estima el rendimiento con un coeficiente de determinación ajustado de 0.44 y no ajustado de 0.46. Para elaborar este modelo, se evaluaron 27 índices, de los cuales solo se retuvieron tres en el modelo.



**Figura 33:** Rendimiento real y estimado en lotes cosechados en diciembre.

Este modelo utiliza la precipitación de julio para explicar lo que sucede durante la elongación y la evapotranspiración potencial de noviembre y diciembre para explicar la maduración.

Durante la elongación la precipitación puede reducir la elongación de los entrenudos de los tallos de la caña, esto porque se reduce la radiación solar global al aumentar la precipitación y provoca que los entrenudos no se desarrollen adecuadamente. Mientras en la maduración (noviembre y diciembre), la reducción en la evapotranspiración potencial ayuda a la concentración de sacarosa en los entrenudos, esto debido al aumento de la enzima invertasa neutra (atribuida a la maduración) en las hojas y disminución de la invertasa acida (atribuida al crecimiento de la planta) en los entrenudos.

La reducción de la evapotranspiración indica reducción de la temperatura máxima, media y mínima. Esta última, de gran importancia en la acumulación de sacarosa (cuando es menor a 20°C).

Por otro lado, en lotes que se cosechan en marzo, los índices seleccionados son: a) amplitud térmica de diciembre, b) radiación solar de febrero, y c) evapotranspiración potencial de octubre. Este modelo estima el rendimiento con un coeficiente de determinación ajustado de 0.30 y no ajustado de 0.31. Para este modelo se evaluaron 46 índices de los cuales solo fueron seleccionados tres, por su aporte al modelo, y fue seleccionado aquel que mejor coeficiente de determinación obtuvo.

Este modelo utiliza la evapotranspiración potencia de octubre y la amplitud térmica para explicar la etapa de elongación y la radiación solar de febrero para la maduración. Durante la elongación, alta evapotranspiración y amplitud térmica indican mayor desarrollo de los entrenudos y crecimiento de los tallos. Mientras, mayor radiación solar durante febrero revela mayor acumulación de sacarosa en los entrenudos de los tallos. Este modelo y el creado para lotes cosechados en abril no tienen robustez por lo que no se recomienda considerarlos.

Para lotes cosechados en abril, los índices seleccionados son: a) amplitud térmica de enero, b) temperatura máxima de marzo, y c) precipitación de abril. El modelo estima el rendimiento con un coeficiente de determinación ajustado de 0.21 y no ajustado de 0.15. Para la elaboración del modelo se utilizaron 28 índices y retenidos tres.

Este modelo utiliza la amplitud térmica de enero para explicar la etapa de elongación de los tallos y entrenudos, mientras la temperatura máxima de marzo y la precipitación de abril, son utilizados para conocer la maduración de la caña.

La amplitud térmica de enero (etapa de elongación) está muy influenciada por la temperatura mínima, la cual debe ser mayor a 20 °C para una mejor elongación de los tallos y entrenudos de la caña. Este último modelo casi no explica nada la influencia de las variables meteorológicas sobre el rendimiento, por lo que no se recomienda su utilización.

Es probable que los datos a nivel de lotes analizados en marzo y abril no dieron resultados coherentes y con sentido físico, esto porque en estos meses se utiliza componentes químicos para inducir la maduración e inhibir la floración que es perjudicial para la acumulación de sacarosa en estos meses.

Este estudio tiene limitaciones en cuanto al uso de los modelos de estimación del rendimiento; el modelo a nivel de país solo debe utilizarse de manera general para tomar decisiones a nivel de país. Mientras, los modelos a nivel de lote, solo debe considerarse el modelo creado para lotes cosechados en diciembre, el resto tiene falta de robustez y precisión, por lo que no se recomienda utilizarlos. Por otra parte, los modelos recomendados deben validarse y actualizarse con más datos cada año, se deben aplicar en lotes con las mismas características de los lotes utilizados en este estudio. Estos modelos de estimación tienen un margen de error en la estimación y no se han considerado algunas variables mencionadas anteriormente.

Las características que deben tener los lotes para utilizar cada modelo son:

- Con variedad CP-722086
- Sembrados en el estrato bajo
- Cosechados en diciembre, marzo y abril
- Con 12 meses de edad
- Con al menos 10 años de registro del rendimiento (para extraer el efecto tecnológico)

## 8. Conclusiones

Las variables meteorológicas que influyen en el rendimiento del cultivo dependen de la época de cosecha, la etapa fenológica y la marcha de cada variable a lo largo del año.

A nivel de país permitió sacar un análisis coherente lógico y, además, crear un modelo de estimación del rendimiento.

A nivel de país, las variables meteorológicas que influyen en el rendimiento de la caña de azúcar son; temperatura media, máxima, amplitud térmica, precipitación, evapotranspiración potencial y humedad relativa, todos pertenecientes al mes de agosto. La temperatura mínima, que influye en abril.

A nivel de país, el modelo es;  $Y=0.000000014-0.075049296*Hr8$  (humedad relativa media de agosto) +  $0.879973573*Eto8$  (Evapotranspiración potencial acumulada agosto) y estima el rendimiento con tres meses de anticipación del inicio de la zafra.

A nivel de lote no se lograron sacar conclusiones robustas excepto para lotes cosechados en diciembre.

Diciembre fue el mes en el cual se logró crear un modelo de estimación del rendimiento aceptable.

Para lotes cosechados en diciembre las variables que influyen son; velocidad máxima del viento, temperatura máxima, media y mínima, amplitud térmica radiación solar global, humedad relativa, precipitación, días sin precipitación y evapotranspiración potencial.

Para lotes cosechados en diciembre;  $y= 0.1053 -0.9466*Eto11$  (evapotranspiración potencial acumulada en noviembre)  $-0.4312*Pp$  (precipitación acumulada de julio)  $- 0.3094*Eto12$  (evapotranspiración potencial acumulada de diciembre).

## **9. Recomendaciones y futuros estudios**

Realizar el mismo estudio analizando las variables meteorológicas a una escala decadia (10 días) o acumuladas por etapa fenológica en todos los estratos altitudinales y con otras variedades de importancia.

Evaluar otras variables y los más relevantes de este estudio, con el rendimiento de la caña de azúcar a nivel de finca.

Evaluar las variables más relevantes con el rendimiento de la biomasa de la caña de azúcar (Toneladas de Caña por Hectárea, TCH) y el rendimiento de azúcar por tonelada de caña (Tonelada de azúcar por Tonelada de Biomasa, TA/TC) u otras variables dependientes del ambiente.

Relacionar los resultados de este estudio con el cambio climático, El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y otros fenómenos que alteren la marcha climática de las variables evaluados.

Recopilar datos del resto de ingenios azucareros que utilicen la variedad CP722086 para mejorar los modelos a nivel de lote y generar los modelos para los meses de cosecha noviembre, enero, febrero y mayo.

Crear modelos de estimación del rendimiento de la caña de azúcar que utilicen variables meteorológicas, datos de sensores remotos u otro tipo de información que contribuya a mejorar la estimación del rendimiento.

Realizar este estudio con modelos lineales mixtos para mejorar los modelos de estimación del rendimiento.

## 10. Bibliografías

- Allen R. G. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, Italia, FAO. 323 p. (FAO riego y drenaje 56)
- Amaya, A.; Cock, J.H.; Hernández, A.; Irvine, J. Biología. En: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali. CENICAÑA, 1995. 31-62p.
- Arias, E. S. Diagnóstico de rendimientos de caña de azúcar utilizando factores climatológicos múltiples. 2008. Universidad Zamorano. Honduras. 28p.
- ASAZGUA (Asociación de azucareros de Guatemala). 2018. (en línea). Desarrollo económico del azúcar de Guatemala. Consultado el 25/09/2018. Disponible en: <http://www.azucar.com.gt/azucar-de-guatemala-en-el-mundo/>.
- Ayele, N.; Tegene, S.; Negi, T.; Getaneh, A.; Mengistu, L.; Mequanent, Y.; Dilnesa, Z. 2016. Challenges of ripening of sugarcane at tendaho, metahara and Wonji-Shoa sugar estates. European Journal of Food Science and Technology. Vol. 4, No. 4, pp. 22-30. Sugar Corporation, Research Directorate, Wonji, P.O. Box 15. Ethiopian.
- Banco de Guatemala. 2018a. (En línea). Exportaciones de industrias manufactureras para el año 2017. Consultado el 15/03/2018. Disponible en: [http://www.banquat.gob.gt/inc/ver.asp?id=/estaeco/comercio/sercom/2\\_POR\\_PRODUCTO/X\\_PROD\\_1994\\_2017.htm&e=138602](http://www.banquat.gob.gt/inc/ver.asp?id=/estaeco/comercio/sercom/2_POR_PRODUCTO/X_PROD_1994_2017.htm&e=138602).
- Banco de Guatemala. 2018b. (En línea). Principales exportaciones FOB, años 1980-2018. Comercio general de Guatemala. Consultado el 24/09/2018. Disponible en: <http://www.banquat.gob.gt/inc/ver.asp?id=/pim/expfob&e=140141>.
- Buenaventura O., C. 1995. Factores que afectan el crecimiento, producción y desarrollo de la caña de azúcar. El cultivo de la caña de azucarera de Colombia. CENICAÑA (Centro de investigación de la caña de azúcar de Colombia). ISBN 958-33-0283-X. Colombia.
- Buenaventura, C. 2018. Factores climáticos que afectan el crecimiento, producción y desarrollo de la caña de azúcar. Industrialización de la caña. 5p. Colombia.

- Cardozo, N. P.; Sentelhas, P. P.; Panoso, A. R.; Palhares, A. L.; Ide, B. Y. 2015. Modeling sugarcane ripening as a function of accumulated rainfall in Southern Brazil. *International Journal of Biometeorology*. 59:1913-1925. Brazil. 13 Pages.
- Cardozo, N.P., and P.C. Sentelhas. 2013. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. *Scentia Agricola*. Sao Paulo, Brazil. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000600011>. 9 pages.
- Cassalett D., C.; Torres A., J.S.; Isaacs E., C.H. 1995. El cultivo de la caña de azucarera de Colombia. CENICAÑA (Centro de investigación de la caña de azúcar de Colombia). Editores; ISBN 958-33-0283-X. Colombia.
- Castillo, R.; García F. 2015. Factores que afectan la calidad de la caña de azúcar. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador – CINCAE –. Research Gate. DOI: 10.13140/RG.2.1.1398.1528. 9p.
- Castro, O.; 2014a. Análisis agrometeorológico del primer tercio de la zafra 2013/14. Presentación en PowerPoint. 34 diapositivas. Guatemala.
- Castro, O.; 2014b. El riego en el cultivo de la caña de azúcar. En el libro “El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala”. CENGICAÑA (Centro guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar). 25 páginas. Guatemala.
- Castro, O.; Gil, A. 2010. Efecto de la temperatura ambiental en la acumulación de azúcar, estudio preliminar realizado en Ingenio La Unión. Informe Anual 2009-2010. CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar). Guatemala. 77p.
- Castro, O.; Suarez, A. 2012. La meteorología en caña de azúcar. CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar). 2012. El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala. Guatemala. 32 p.
- Chaves, M.A. 1982. La maduración, su control y la cosecha de la caña de azúcar. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). Presentado en el “Seminario de Tecnología Moderna de la Caña de Azúcar”, 2, San José, Costa Rica, 1982. Memorias. San José, CAFESA / ATACORI / MAG/ LAICA, setiembre. p: 28-40.
- CONADESUCA (Consejo Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar). 2015. Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.).

- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación. México. 19p.
- Espinoza, G. 2014. Manejo y control de malezas. En el libro “El Cultivo de la caña de azúcar en Guatemala”. 131-147paginas. Guatemala.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2015. FAO Statistical Pocketbook World food and agriculture. Roma, Italia. 231 paginas.
- Ferrano, D.O.; Rivero, D.E.; Ghersa, C.M. 2009. An analysis of the factors that influence sugarcane yield in Northern Argentina using classification and regression trees. Field Crops Research 112 (2009) 149-157. doi: 10.1016/j.fcr.2009.02.014. Argentina.
- Hargreaves, G. H., Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. For presentation at the 1985 Winter Meeting AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Chicago, IL. USA.12 page.
- ICC (Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático). 2018a. Red de estaciones meteorológicas automáticas. (En línea). Consultado el 11/08/2018. Disponible en: <https://redmet.icc.org.gt/>. Guatemala.
- ICC (Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático). 2018b. Mapa de los estratos altitudinales de la zona cañera de Guatemala. Guatemala.
- Ingenio la Unión S. A. 2018. Datos de rendimiento de lotes bajo administración de las zafras 2003/04 hasta la zafra 2017/18. Archivo digital en formato XML. Base de datos en Microsoft Excel ®.
- INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología). 2018a. Red de estaciones meteorológicas convencionales (En línea). Consultado el; 11/08/2017. Disponible en; <http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/ESTACIONES/>. Guatemala.
- INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología). 2018b. Los vientos en Guatemala. (En línea). Consultado el: 07/09/2018. Disponible en: [http://www.insivumeh.gob.gt/?page\\_id=1719](http://www.insivumeh.gob.gt/?page_id=1719).
- INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología). 2018c. El Clima de Guatemala. (En línea). Consultado el: 05/10/2018. Disponible en: [http://www.insivumeh.gob.gt/?page\\_id=982#](http://www.insivumeh.gob.gt/?page_id=982#).

- Márquez, M.; 2014. El manejo integrado de plagas. CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación, Capacitación y Transferencia de la caña de azúcar. En el libro "El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala. 29 páginas. Guatemala.
- Martinez O., R.M.; Tuya P., L.C.; Martinez O., M.; Perez A., A.; Cánovas, A.M. 2009. El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. Revista Habanera de Ciencias Médicas. SN 1729-519X. UL <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180414044017>. Sistema de Información Científica Redalyc. Universidad Autónoma de México (UNAM).
- Meneses, A.; Melgar, M.; Galiego, M. 2016. Series históricas de producción, exportación y consumo de azúcar en Guatemala. CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar). Boletín informativo. Año 17, No. 1. Guatemala.
- Meneses, A.; Melgar, M.; Orozco, H.; Villatoro, B.; López, P. 2019. Informe anual 2017-2018. CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar. Guatemala. 183p.
- Monzón, L.S. 2014. Efectos en el desarrollo de la variedad CP 72-2086 de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) a las aplicaciones foliares y al momento de la siembra de pyraclostrobin y Kelpak., diagnóstico y servicios prestados al área de investigación y producción de la empresa BASF de Guatemala. Trabajo de graduación de la Universidad de San Carlos de Guatemala. 104p.
- Murphy, G.; Hurtado, R. 2016. Agrometeorología. 1ra. Ed. 1ra. Reimpresión. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía, 2016. 512p.; 26x17cm. Argentina.
- Ovalle, W.; Quemé, J.L.; Orozco, H., Perez, O. 2014. Semilleros y siembra comercial. CENGICAÑA (Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar). En el libro "El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala". 11 páginas. Guatemala.
- Romero, E. R.; Digonzelli, P.A.; Scandaliaris. J.; Leggio, M.F.; Giardina, J.A.; Fernández, J.; Casen, S.D.; Tonatto, M.J.; Alonzo, L.G. 2009. 1a ed. Manual cañero. Las Talitas: Estación experimental Agroindustrial Obispo Colombres. 232 p.; 17x22 cm. ISBN 978-987-21283-7-1.

- Romero, Eduardo R., Tonatto, Javier, Scandaliaris, Jorge, Digonzelli, Patricia, & Leggio Neme, María F. (2010). Efectos de la temperatura en la emergencia y el crecimiento inicial de caña planta y primera soca, variedad TUCCP 77-42. Revista industrial y agrícola de Tucumán, 87(1), 07-14. Recuperado en 27 de agosto de 2018, de [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1851-30182010000100002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-30182010000100002&lng=es&tlng=es).
- Ross, Sheldon M. 2007. Introducción a la estadística. 2da. Edición. Editorial Reverté, S.A. Barcelona, España. ISBN: 978-84-291-5039-1. 817 (125) p.
- Suarez, A. 2012. El Niño Oscilación del Sur y su influencia en el rendimiento de la caña de azúcar en Guatemala. (En línea). Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC). Consultado el 29/10/2018. Disponible en: <https://icc.org.gt/wp-content/uploads/2016/03/Indices-ENOS-y-produccion-en-ca%C3%B1a-de-azucar-en-Guatemala.pdf>. Guatemala. 2p.
- Vásquez C., J.J. 2017. Efecto del clima en la producción de caña y azúcar en central progreso. Central Progreso, Veracruz, México. 9p.
- Villegas, F.; Archila, J. 1995. Uso de madurantes. El cultivo de la caña de azucarera de Colombia. CENICAÑA (Centro de investigación de la caña de azúcar de Colombia). ISBN 958-33-0283-X. Colombia. 315-335 página.



F\_\_\_\_\_

Maestrando: Ing. Agr. Elmer Adolfo Orrego León



Ing. Agr. RAFAEL H. HURTADO  
PROFESOR TITULAR INTERINO  
AGROCLIMATOLOGIA  
F.C.A. - UNJu

F\_\_\_\_\_

M Sc. Rafael Horario Hurtado



M. Sc. MARÍA E. FERNÁNDEZ LONG  
CLIMATOLOGÍA Y FENOLOGÍA AGRÍCOLAS  
FACULTAD DE AGRONOMIA - U.B.A.

F\_\_\_\_\_

M Sc. Maria Elena Fernández Long