



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**  
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS  
**CAMPUS TABASCO**

PROGRAMA PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

**“DINÁMICA DE CRECIMIENTO DE VARIEDADES  
DE CAÑA DE AZÚCAR EN DIFERENTES CONDICIONES  
EDÁFICAS EN LA CHONTALPA, TABASCO”**

**SERGIO SALGADO VELÁZQUEZ**

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO

2019

La presente Tesis, titulada: “**DINÁMICA DE CRECIMIENTO DE VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR EN DIFERENTES CONDICIONES EDÁFICAS EN LA CHONTALPA, TABASCO**” realizada por el alumno: **Sergio Salgado Velázquez**, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

POSTGRADO EN PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA:



\_\_\_\_\_  
DRA. LUZ DEL C. LAGUNES ESPINOZA

ASESOR:



\_\_\_\_\_  
DR. DAVID J. PALMA LÓPEZ

ASESOR:



\_\_\_\_\_  
DR. JOAQUÍN A. RINCÓN RAMÍREZ

ASESOR:



\_\_\_\_\_  
DR. FRANCELINO A. RODRIGUES  
JUNIOR

H. Cárdenas, Tabasco, México 29 de Noviembre de 2019



*“2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata”*


### **CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN**

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el(la) que suscribe Sergio Salgado Velázquez alumno(a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta Institución, bajo la dirección del(la) Profesor(a) Dra. Luz del Carmen Lagunes Espinoza, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Dinámica de crecimiento de variedades de caña de azúcar en diferentes condiciones edáficas en la Chontalpa, Tabasco y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El(la) Consejero(a) o Director(a) de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

H. Cárdenas, Tabasco, a 29 de Noviembre de 2019.



Firma



Vo. Bo. Profesor(a) Consejero(a) o Director(a) de Tesis

# DINÁMICA DE CRECIMIENTO DE VARIEDADES DE CAÑA DE AZÚCAR EN DIFERENTES CONDICIONES EDÁFICAS EN LA CHONTALPA, TABASCO

Sergio Salgado Velázquez, M. C.  
Colegio de Postgraduados, 2019

## RESUMEN

El objetivo fue evaluar la evolución del crecimiento de las variedades CP 72-2086 y Méx 69-290 durante el ciclo de soca, en respuesta a dos subunidades de suelo (Fluvisol eútrico, FLeu y Vertisol eútrico, VReu), y su relación con índices de vegetación, variables de calidad y climáticas. Mensualmente se determinaron el número de tallos en dos metros lineales, el índice de área foliar (IAF), el índice de vegetación de las diferencias normalizadas (NDVI) y la concentración de pigmentos fotosintéticos; a los 3, 6, 9 y 11 meses el diámetro y altura de tallo, la biomasa foliar, biomasa de tallos y la biomasa total. A los 9, 10 y 11 meses el porcentaje de °Brix, Pol, Fibra, Azúcares reductores, pureza y humedad. Los datos de crecimiento se graficaron como una función del tiempo termal considerando una temperatura base de 12°C. El experimento se realizó en parcelas de productores del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Tabasco, durante el ciclo soca 2018/2019. Los datos climatológicos se tomaron en estaciones próximas a las parcelas de estudio. Los datos se analizaron bajo un diseño completamente al azar en arreglo factorial, considerando como factores a las variedades, subunidades de suelo y fechas de muestreo. Los resultados muestran diferencias varietales por subunidad de suelo para las variables evaluadas. CP 72-2086 presentó mayor altura, número de tallos, IAF, tasa de crecimiento de tallos (TCC,  $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) y concentración de clorofila a y b en la subunidad FLeu que la Méx 69-290 en las subunidades VReu y FLeu. En ambas variedades la mayor TCC se da de los 3 a los 6 meses de edad. La mayor producción de biomasa de tallos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de CP 72-2086 se da FLeu, mientras que la de Méx 69-290 en VReu. Las correlaciones de Pearson fueron altas entre el NDVI con altura ( $r=0.86$ ) y biomasa de tallos ( $r=0.81$ ); y con el IAF (0.82 y 0.74, respectivamente). Y entre NDVI y porcentaje de °Brix, pol y fibra ( $r=0.69$ , 0.67 y 0.62, respectivamente).

**Palabras claves:** dinámica de crecimiento, índices de vegetación, correlaciones, calidad de jugos, caña de azúcar.

# DYNAMICS OF GROWTH OF SUGAR CANE VARIETIES IN DIFFERENT TYPES OF SOILS IN THE CHONTALPA, TABASCO

Sergio Salgado Velázquez, M. C.  
Colegio de Postgraduados, 2019

## ABSTRACT

The objectives were to evaluate the evolution of the growth of sugarcane varieties CP 72-2086 and Mex 69-290 during the first ratoon cycle, in response to two soil subunits (Fluvisol eútrico, FLeu and Vertisol eútrico, VReu), and their relationship with vegetation indexes, quality and climatic variables. Monthly, the number of stalks in two linear meters, the leaf area index (IAF), the vegetation index of the standardized differences (NDVI) and the concentration of photosynthetic pigments were determined; at 3, 6, 9 and 11 months the stalk diameter and height, leaf biomass, stalk biomass and total biomass. At 9, 10 and 11 months, the percentage of °Brix, Pol, Fiber, Reducing sugars, purity and humidity. Growth data were plotted as a function of thermal time considering a base temperature of 12 ° C. The experiment was carried out in plots of producers in the supply area of Ingenio Santa Rosalía, Tabasco, during the 2018/2019 first ratoon cycle. The weather data were taken at stations close to the study plots. The data were analyzed under a completely randomized design in factorial arrangement, considering as factors the varieties, soil subunits and sampling dates. The results show varietal differences by soil subunit for the evaluated variables. CP 72-2086 presented greater stalk height, number of stalks, IAF, stalk growth rate (SGR, kg ha<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>) and a and b chlorophyll concentration in the FLeu subunit than the Mex 69-290 in the VReu subunits and FLeu. In both varieties, the highest SGR occurs from three to 6 months of age. The highest production of stalk biomass (kg ha<sup>-1</sup>) of CP 72-2086 was obtained in FLeu, while that of Mex 69-290 in VReu. The Pearson correlations were high between the NDVI with height ( $r = 0.86$ ) and stalk biomass ( $r = 0.81$ ); and with the IAF (0.82 and 0.74, respectively); and between NDVI and percentage of °Brix, pol and fiber ( $r = 0.69$ , 0.67 and 0.62, respectively).

**Keywords:** growth dynamics, vegetation indices, correlations, juice quality, sugarcane.

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A Dios.**

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

### **Al Colegio de Postgraduados (COLPOS) Campus-Tabasco.**

Por haberme permitido este acercamiento a la ciencia, por el financiamiento otorgado y por el acceso a la infraestructura de laboratorios.

### **Al proyecto COMPASS Mexicano (PEI17-5061).**

Por el apoyo económico y facilidades otorgadas para la realización de esta investigación.

### **Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).**

Por la beca otorgada para la realización y culminación de los trabajos, experimentos, escritos y tramites inherentes a la Maestría en Ciencias.

### **Al Ingenio Santa Rosalia (ISR).**

Por las facilidades otorgadas para el establecimiento de las parcelas de estudio, el acercamiento al laboratorio de campo y los datos para analisis.

### **A los Productores de caña de azúcar.**

Por permitirme llevar a cabo todas las mediciones de las variables en estudio en sus parcelas de caña.

### **A la Dra. Luz del Carmen Lagunes Espinoza.**

Sin duda alguna, si hay alguien a quien quisiera parecerme como investigador es a usted Dra. Siempre me mostró mucha paciencia, serenidad y sobretodo, por su constante orientación, dedicación y enseñanzas; virtudes que me llevo de usted. Muchas gracias de corazón.

### **Al Dr. Sergio Salgado García.**

Amado padre gracias por todos tus consejos, sugerencias y observaciones, y principalmente por toda la dedicación e interés mostrado para la conclusión de este trabajo del cual me siento honrado y orgulloso. Muchas gracias.

### **Al Dr. David J. Palma López.**

Por sus atinadas sugerencias para mejorar este trabajo. Gracias

### **Al Dr. Francelino A. Rodrigues Junior.**

Por sus oportunos comentarios ante mis inquietudes. Gracias

### **Al Dr. Joaquín A. Rincón.**

Por la asesoría brindada para el análisis de datos, y su tiempo para la culminación de este trabajo. Gracias.

## **DEDICATORIA**

### **A Dios**

Por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorarte cada día más.

### **A mi esposa Faby y mis dos amados hijos Sergio Abisai y Sergio Josué**

Con tu risa se alivian mis tristezas, con tu amor me olvido de los problemas y contigo a mi lado todo es mejor, mil gracias por estar a mi lado. Recuérdalo siempre, que, si tuviera que volver escoger te escogería a ti nuevamente, te amo mi esposa querida. Que decir de nuestros dos pequeños que llegaron a nuestros corazones, para ustedes dedico esta obra.

### **A mi madre Virginia.**

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

### **A mi padre Sergio.**

Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

### **A mis hermanas.**

Diana, Paulina, Reyna y Mia, por estar conmigo siempre, apoyarme en todo y por ser parte fundamental de mi motivación para salir adelante. Las amo.

### **A mis maestros.**

Por su gran apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales para la elaboración de esta tesis, y por el tiempo compartido

### **A mis amigos.**

Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y por la confianza que me otorgaron para seguir con mi formación académica.

*“Porque lo insensato de Dios es más sabio que los hombres, y lo débil de Dios es más fuerte que los hombres. Pues mirad, hermanos, vuestra vocación, que no sois muchos sabios según la carne, ni muchos poderosos, ni muchos nobles; sino que lo necio del mundo escogió Dios, para avergonzar a los sabios; y lo débil del mundo escogió Dios, para avergonzar a lo fuerte; y lo vil del mundo y lo menospreciado escogió Dios, y lo que no es, para deshacer lo que es, a fin de que nadie se jacte en su presencia”.*

### **1 Corintios 1:25-29**

## CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	v
<b>DEDICATORIA</b> .....	vi
<b>CONTENIDO</b> .....	vii
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	ix
<b>LISTA DE CUADROS EN ANEXOS</b> .....	xi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xii
<b>I. INTRODUCCIÓN GENERAL</b> .....	1
1.1.    Objetivos.....	2
1.1.1.    General.....	2
1.1.2.    Particulares.....	2
1.3.    Hipótesis.....	3
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	4
2.1.    El cultivo de caña de azúcar.....	4
2.2.    La morfología de la caña de azúcar.....	5
2.3.    Etapas de crecimiento.....	7
2.4.    Factores ambientales que influyen en las etapas de crecimiento.....	11
2.6.    Efecto de la fertilización en el crecimiento.....	14
2.7.    Análisis del crecimiento de caña de azúcar.....	16
2.7.1.    Índices de vegetación.....	18
2.7.1.1.    Índice de las diferencias normalizadas (NDVI).....	18
2.7.1.2.    Índice de área foliar (IAF).....	20
2.8.    Modelos de crecimiento de la caña de azúcar.....	21
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	25
3.1.    Sitio experimental.....	25
3.2.    Parcela experimental.....	26
3.3.    Condiciones edáficas.....	27
3.3.1.    Análisis de suelos.....	28
3.4.    Material biológico.....	29
3.5.    Manejo agronómico.....	30
3.6.    Variables de estudio.....	31
3.7.    Análisis estadístico.....	35
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	37



4.1.	Características climáticas durante el crecimiento del cultivo .....	37
4.2.	La fertilidad y humedad de los suelos .....	41
4.3.	Acumulación de biomasa .....	43
4.4.	Evolución del desarrollo del número de tallos, del índice de área foliar (IAF), del índice de vegetación de las diferencias normalizadas (NDVI) y pigmentos fotosintéticos.....	49
4.5.	Relación entre el NDVI, parámetros fisiológicos y de calidad en caña de azúcar	56
4.6.	Calidad del jugo y rendimiento final de caña de azúcar .....	59
4.7.	Relación entre variables climáticas y el NDVI, parámetros fisiológicos y de calidad en caña de azúcar .....	62
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>64</b>
5.1.	Conclusiones .....	64
5.2.	Recomendaciones .....	65
<b>VI.</b>	<b>LITERATURA CITADA</b> .....	<b>66</b>
<b>VII.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>80</b>

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Principales países productores de azúcar en el mundo.....	4
<b>Cuadro 2.</b> Temperaturas base utilizadas para el cálculo de los grados días de crecimiento (GDD) en el cultivo de caña de azúcar. ....	12
<b>Cuadro 3.</b> Datos de las parcelas de caña de azúcar utilizadas en el estudio. ....	27
<b>Cuadro 4.</b> Métodos y unidades de las propiedades fisicoquímicas de los suelos en estudio. ....	29
<b>Cuadro 5.</b> Coordenadas de las estaciones meteorológicas cercanas a las parcelas de caña en estudio. ....	35
<b>Cuadro 6.</b> Análisis de fertilidad de los suelos de las parcelas de caña de azúcar en estudio (0 a 30 cm de profundidad). ....	41
<b>Cuadro 7.</b> Curva de retención de humedad de las parcelas de caña de azúcar en estudio. ....	43
<b>Cuadro 8.</b> Cuadrados medios del ANOVA de variables de crecimiento y acumulación de biomasa de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	44
<b>Cuadro 9.</b> Cuadrados medios del ANOVA de las tasas relativa de crecimiento (TRC) y del cultivo (TCC) de biomasa de tallos de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	48
<b>Cuadro 10.</b> Cuadrados medios del ANOVA de número de tallos, IAF, NDVI y pigmentos fotosintéticos de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	50
<b>Cuadro 11.</b> Correlaciones de Pearson entre NDVI e IAF con biomasa, parámetros fisiológicos y de calidad de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	57
<b>Cuadro 12.</b> Cuadrados medios del ANOVA de parámetros de calidad de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de	

suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. .....	60
<b>Cuadro 13.</b> Medias de Tukey de parámetros de calidad de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.....	60
<b>Cuadro 14.</b> Medias de Tukey de rendimiento final de tallos de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.....	61
<b>Cuadro 15.</b> Correlaciones de Pearson entre variables climáticas, de crecimiento, índices de vegetación y parámetros de calidad de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.....	63

## LISTA DE CUADROS EN ANEXOS

<b>Cuadro A 1.</b> Medias de Tukey de las variables de crecimiento y acumulación de biomasa de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	80
<b>Cuadro A 2.</b> Cuadrados medios del ANOVA de número de tallos, LAI, NDVI y pigmentos fotosintéticos de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	81
<b>Cuadro A 3.</b> Medias de Tukey para número de tallos, LAI, NDVI y pigmentos fotosintéticos de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	82
<b>Cuadro A 4.</b> Medias de Tukey para número de tallos, LAI, NDVI y pigmentos fotosintéticos de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos tipos de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	84
<b>Cuadro A 5.</b> Cuadrados medios del ANOVA de la cobertura de cultivo de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	87
<b>Cuadro A 6.</b> Medias de Tukey para la cobertura de cultivo de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos tipos de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	88

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Morfología de caña de azúcar. Tomado de Salgado <i>et al.</i> (2013a). .....	7
<b>Figura 2.</b> Etapas fenológicas del cultivo de caña de azúcar. Tomado de Benvenuti (2005) y FAO (2006). .....	9
<b>Figura 3.</b> Ubicación espacial del Ingenio Santa Rosalía, parcelas en estudio (en número) y estaciones meteorológicas (círculos color verde). .....	25
<b>Figura 4.</b> Esquema de la distribución de las subparcelas dentro del área experimental, y de los 2 m lineales para la toma de muestras. ....	26
<b>Figura 5.</b> Detalles de las mediciones de las variables: a) diámetro de tallo, b) clorofila, c) biomasa de tallos y d) medición del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI). .....	31
<b>Figura 6.</b> Temperaturas promedio máximas (Tmax), mínimas (Tmin) y medias (Tmed) de las estaciones climatológicas: Arena Sexta, Zapotal y Güiral. ...	37
<b>Figura 7.</b> Humedad relativa promedio (a) y precipitación pluvial acumulada (b) de las estaciones climatológicas cercanas a las parcelas en estudio. ....	39
<b>Figura 8.</b> Déficit de presión de vapor promedio (kPa) durante el ciclo soca de caña de azúcar en las parcelas en estudio. ....	40
<b>Figura 9.</b> Altura de tallo de la variedad CP 72-2086 (a) y Méx 69-290 (b); diámetro de tallo de la variedad CP 72-2086 (c) y Méx 69-290 (d) durante el crecimiento cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. FLeu= Fluvisol eútrico, VReu= Vertisol eútrico. ....	45
<b>Figura 10.</b> Biomasa de tallos de las variedades CP 72-2086 (a) y Méx 69-290 (b); biomasa follaje de las variedades CP 72-2086 (c) y Méx 69-290 (d); y biomasa total de las variedades CP 72-2086 (e) y Méx 69-290 (f) durante el crecimiento cultivadas en dos subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. FLeu = Fluvisol eútrico, VReu = Vertisol eútrico. ....	47
<b>Figura 11.</b> Tasa relativa de crecimiento en función de la variedad y los meses después del corte. ....	48

<b>Figura 12.</b> Tasa de crecimiento del cultivo ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) en las variedades CP 72-2086 y Méx 69-290 en las subunidades de suelo Fluvisol eútrico (FLeu) y Vertisol eútrico (Vreu) del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía. ....	49
<b>Figura 13.</b> Número de tallos de la variedad CP 72-2086 (a) y Méx 69-290 (b) en dos metros lineales durante el crecimiento de la primera soca cultivadas en dos tipos de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	51
<b>Figura 14.</b> Dinámica del índice de área foliar (IAF) de las variedades CP 72-2086 (a) y Méx 69-290 (b) de la primera soca, cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	52
<b>Figura 15.</b> Desarrollo del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) de las variedades CP 72-2086 (a) y Méx 69-290 (b) durante el ciclo soca, cultivadas en las subunidades de suelo Fluvisol eútrico (FLeu) y Vertisol eútrico (Vreu) del área de influe influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	54
<b>Figura 16.</b> Evolución de la concentración de clorofila a (a) y total (b) de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 durante el crecimiento de la primera soca cultivadas en en las subunidades de suelo Fluvisol eútrico (FLeu) y Vertisol eútrico (VReu) del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	55
<b>Figura 17.</b> Modelos ajustados de NDVI y a) altura, b) biomasa de tallos, c) IAF, d) Brix°, e) % pol y f) % pureza de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 a los once meses de edad cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.....	58
<b>Figura 18.</b> Modelos ajustados de IAF y a) altura y b) biomasa de tallos, de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 a los once meses de edad cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. ....	59

**Figura 19.** Rendimiento de tallos de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 a los nueve meses de edad cultivadas en dos subunidades de suelo (Fluvisol éútrico-FLeu y Vertisol éútrico-VReu) del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. .... 62

## I. INTRODUCCIÓN GENERAL

Una forma de conocer los cambios que experimenta un cultivo durante su desarrollo en respuesta a diferentes condiciones ambientales es a través del estudio de su dinámica de crecimiento, que se basa en mediciones secuenciales de la acumulación de biomasa, variables biofísicas y agronómicas como el índice de área foliar (IAF) y las tasas de producción de materia verde y seca (Magalhães, 1985).

En caña de azúcar, una fase fenológica que ha sido ampliamente estudiada es la maduración en los ciclos plantilla, socas y resocas, que depende de una compleja combinación de variables ambientales, del potencial genético de los cultivares y del manejo de los cultivos (Cardozo y Sentelhas *et al.*, 2013). Otras fases fenológicas importantes en caña de azúcar pero menos estudiadas en los ciclos socas y resocas, son las de crecimiento vegetativo y formación de tallos, aspectos que involucran la evolución del crecimiento de la caña de azúcar, donde parámetros como altura de planta, diámetro del tallo, contenido de clorofila, el IAF, las tasas de crecimiento de tallos y la productividad que incluye número y peso de tallos molederos, son información básica necesaria para la predicción del rendimiento usando modelos de crecimiento de un cultivo (Dos Santos *et al.*, 2005; Scarpari y Ferreira de Beauclair, 2009; Gomathi *et al.*, 2013).

En Tabasco, en la región de la Chontalpa, se encuentra el ingenio Santa Rosalía (ISR), el que en los últimos años ha incrementado su superficie cultivada, de 9,038 a 13,012 ha de 2007 a la fecha, y los rendimientos de caña de 41.6 a 60 t ha<sup>-1</sup>, aunque aún son inferiores a la media nacional de 68.7 t ha<sup>-1</sup> (CAÑEROS, 2017).

Entre las principales variedades que ocupan la superficie cultivada en este Ingenio, están dos ampliamente distribuidas a nivel nacional: Méx 69-290 y CP 72-2086. La variedad CP 72-2086, es la principal variedad cultivada de México con una superficie de 212, 678 ha (31%). La Méx 69-290 de ser la variedad principal del ex Instituto Mexicano para la producción de azúcar (MPA), ahora ocupa el segundo lugar en superficie cultivada con 72, 427 ha (26%).

Estas variedades se encuentran cultivadas en diferentes tipos de suelos del área de influencia del ISR, y aunque se han realizado estudios para recomendar dosis de



fertilización por subunidad de suelo para mantener e incrementar la productividad (Salgado-García *et al.*, 2005), no se ha realizado un estudio de la dinámica de crecimiento del cultivo, el cual podría estar afectado además de la fertilidad del suelo, por las condiciones de humedad y ambientales durante el ciclo fenológico del ciclo soca, lo que podría acentuarse por el cambio climático (Zhao y Li, 2015; Mauri *et al.*, 2017). Este estudio permitiría proveer de información más detallada a los tomadores de decisiones sobre la respuesta del crecimiento de una variedad cañera en ciclos que involucran un corte como los de socas o resocas, a un ambiente específico en el tiempo.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. General**

Generar información sobre el crecimiento de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 durante el ciclo soca, en dos subunidades de suelo de la región de la Chontalpa, Tabasco, que sirva de base para aplicaciones de predicción de rendimiento.

### **1.1.2. Particulares**

- a) Determinar la velocidad y acumulación de la biomasa aérea, la evolución del desarrollo del área foliar y de tallos, así como la concentración de pigmentos fotosintéticos de las variedades en estudio en dos subunidades de suelo de producción de caña de azúcar, en función de los grados-días-calor (GDC).
- b) Analizar la relación entre el índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) con las variables de crecimiento y calidad de las variedades en dos subunidades de suelo en estudio.
- c) Determinar la calidad de jugos y el rendimiento final de materia seca de tallos y hojas de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 en dos subunidades de suelo en estudio.
- d) Relacionar los datos de crecimiento y de rendimiento con las variables meteorológicas presentes durante el ciclo fenológico de la caña de azúcar en las dos subunidades de suelo para las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086.

### **1.3. Hipótesis**

Los parámetros biofísicos y fisiológicos del crecimiento, y el rendimiento de las variedades de caña de azúcar Méx 69-290 y CP 72-2086 durante el ciclo soca son afectados diferencialmente por las condiciones edáficas y ambientales presentes en los sitios de producción en estudio.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. El cultivo de caña de azúcar

La caña de azúcar es la principal fuente de azúcar en el mundo. La planta pertenece a la familia de las gramíneas (*Poaceae*) y al género *Saccharum*. A las variedades cultivadas comercialmente se les llaman cañas nobles (Fauconnier y Bassereau, 1975). Presenta un metabolismo C<sub>4</sub>, lo que la hace altamente eficiente en la producción de biomasa (Goatly *et al.*, 1975).

El azúcar se produce en 121 países; del azúcar total, 78% se hace de la caña de azúcar, la cual es cultivada en regiones tropicales y subtropicales del hemisferio meridional, y el resto de la remolacha azucarera que se cultiva principalmente en las zonas templadas del hemisferio norte. En el Cuadro 1 se presentan los países con mayor producción de azúcar en el mundo; se aprecia que México figura como exportador de azúcar (<http://www.fao.org/faostat/es/#data>).

**Cuadro 1.** Principales países productores de azúcar en el mundo.

<b>País</b>	<b>Producción<sup>¶</sup></b> <b>(millones de ton)</b>	<b>Exportación*<sup>¶</sup></b> <b>(millones de ton)</b>	<b>Población<sup>£</sup></b> <b>(millones)</b>	<b>Consumo<sup>£</sup></b> <b>(kg</b> <b>persona<sup>-1</sup>)</b>
Brasil	758.54	5.37 (1)	190	58
India	306.06	1.85 (4)	1 117	20
Unión Europea	207.93	10.0 (2)	490	34
China	113.78	0.21	1 314	11
Tailandia	102.94	3.0 (3)	65	36
Pakistán	73.50	0.78	165	25
Estados Unidos	62.19	0.06	301	29
México	56.95	0.33 (15)	107	52
Australia	36.56	0.13	20	47
Sudáfrica	17.38	0.23	157	22

(#) = Número de rango país exportador. \*Azúcar refinada y azúcar de remolacha. <sup>¶</sup>Fuente: Datos 2017 FAOSTAT (<http://www.fao.org/faostat/es/#data>). <sup>£</sup>Fuente: Salgado *et al.* (2013).

Brasil es el principal productor de azúcar (19.1% de la producción mundial), Estados Unidos es el séptimo productor (5.2%) y México el octavo (3.8%). En México, el valor generado en la producción de azúcar es por más de 3 mil millones de dólares anuales y el 57% se distribuye entre los 164 mil productores de caña. Esta actividad representa el 11.6 del valor del sector primario y el 2.5 del PIB manufacturero. La producción de caña se realiza en 770 mil hectáreas que abastecen a 57 ingenios de 15 estados cañeros. Genera más de 450 mil empleos directos y beneficios directos a más de 2.2 millones de personas. Es una actividad de alto impacto en 227 municipios donde habitan 12 millones de personas y México paga el precio del azúcar más caro (Salgado *et al.*, 2013a).

## **2.2. La morfología de la caña de azúcar**

La caña de azúcar, como parte de la familia Poaceae, presenta tallos especializados para la acumulación de sacarosa (Rae *et al.*, 2014). Morfológicamente está formada por raíces, tallos, hojas e inflorescencias.

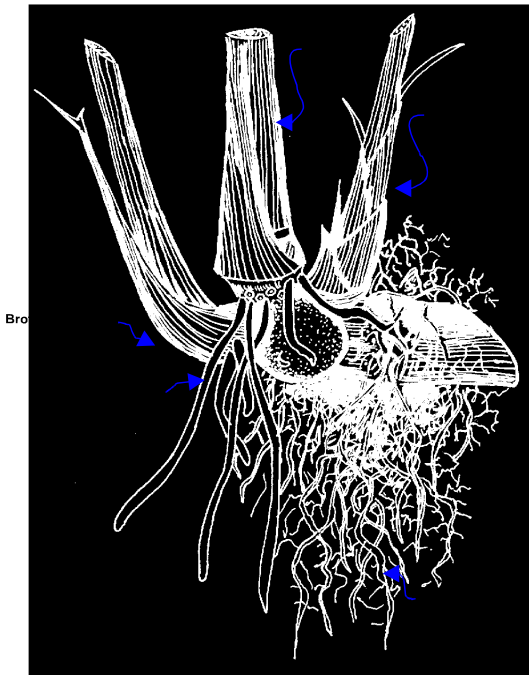
**Las raíces** que conforman el sistema radical del brote se forman durante los primeros 50 a 60 días. En el ciclo plantilla, las raíces que emergen de las fracciones del tallo plantadas son las adventicias, que proporcionan agua y nutrientes, principalmente nitrógeno, a la yema en crecimiento hasta el momento en que se forma el sistema radical del brote (Carneiro *et al.*, 1995). Bal-Coelho *et al.* (1993) indican que no existen diferencias entre la biomasa y longitud de raíces de un ciclo plantilla y un ciclo soca.

**Los tallos** pueden alcanzar una longitud total de 3 hasta 6 m, dependiendo de la variedad, la condición ambiental y de manejo. Están formados por nudos y entrenudos de longitud entre 5 y 25 cm, respectivamente, y hasta de 6 cm de diámetro (Figura 1). Un nuevo nudo se desarrolla aproximadamente cada 20 días. Dado que los tallos son los depósitos donde se almacena el azúcar (Sánchez, 1972), el contenido de azúcares es monitoreado durante la etapa de maduración de la caña, usando la sección 8-10 del tallo para determinar el contenido en °Brix, de otros nutrientes y de humedad. Una humedad excesiva del suelo o el exceso de humedad atmosférica durante periodos de lluvias prolongadas y altas temperaturas

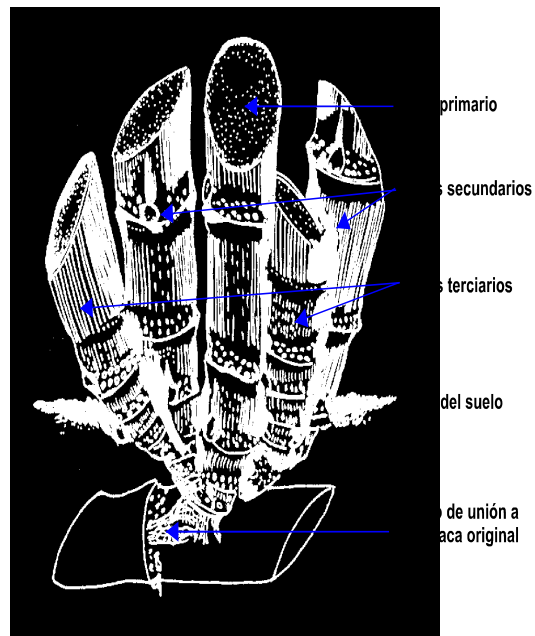
(Sánchez, 1972) puede inducir brotes laterales (conocidos como mamones) lo que afecta el rendimiento en sacarosa.

**Las hojas** se originan de los nudos, en posición alterna, y están formadas por la vaina y el limbo. La vaina es tubular, envolvente, más ancha en su borde (Figura 1). El limbo tiene una nervadura central prominente y los bordes ligeramente dentados. La articulación entre la vaina y el limbo se llama collar y posee lígula y aurículas (Oliveira *et al.*, 2007). El número y tamaño de hojas en el dosel de caña determina el índice de área foliar (IAF), el cual puede alcanzar un valor de 8 de los 6 a 8 meses después de la siembra, para luego descender lentamente. El valor del IAF puede variar por efecto de la variedad y de las condiciones ambientales y de manejo del cultivo. El IAF está directamente relacionado con el rendimiento de caña, ya que determina la extensión del dosel del cultivo, la cantidad de radiación interceptada y el intercambio gaseoso de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, además de ser un factor de ajuste en los modelos de predicción del rendimiento (Sandhu *et al.*, 2012).

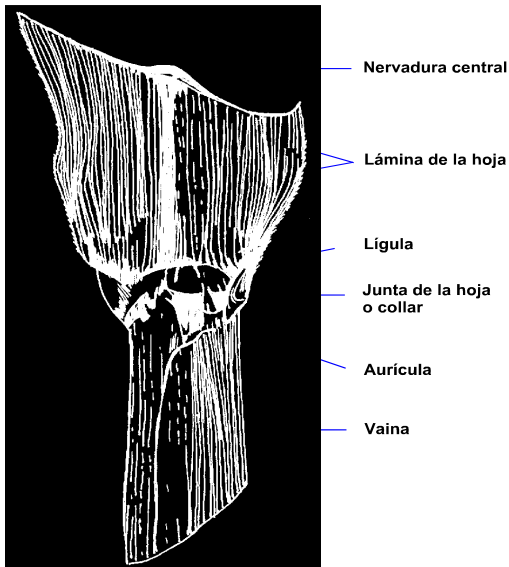
**La inflorescencia** es una panoja ramificada con muchas espiguillas, dispuestas en pares, una sésil y otra pedunculada. La flor es bisexual, posee tres estambres y un sólo óvulo. La semilla es muy pequeña, una inflorescencia contiene alrededor de 2000 g. La polinización es anemófila. La floración es abundante entre el ecuador y 21°C de latitud. En los cultivos comerciales de caña, el desarrollo de la inflorescencia resulta contraproducente para la rentabilidad económica, por lo que los programas de selección tienden a descartar las variedades que presentan abundante floración (Romero, 2009). La inducción floral es utilizada en el mejoramiento genético de la caña de azúcar, para poder sincronizar la floración entre genotipos y realizar cruzamientos. En México, los cruzamientos se realizan en la Estación de Hibridación de Tuxtla Chico en Tapachula, Chiapas; donde se tiene el Programa Nacional de Variedades (Salgado *et al.*, 2013a). La caña de azúcar es una planta alógama que tolera la autofecundación. Todas las especies del género *Saccharum* son poliploides. Los clones de *S. officinarum* poseen 80 cromosomas (2n=80) y en los de *S. spontaneum*, el número cromosómico varía entre 40 a 120. (Feldman *et al.*, 1997).



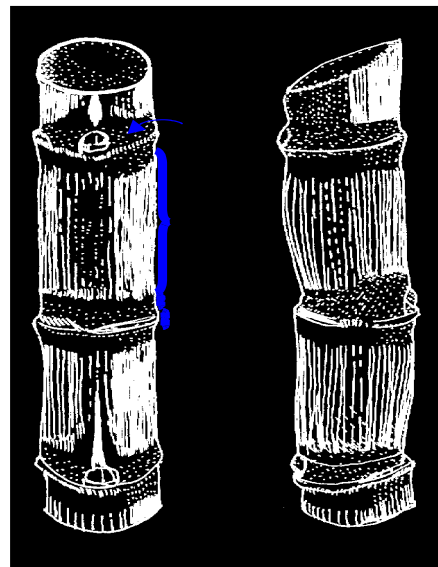
a) Sistema radicular



b) Macolla



c) Estructura de la hoja



d) Tallo

**Figura 1.** Morfología de caña de azúcar. Tomado de Salgado *et al.* (2013a).

### 2.3. Etapas de crecimiento

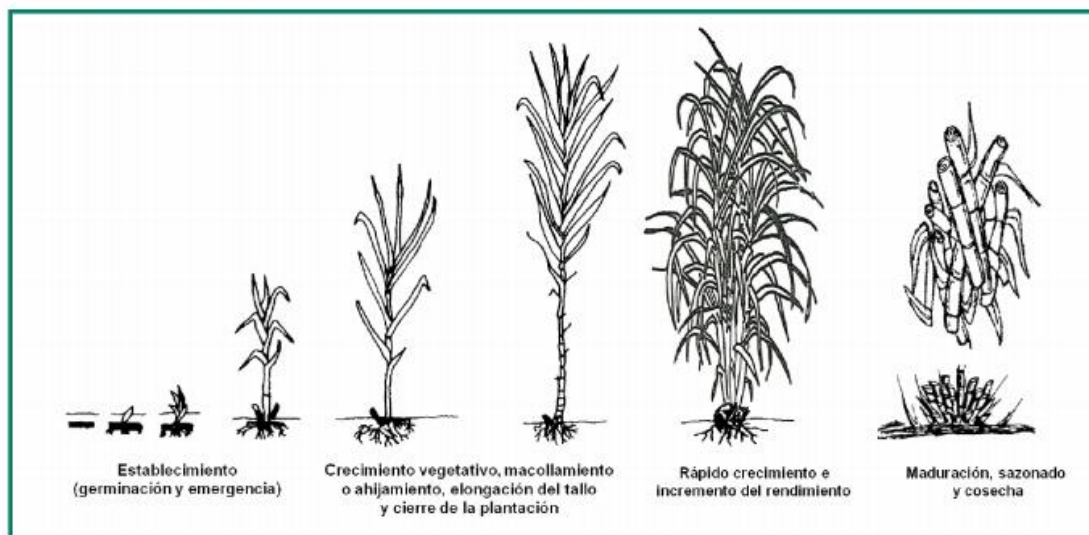
El ciclo vegetativo de la caña desde el punto de vista agronómico comprende tres etapas, cada una con duración de 5 a 6 meses en ciclos de plantilla y de 4 a 5 meses

en socas. Sin embargo, estas etapas no son necesariamente de la misma duración, pues están influenciadas por la fecha de siembra en las plantillas o de corte en las socas, por la humedad del suelo, la temperatura, la insolación, la fertilidad del suelo y las prácticas de cultivo (González *et al.*, 1974). No obstante, el crecimiento vegetativo se puede controlar parcialmente y la producción de azúcar manipular, conociendo el efecto de condiciones climáticas y de manejo sobre el crecimiento y rendimiento de la caña de azúcar (Hunsigi, 2001).

La caña de azúcar tiene esencialmente cuatro fases de crecimiento (Figura 2): a) fase de establecimiento, la cual implica germinación y emergencia, ya sea en plantación (plantillas) o en rebrote (socas y resocas); b) fase de ahijamiento, formativa o reposo fisiológico; c) fase de crecimiento rápido; y d) fase de maduración y cosecha (Benvenuti, 2005). Según este autor las fases pueden describirse como:

**a) Establecimiento (germinación y emergencia 30-50 días).** La germinación es el inicio del crecimiento a partir de los meristemos presentes en los tallos plantados (esquejes) o en los que quedan en pie después de la cosecha del cultivo anterior. Esta fase requiere humedad en el suelo para mantener un contenido relativo de agua en la planta superior al 85%, además del control de malezas para lograr una abundante población de cepas vigorosas (González *et al.*, 1974; Barbieri, 1993).

La edad y calidad de la semilla o del esqueje, la época de siembra, y las condiciones ambientales son factores esenciales para una buena germinación. Un esqueje de buena calidad debe tener un buen estado hídrico, alto nivel de azúcares y de otros nutrientes, y yemas hidratadas, entre otras condiciones. La temperatura ambiental y la humedad del suelo son dos condiciones que inciden en la emergencia, en el desarrollo foliar y en la producción, por lo que la selección de la época de siembra de acuerdo a la región es un factor importante (Romero, 2009).



**Figura 2.** Etapas fenológicas del cultivo de caña de azúcar. Tomado de Benvenuti (2005) y FAO (2006).

**b) Crecimiento vegetativo: ahijamiento, amacollado, elongación del tallo y cierre de la plantación (50-70 días).** Es una etapa muy sensible a cualquier déficit de agua y a las deficiencias nutrimentales, por lo que requiere fertilización y humedad adecuada. La ramificación subterránea múltiple, que se origina a partir de los meristemos localizados en los nudos del tallo primario (esqueje) da origen al ahijamiento. Este proceso fisiológico le da al cultivo un número adecuado de tallos y hojas activas, que aunado a la variedad, la cantidad de radiación incidente, la temperatura, la humedad del suelo y las prácticas de fertilización, espaciamiento y control de arvenses, permiten obtener un buen rendimiento (Barbieri, 1993). El mismo autor menciona que los hijuelos o retoños que se forman primero dan origen a tallos más gruesos y pesados. Los retoños formados más tarde mueren o se quedan cortos o inmaduros. La elongación de los tallos formados es inicialmente rápida, presentan un elevado contenido de fibra, y bajo de sacarosa. La temperatura cercana a 30°C es considerada como óptima para el ahijamiento (Fauconnier y Basserau, 1975).

**c) Crecimiento rápido e incremento del rendimiento (180-220 días).** En esta fase se determinan la formación y elongación real de la caña y su rendimiento,



comprende desde el cierre del dosel hasta el inicio del periodo de madurez de los tallos. El número de retoños se estabiliza y de todos los retoños formados, sólo el 40 al 50 % sobrevive y llega a formar cañas molederas. Los tallos presentan un crecimiento rápido con la formación de 4 a 5 nudos por mes, así como de hojas hasta alcanzar un índice de área foliar de 6 a 7 (Barbieri, 1993). Este incremento en crecimiento de los tallos, así como del número de tallos por área lleva al incremento en biomasa. Durante esta etapa de rápido crecimiento es esencial asegurar una humedad adecuada del suelo para que el sistema radical se desarrolle y pueda absorber los nutrimentos.

**d) Maduración y sazonado (60-140 días).** Esta fase inicia alrededor de dos a tres meses antes de la cosecha para cultivos con ciclo de 12 meses, y de los 12 a los 16 meses de edad para los que completan el ciclo en 18 a 24 meses. Durante esta fase los tallos maduran de la base hacia el ápice, por lo que la acumulación de sacarosa y reducción de azúcares reductores sigue este mismo patrón. Sin embargo, para que la maduración ocurra y se detenga el crecimiento, se requiere un bajo contenido de humedad y de nitrógeno en el suelo. En caso de cultivos en riego, éste debe ser detenido (Mello *et al.*, 2006).

**e) Cosecha.** La caña de azúcar es cosechada mediante un corte en la base del tallo, el cual se hace de forma manual o mecánica; la paja se elimina manualmente o es quemada previo a la cosecha; la cual se realiza antes de la floración (12 a 18 meses después de la siembra), debido a que la floración conduce a la reducción en el contenido de azúcar en los tallos (Humbert, 1974; Fauconnier y Basserau, 1975; Dillewijn, 1978). Actualmente la cosecha en verde, es privilegiada debido a la menor contaminación ambiental que produce.

## 2.4. Factores ambientales que influyen en las etapas de crecimiento

Los principales componentes climáticos que controlan el crecimiento, el rendimiento y la calidad de la caña de azúcar son: la temperatura, la radiación solar y la disponibilidad de humedad en el suelo.

**La temperatura:** El crecimiento de la caña de azúcar está estrechamente relacionada a la temperatura y a su acumulación durante el ciclo. Se han encontrado relaciones lineales entre la temperatura promedio diaria, la tasa de elongación y engrosado de tallos (CENICAÑA, 1990). La temperatura óptima para la germinación de las yemas es entre 32 y 38°C, la germinación decrece por debajo de 25°C, y se reduce por encima de 35°C. Temperaturas por encima de 38°C reducen la tasa fotosintética e incrementan la tasa de respiración. Sin embargo, para la maduración, bajas temperaturas en el rango 12° a 14°C son deseables, dado que esto, tiene una influencia en reducir el crecimiento vegetativo e incrementar la concentración de sacarosa en los tallos (Váldez *et al.*, 2009).

Dada la importancia de la temperatura en el crecimiento de los cultivos, el crecimiento de un cultivo puede medirse en función del tiempo termal o días calor o grados días de crecimiento (GDD por sus siglas en inglés, tiempo termal en unidades de 1°C días acumulado desde siembra). Para el cálculo de los GDD se requiere conocer la temperatura base de crecimiento de un cultivo. Esta temperatura base es la temperatura a la cual no se detecta crecimiento. En caña de azúcar, la temperatura base varía de 8 a 20°C, dependiendo si se mide el crecimiento de hojas o de tallos (Keating *et al.*, 1999; Scarpari y Ferreira de Beauclair, 2004; Castro-Nava *et al.*, 2016; Baez-González *et al.*, 2017) (Cuadro 2). Para caña de azúcar la cosecha se realiza entre un mínimo y un máximo de días Julianos, o cuando los GDD alcanzan los GDD a madurez (Cuadra *et al.*, 2012).

**La radiación solar:** La caña de azúcar es un cultivo que requiere alta irradiación para su óptimo crecimiento, por lo que crece y se desarrolla bien en áreas que reciben energía solar entre 18 y 36 MJ m<sup>-2</sup>. El metabolismo de carbono de la caña de azúcar es del tipo C<sub>4</sub>, por lo que tiene altas tasas fotosintéticas (hasta 45 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> al mediodía), aunque estas pueden cambiar con los cambios en la

radiación fotosintéticamente activa incidente (PAR por sus siglas en inglés); y si el punto de saturación es elevado con relación a la intensidad luminosa.

**Cuadro 2.** Temperaturas base utilizadas para el cálculo de los grados días de crecimiento (GDD) en el cultivo de caña de azúcar.

Temperatura base	Variedad	Referencia
15°C y 18°C	SP83-2847	Cuadra <i>et al.</i> , 2012
12°C	NCo376; SV	Inman-Bamber, 1994; Jimenez-Cordova <i>et al.</i> , 2004
18°C	CB 47-355	Teruel <i>et al.</i> , 1997; Bacchi y Souza, 1978; Lofton <i>et al.</i> , 2012
8 y 15°C	SP83-2847	Keating <i>et al.</i> , 1999; Marin y Jones, 2014
12°C	NCo376	Allison <i>et al.</i> , 2007
12°C ahijamiento 16°C amacollamiento 18-19°C elongación de entrenudos 8°C ciclo completo	-----	Cardozo y Sentelhas, 2013
Mínima 11°C y máxima 32°C	CP 72-2086	Baez-Gonzalez <i>et al.</i> , 2017

Dentro del metabolismo C<sub>4</sub>, la caña de azúcar presenta el subtipo NADP-ME, aunque hay evidencias que también trabaja con el tipo PEPCK, similar al maíz, que usa la ruta PEPCK para catalizar la regeneración de oxaloacetato en el citosol. Bajo condiciones naturales, la tasa fotosintética de 8 am a 4 pm, se relaciona directamente con la variación en la PAR diurna, debido a que las enzimas que participan en el proceso fotosintético son reguladas por la luz (Pereira de Souza y Buckeridge, 2014).

La intensidad y la duración de las horas de brillo solar afectan el amacollamiento (CENICAÑA, 1990). Altas intensidades de luz y larga duración del brillo solar promueven el amacollamiento, mientras que días nublados y cortos lo afectan negativamente. El crecimiento de los tallos se incrementa cuando la luz del día dura

entre 10 a 14 h. El incremento en índice de área foliar es rápido durante el tercer y quinto mes, coincidiendo con la fase de desarrollo del cultivo (Váldez *et al.*, 2009). Cuando una alta disponibilidad de PAR se da a nivel del estrato inferior en la variedad IACSP95-3028 causa aumento de la fotosíntesis y del crecimiento vegetativo de la planta (mayor número de tallos y acumulación de biomasa de hojas y tallos) por incrementos del área foliar (Marchiori *et al.*, 2010).

**La precipitación:** Un total de lluvia anual entre 1100 a 1500 mm bien distribuida en los meses de crecimiento vegetativo, seguido por un periodo seco durante la maduración es adecuado (Váldez *et al.*, 2009). La caña de azúcar es muy eficiente en el uso de agua, pero en condiciones de déficit hídrico reduce drásticamente su tasa de fotosíntesis, la tasa de crecimiento, el área foliar, presenta cierre estomatal, senescencia y abscisión de hojas y la expresión de genes relacionados con el estrés (Pereira de Souza y Buckeridge, 2014).

**Humedad relativa:** Durante el período de crecimiento rápido, las condiciones de alta humedad (80-85%) favorecen una elongación rápida de la caña. En contraste, valores moderados, de 45-65%, acompañados de una disponibilidad limitada de agua, son beneficiosos durante la fase de maduración (Inman-Bamber y Smith, 2005).

## **2.5. Condiciones edáficas**

La caña de azúcar puede ser cultivada exitosamente en diversos tipos de suelo, desde los arenosos a los franco-arcillosos y arcillosos. Las condiciones edáficas ideales para el cultivo de la caña de azúcar son: suelo bien drenado, profundo, de textura franca, con una densidad aparente de 1.1 a 1.2 g cm<sup>-3</sup>, con un adecuado equilibrio entre los poros de distintos tamaños, con porosidad total superior al 50%; una capa freática por debajo de 1.5 a 2 m de profundidad y una capacidad de retención de la humedad disponible del 15% o superior (cm<sup>3</sup> de agua por cm<sup>3</sup> de suelo). El pH óptimo del suelo es cercano a 6.5, pero la caña de azúcar puede tolerar un rango considerable de acidez y alcalinidad. Por esta razón se cultiva caña de azúcar en suelos con pH entre 5.0 y 8.5. El encalado es necesario cuando el pH es inferior a 5.0, y la aplicación de yeso es necesaria cuando el pH sobrepasa 9.5 (Barbieri, 1993).

En Tabasco, se han realizado estudios detallados de suelo de las áreas de influencia de los ingenios Santa Rosalía (Salgado-García *et al.*, 2005), Azsuremex (Salgado-García *et al.*, 2010) y Presidente Benito Juárez (Salgado-García *et al.*, 2011). Para el Ingenio Santa Rosalía, los subtipos de suelos presentes en el área de abastecimiento son Fluvisol éutrico, Fluvisol eutri-gléyico, Gleysol éutrico, Gleysol mólico, Vertisol éutrico, y Vertisol pélico. El análisis de la fertilidad establece que los factores limitantes son arcilla, humedad, acidez y deficiencias de P, K y Zn. En el Ingenio Azsuremex, la caña de azúcar se cultiva en 12 subunidades: Calcisol hipocálcico (Rúptico), Calcisol hipocálcico (Límico), Cambisol háplico (Límico, Éutrico, Arcillico), Cambisol endogleyico vértico (Arcillico, Éutrico), Cambisol vértico (Arcillico, Éutrico), Fluvisol háplico (Arcillico, Éutrico), Leptosol mólico gléyico (Hiperesquelético, Húmico), Leptosol réndzico (Húmico), Luvisol cutánico (Arcillico, Hipéeutrico), Luvisol cutánico (Férrico, Hiperéutrico), Luvisol gléyico vértico (Arcillico), y Vertisol estágnico (Pélico, Éutrico). El diagnóstico de la fertilidad de las 12 subunidades indicó que los suelos del área de abastecimiento del ingenio son de mediana fertilidad y los factores limitantes de la producción son contenido de arcilla, humedad, acidez y deficiencias de P, K, Cu, Zn y B. Los suelos dominantes del área cañera del Ingenio Presidente Benito Juárez son Vertisoles (45.50%), Cambisoles (38.55%), y Gleysoles (13.84%). Dentro de éstos se identificaron las subunidades Cambisol flúvico, Cambisol endogleyico, Cambisol estágnico, Gleysol háplico, Vertisol estágnico, y Vertisol pélico.

Para cada subunidad de suelo, se han definido dosis de fertilización a través del modelo conceptual. Para el Ingenio Santa Rosalía se establecieron 14 dosis de fertilización (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O en kg ha<sup>-1</sup>): 130-80-60, 150-60-60, 160-80-60 para los Fluvisoles éutricos con pH ácido, neutro y alcalino; 130-60-80, 140- 80-80, 160-80-80 para los Fluvisoles éutri-gleyicos con pH ácido, neutro y alcalino, respectivamente; 120-60-60 para el Gleysol éutrico con pH ácido y neutro; 140-60-80 para el Gleysol mólico; 160-60-60 y 160-80-80 para el Vertisol éutrico de pH ácido, y neutro (Salgado-García *et al.*, 2005).

## **2.6. Efecto de la fertilización en el crecimiento**

Se ha observado que dosis altas de N ( $120 \text{ kg ha}^{-1}$ ) incrementan la biomasa aérea, radical y la materia seca total y de tallos de caña de azúcar en 56, 37, 53 y 56 %, respectivamente, cuando se compara con el tratamiento sin adición de N. Dosis bajas de N (0 and  $40 \text{ kg ha}^{-1}$ ) producen una mayor relación raíz: tallo. Con dosis de  $120 \text{ kg N ha}^{-1}$  no se afectan los parámetros de calidad como °Brix, contenido de fibra y sacarosa en jugo. Esta dosis incrementa la producción de azúcar al incrementar la producción de tallos (Bologna-Campbell *et al.*, 2013).

Estos incrementos en biomasa son debido al efecto del nitrógeno en los parámetros fisiológicos de la caña de azúcar. En la zona seca de Sri Lanka se estudiaron el índice de área foliar, la radiación fotosintéticamente activa, la eficiencia de uso de radiación, la producción de materia seca total, el reparto de la biomasa en los órganos de demanda, el contenido de nitrógeno foliar, el contenido de clorofila y la tasa de fotosíntesis. La aplicación de fertilizante nitrogenado influyó positivamente en todos los parámetros medidos bajo condiciones de campo. El índice de área foliar fue menor en SL8306 sin tratamiento con nitrógeno. La falta de aplicación de nitrógeno provocó una reducción de 28, 18, 28, 10 y 13% en el índice de área foliar, la tasa de fotosíntesis, el contenido de nitrógeno foliar, el contenido de clorofila y la repartición de biomasa, respectivamente (Kumara y Bandara, 2001).

La fertilización orgánica también modifica positivamente los parámetros fisiológicos en caña de azúcar. El área foliar, tasa de crecimiento del cultivo (TCC), altura de la caña, número de entrenudos, volumen de caña ( $0.141 \text{ m}^3$ ) y rendimiento de caña ( $126.5 \text{ t ha}^{-1}$ ) se incrementan con fertilización orgánica (Sharanappa *et al.*, 2015). Estos autores probaron cinco sistemas de suministro de nutrientes para evaluar la respuesta de tres genotipos de caña de azúcar recién liberados (CoSnk 07103, CoSnk 05104 y Co 92005). Estos sistemas fueron 1) N1: 100% orgánico a través de 1/3 cada uno de estiércol de granja (FYM), vermicompost estiércol verde de cáñamo solar (IGM) equivalente a 100% N; 2) N2: 100% orgánico a través de 1/3 de cada uno de FYM, VC y barro de prensa enriquecido (EPM) equivalente a RDN; 3) N3: 100% VC, IGM y EPM equivalentes a RDN; 4) N4: 100% inorgánico a través de fertilizantes químicos ( $250: 75: 190 \text{ kg N: P}_2\text{O}_5: \text{K}_2\text{O ha}^{-1}$ , respectivamente) y, 5) N5: RPP (Prácticas orgánicas recomendadas según el paquete de prácticas). Se

encontró que el genotipo CoSnk 05104 (G2) registró mayor área foliar, índice de área foliar, duración de área foliar, tasa relativa de crecimiento, tasa de asimilación neta, altura de la caña, longitud internodal, diámetro de la caña, volumen de caña ( $0.164 \text{ m}^3$ ) y rendimiento de caña ( $129.9 \text{ t ha}^{-1}$ ) en comparación con los otros genotipos. Mientras que el valor de la clorofila SPAD en Co 92005 (G3) fue mayor que en los otros genotipos. Entre las prácticas de manejo de nutrientes orgánicos, la RPP registró significativamente mayores valores que los otros tratamientos.

## **2.7. Análisis del crecimiento de caña de azúcar**

El crecimiento se define como un incremento irreversible en el tamaño de las plantas el cual es acompañado por cambios en los procesos de morfogénesis y diferenciación celular (Hunt, 1981; Hunt *et al.*, 2002). El crecimiento de los diferentes órganos de las plantas, es un proceso fisiológico complejo, que depende directamente de la fotosíntesis, la respiración, la división celular, la elongación, la diferenciación, entre otros, y que además está influenciado por factores como temperatura, intensidad de luz, densidad de población, calidad de la semilla, disponibilidad de agua y de nutrimentos. Un primer nivel de estudio del crecimiento de las plantas, se centra en el aumento de materia seca en el tiempo (Blanco *et al.*, 2003). Los principales índices de crecimiento son la tasa relativa de crecimiento (TRC), el índice de área foliar (IAF), la tasa de asimilación neta (TAN), la duración del área foliar (DAF) y la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), los que a menudo son usados para diferenciar la respuesta de genotipos a diferentes tratamientos (Hunt *et al.*, 2002).

En caña de azúcar para el estudio de la dinámica de crecimiento, los índices de crecimiento en función de los días calendario o tiempo termal, han sido analizados usando análisis de regresión múltiple y lineal para correlacionar variables agronómicas (IAF y número de plantas por  $\text{m}^2$ ) con la biomasa y productividad (Poorter y Granier, 1996). En la variedad SP80-1842 en cuarta y quinta soca, con ocho fechas de monitoreo en surcos de 2 m, el modelo de Gompertz, una curva sigmoideal, fue el que mejor ajuste tuvo para biomasa total y rendimiento en relación a los días de corte ( $r^2 = 0.8987$  y  $r^2 = 0.9682$ , respectivamente). El número de plantas

y el IAF presentaron mejor ajuste con un modelo cúbico exponencial y un modelo cuadrático exponencial, respectivamente. La biomasa total y la productividad de caña se correlacionaron bien con IAF durante las primeras dos etapas del ciclo de caña de azúcar usando regresión lineal. Al final del ciclo, la biomasa total y la productividad de caña estuvieron más relacionadas al número de plantas (Dos Santos *et al.*, 2005). Los autores concluyen que el uso de modelos de regresión para estimar la biomasa y la productividad en caña de azúcar, usando el IAF y número de plantas por m<sup>2</sup>, necesita mejorarse con la introducción de otras variables derivadas del suelo y datos de sensores remotos para su uso en predicción de rendimientos.

También esta dinámica de crecimiento de la caña de azúcar puede obtenerse mediante modelos biofísicos en los que se mide la fotosíntesis bruta (GP) en función de la radiación solar. Entre las variables que han mostrado un efecto directo en las tasas de crecimiento de caña de azúcar se encuentra la radiación fotosintéticamente activa interceptada (PAR<sub>in</sub>) y la fertilización. Bajo riego se ha observado que la variedad RB92579 muestra altos rendimientos de biomasa, así como una mayor PAR<sub>in</sub> y GP acumulada en el ciclo debido a su mayor capacidad de rebrote y conversión de energía solar en fotoasimilados (Ferreira *et al.*, 2012). También que la relación lineal entre la acumulación de PAR<sub>in</sub> y la acumulación de biomasa se desacopla en algún momento, con una disminución del 21%. Esta desaceleración en el crecimiento se conoce comúnmente como el fenómeno de crecimiento reducido (RGP por sus siglas en inglés). En ciertos casos, este fenómeno parece estar relacionado con el momento de inicio y cosecha del cultivo. Los cultivos de caña de azúcar iniciados en verano no siempre reanudan las tasas de crecimiento esperadas después de la transición del invierno a la primavera, a pesar de que las condiciones son favorables para un crecimiento vigoroso. Del mismo modo, se ha observado que la temperatura no puede explicar el crecimiento reducido, ya que las tasas siguen siendo bajas a pesar de la aparición de condiciones favorables en la primavera. Por el contrario, la disminución del nitrógeno foliar específico, la iniciación potencial de la inhibición de la fotosíntesis y la elevación de las tasas de mantenimiento de la respiración que se producen durante el desarrollo y maduración



de la caña de azúcar, parecen ser factores que contribuyen a las RGP (Van Heerden *et al.*, 2010).

También se han usado modelos de predicción de calidad para estimar la productividad durante la cosecha, lo que aumenta la eficiencia de las decisiones estratégicas y administrativas. Se desarrolló un modelo para predecir Azúcares Recuperables Totales (TRS por sus siglas en inglés) por medio de regresiones múltiples, durante la cosecha, usando datos relacionados con factores de producción tales como el almacenamiento de agua en el suelo y días con grados negativos. Se analizó la base de datos de un ingenio azucarero para las temporadas de cultivo 1999/2000, 2000/2001 y 2001/2002, y se probaron modelos estadísticos para estimar la materia prima. En base a la prueba de chi-cuadrada se probaron los datos simulados contra los observados, no encontrando significancia entre estos. El modelo de madurez para caña de azúcar de un año demostró ser significativo, con un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.7049$  (Scarpari y Ferreira de Beauclair, 2004).

## **2.7.1. Índices de vegetación**

### **2.7.1.1. Índice de las diferencias normalizadas (NDVI)**

Los índices de vegetación son algoritmos destinados a simplificar los datos de múltiples bandas de reflectancia del dosel a un solo valor, que se correlaciona con los parámetros físicos de la vegetación (como la biomasa, la productividad, el índice de área foliar o el porcentaje de cobertura vegetal del suelo) (Tucker, 1979). Estos índices de vegetación se basan en las características espectrales únicas de una vegetación verde sobre las longitudes de onda visibles a infrarrojas.

Los dos pigmentos fotosintéticos principales presentes en las hojas son la clorofila a y b, que representan el 65% del total de los pigmentos de las hojas de las plantas superiores. Las bandas de absorción principales de estos pigmentos están en las longitudes de onda azul (450 nm) y en rojo (670 nm), por lo que la reflectancia se da en la banda amarillo-verde (550 nm). Sin embargo, en el dominio del espectro infrarrojo cercano (700-1300 nm), la estructura de la hoja explica las propiedades ópticas. A estas longitudes de onda, la absorción de los pigmentos fotosintéticos es muy pequeña (10% máximo), pero no la reflectancia y transmitancia de la hoja, que

puede alcanzar el 50% (Rahman *et al.*, 2004). El índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI) es representativo de los diversos índices de vegetación espectral (Rouse *et al.*, 1974). NDVI es el índice de vegetación tradicional utilizado por los investigadores para determinar la abundancia de vegetación a partir de datos de detección remota en el espectro del infrarrojo (Tucker, 1979). Divide la diferencia entre los valores de reflectancia en las longitudes de onda visible roja e infrarroja cercana por la reflectancia general en esas longitudes de onda para dar una estimación de la abundancia de vegetación verde. En esencia, el algoritmo aísla el aumento dramático en la reflectancia sobre las longitudes de onda visibles del rojo al infrarrojo cercano, y lo normaliza dividiéndolo por el brillo general de cada píxel en esas longitudes de onda y se calcula:  $NDVI = \frac{(NIR-VIS)}{(NIR+VIS)}$ , donde NIR = reflectancia en la banda de infrarrojo cercano (Band4) y VIS = reflectancia en la banda roja (visible) (Band3) (Rahman *et al.*, 2004). Los principales factores que originan variaciones en el NDVI son la cantidad de vegetación (generalmente expresada por IAF) y el color de las hojas. Bégué *et al.* (2010) dividiendo un conjunto de datos experimentales en dos conjuntos de datos, uno correspondiente a la fase de crecimiento y el otro correspondiente a la fase de maduración de caña de azúcar, confirmaron que, durante la etapa de crecimiento, las variaciones en el NDVI se explicaron principalmente por las variaciones en el IAF, y que, durante la fase de maduración, las variaciones en el NDVI se explicaron principalmente por los cambios en el color de las hojas. El período de transición entre estas dos etapas correspondió al máximo NDVI.

En caña de azúcar, el NDVI se ha usado para supervisar las condiciones del dosel y como instrumento de evaluación rápida del estado de vigor vegetal del cultivo en un momento determinado, lo que ha permitido observar la variabilidad temporal que determina la interacción del cultivo con otros factores agroclimáticos y, así modelar la productividad (Aguilar *et al.*, 2010). Simões *et al.* (2005a) observaron alta correlación (>0.79) entre variables espectrales B3 (banda roja), la relación índice de vegetación (RIV), NDVI y el índice de vegetación ajustado al suelo (IVAS) con rendimiento de caña y número de tallos por metro (NPM). Estos autores usaron espectroscopía de campo con bandas equivalentes a Landsat ETM+. Los mejores

modelos de regresión se verificaron para RIV, IAF y NPM, lo que explicó el 97% de la variación de rendimiento y el 99% de la variación total de la biomasa de caña. Utilizando el sensor de cultivo GreenSeeker® para medir el NDVI en caña de azúcar, Jurecka *et al.* (2016) encontraron correlaciones de 0.61 y 0.72 con el rendimiento. Este sensor también se ha usado para estimar el rendimiento potencial de caña de azúcar. En St. Gabriel y Jeanerette, LA, EE. UU usando el sensor portátil GreenSeeker® de 2008 a 2011, Lofton *et al.* (2012) determinaron que el momento óptimo para estimar el rendimiento de la caña de azúcar fue entre 601–750 GDD. En el estado de São Paulo, Brasil, utilizando métricas derivadas de series temporales de NDVI con el sensor de espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) y un modelo de conjunto de redes neuronales artificiales (ANNs) se estimó el rendimiento de la caña de azúcar. Con el rendimiento estimado, el error cuadrático medio relativo (RRMSE) fue del 6.8% y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.61 (Fernandes *et al.*, 2017). En otras gramíneas como el maíz, el NDVI ha mostrado tener una alta correlación con el rendimiento de grano ( $R^2$  de 0.76) y con la curva de progreso de las enfermedades *Phyllachora maydis* y *Monographella maydis* ( $R^2$  de 0.90) cuando se cultiva sin tratamiento fúngico (Loladze *et al.*, 2019). El uso de imágenes hiperespectrales en el aire, de alta resolución, ha mostrado su potencial para capturar la variabilidad en campo del rendimiento y el contenido de proteína del grano en dos siembras comerciales de trigo duro del Valle del Yaqui (noroeste de México). Se encontró que el uso de índices de vegetación acumulados no muestran una mejora significativa en las correlaciones con el contenido de proteína del grano en comparación con los índices de vegetación individuales (Rodrigues *et al.*, 2018).

#### **2.7.1.2. Índice de área foliar (IAF)**

El comportamiento espectral de la caña de azúcar también se ve afectado por diferentes parámetros fisiológicos. El más importante de estos factores es el índice de área foliar (IAF) que indica la cantidad de área foliar presente por área de terreno. Un dosel con alto IAF refleja mucho más que un dosel con un IAF medio o bajo (Simões *et al.*, 2005b, Fortes y Demattê, 2006). Sin embargo, un dosel con un IAF

alto también puede reducir la eficiencia de la planta para interceptar la radiación de luz que llega a las hojas maduras más viejas del tallo, acelerando su senescencia (Tejera *et al.*, 2007), donde la arquitectura de las hojas podría influir.

La planta de caña generalmente requiere de 10 a 12 meses para alcanzar la madurez. En general, el máximo IAF se logra aproximadamente seis meses después de la siembra y luego disminuye lentamente, pero esto puede verse afectado tanto por la variedad de caña de azúcar como por la condición de crecimiento. La mayor parte de la luz (radiación solar) en un dosel cerrado es interceptada por las seis hojas superiores completamente expandidas en el cultivo. El número de hojas verdes en un tallo varía entre 6 y 12, y se mantienen menos hojas durante condiciones secas o frías. Las tres hojas superiores completamente abiertas de casi todos los cultivares de caña tienden a estar erectas, pero caen más o menos en las puntas. Las hojas más viejas pueden ser erectas o caídas (planofilo) dependiendo de la variedad y las condiciones ambientales (Evans, 1975).

El IAF también se ha usado para estimar el rendimiento de caña de azúcar a escala parcelaria (Verma *et al.*, 2019). Las mediciones de IAF sobre la parcela de caña fueron tomadas con el instrumento Ceptómetro Accupar LP-80. Se observó una fuerte relación exponencial ( $R^2 = 0.861$ ) entre el IAF medido en el suelo y el sensor NDVI LISS-IV. El modelo de rendimiento se desarrolló utilizando un análisis de regresión entre datos de rendimiento por parcela y datos IAF LISS-IV. Se ha encontrado que este modelo de rendimiento empírico proporciona una indicación razonablemente justa ( $R^2 = 0.714$ ) del rendimiento esperado de la caña de azúcar. Da Silva *et al.* (2017) observaron que la variedad de caña de azúcar RB92579 que presentó el IAF más alto (4.46) también tuvo la mayor biomasa seca en el ciclo plantilla.

## **2.8. Modelos de crecimiento de la caña de azúcar**

Los modelos que simulan el crecimiento y desarrollo de la caña de azúcar usando procesos basados en algoritmos incluyen variables fenológicas, de desarrollo del dosel, la producción de tallos, la acumulación y distribución de la biomasa, el crecimiento de las raíces y el estrés hídrico (Marin y Jones, 2014). A nivel mundial

existen varios modelos para simular el crecimiento para caña de azúcar (Jones *et al.*, 1989; Inman-Bamber, 1991; Smith *et al.*, 2005; Singels *et al.*, 2013; Marin y Jones, 2014).

Recientemente, Marin y Jones (2014) desarrollaron y evaluaron un modelo basado en un proceso simple de caña de azúcar acoplado a un modelo de calibración de rutina, donde las aproximaciones clásicas de los modelos de crecimiento fueron usadas como base para fijar algoritmos y simular la acumulación de sacarosa y el desarrollo de la hoja. El modelo evaluó datos de cinco épocas de crecimiento en cuatro localidades de Brasil, manejados bajo igual suministro de nutrientes y control de malezas. Los modelos de predicción fueron evaluados usando datos medidos del IAF, biomasa seca de tallos y hojas, número de tallos por unidad de área, número de hojas verdes por tallo, área foliar, longitud de tallos, contenido de sacarosa, entre otros. Las mejores predicciones fueron para la biomasa seca de tallos, seguida del IAF y del contenido de sacarosa en la biomasa fresca de tallos.

Otro modelo usado recientemente para simular y predecir el crecimiento de caña de azúcar es el DSSAT-Canegro (v4.5) sugarcane crop model. Este modelo usa la eficiencia de uso de la radiación y el déficit hídrico como aproximaciones para simular el crecimiento del cultivo. Los procesos simulados a nivel planta son el desarrollo del dosel, el crecimiento de raíces, hojas y tallos, fotosíntesis, respiración, transpiración, acumulación y distribución de la biomasa. El estrés hídrico es cuantificado usando índices de satisfacción de agua (ISA) del suelo que afectan fotosíntesis, crecimiento y transpiración. Numéricamente, el ISA es el complemento del déficit de agua del suelo e iguala a uno cuando no hay estrés y cero cuando el cultivo es totalmente estresado. Entre los datos meteorológicos que utiliza el modelo están la precipitación, la radiación solar, temperatura, humedad y velocidad del viento. También utiliza propiedades físicas del suelo y características genéticas de los cultivares. Este modelo ha sido calibrado en Australia en los cultivares Q138 y Q141, en Sudáfrica en NCo376 y en Brasil (RB72454) (Inman-Bamber, 1991; Singels *et al.*, 2013).

AUSCANE es una versión de EPIC que ha sido modificada para simular el crecimiento y desarrollo de la caña de azúcar en Australia (Jones *et al.*, 1989).

Simula el crecimiento de la caña de azúcar, incluyendo el clima (temperatura, humedad, precipitación), del suelo (humedad, propiedades físicas, erosión), la hidrología, la labranza, el ciclo de los nutrientes, el crecimiento de los cultivos y el rendimiento. También se puede simular prácticas de manejo de cultivos tales como riego, drenaje, fertilización y encalado. AUSCANE es un modelo versátil aplicable a una amplia gama de investigaciones de la industria azucarera (Wegener *et al.*, 1995). El modelo de simulación AUSCANE, junto con la opinión de expertos locales y registros históricos se utilizó para predecir el rendimiento y el CCS (una medida del contenido de azúcar en el tallo de caña) en caña de azúcar en el distrito de Herbert River, Australia. Las simulaciones se llevaron a cabo durante un período de 25 años. El modelo se realizó adecuadamente sobre los tipos de suelo arcilloso. Sin embargo, sobrevaloró el rendimiento y los valores de CCS en los tipos de suelos arenosos y los subestimó en suelos limosos. Las estimaciones de rendimiento fueron influenciadas por la radiación solar diaria promedio y los cambios en el balance hídrico del suelo (Johnson *et al.*, 1994).

En Brasil, Monteiro y Sentelhas (2017) simularon la producción de caña de azúcar a nivel nacional usando un modelo de rendimiento con solo variables agrometeorológicas simples, con el objetivo de sugerir prácticas y medidas para mitigar pérdidas de rendimiento. El modelo calibrado se usó para estimar el potencial de rendimiento de caña de azúcar plantilla y soca y el mejor rendimiento por productor. Se utilizaron datos de 259 localidades que representaron a todas las regiones del país donde se cultiva caña de azúcar. Se emplearon datos del clima de 1983 a 2013 y características locales de los suelos. Las simulaciones de rendimiento y rendimiento potencial se realizaron para 30 ciclos de crecimiento, las que fueron comparadas con los datos reales de rendimiento promedio oficiales. La principal fuente de variación fue el déficit de agua, contando para el 75.6% de pérdidas, mientras que el manejo del cultivo contó para el 24.4%.

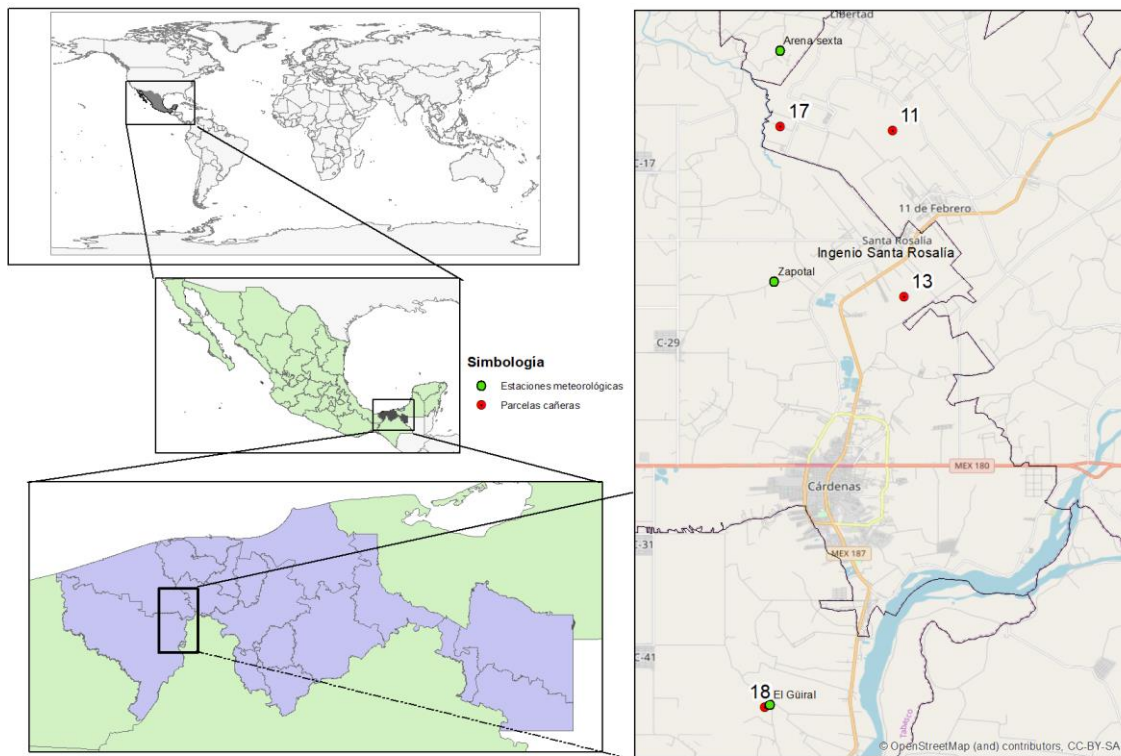
También se han utilizado modelos en caña de azúcar para simular la interceptación de la radiación solar ajustando del coeficiente de extinción (Scarpari y Ferreira de Beauclair, 2008). A través de ellos, se estudió la variación espacio-temporal del índice de área foliar (IAF) y del contenido de sólidos solubles (°Brix) de caña de

azúcar, en Piracicaba (SP), en 2003 y 2004. El mayor IAF fue para la variedad SP 80-3280 en comparación con la RB 85 5156, con valores entre 6.41 y 4.27 respectivamente. Los valores más altos para el IAF y los más bajos para el Brix también fueron observados bajo condiciones de alta disponibilidad de agua, lo que indica un retraso en la maduración. Los autores recomiendan el uso de valores diarios del coeficiente de extinción, dado que mejoran la simulación de la interceptación de radiación solar y se minimizan los errores al estimar la productividad cuando se analizaron diferentes variedades de caña de azúcar.

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Sitio experimental

El presente trabajo se realizó en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía (ISR) (Figura 3), en el ciclo soca del cultivo de caña de azúcar, que corresponde a la zafra abril 2018-marzo 2019. El ISR está ubicado a los  $18^{\circ}5' 20.19''$  de latitud norte y a los  $93^{\circ}21'21.15''$  longitud oeste en la región de la Chontalpa, Tabasco. El clima del lugar es caliente y húmedo, y se define como Am(i) g, con una temperatura media anual de  $26^{\circ}\text{C}$  y precipitación media anual de 1879 mm, de los que el 85% se presenta en los meses de junio a diciembre, considerándose el resto de los meses (enero a mayo) el período de mínima humedad (Salgado-García *et al.*, 2013b).

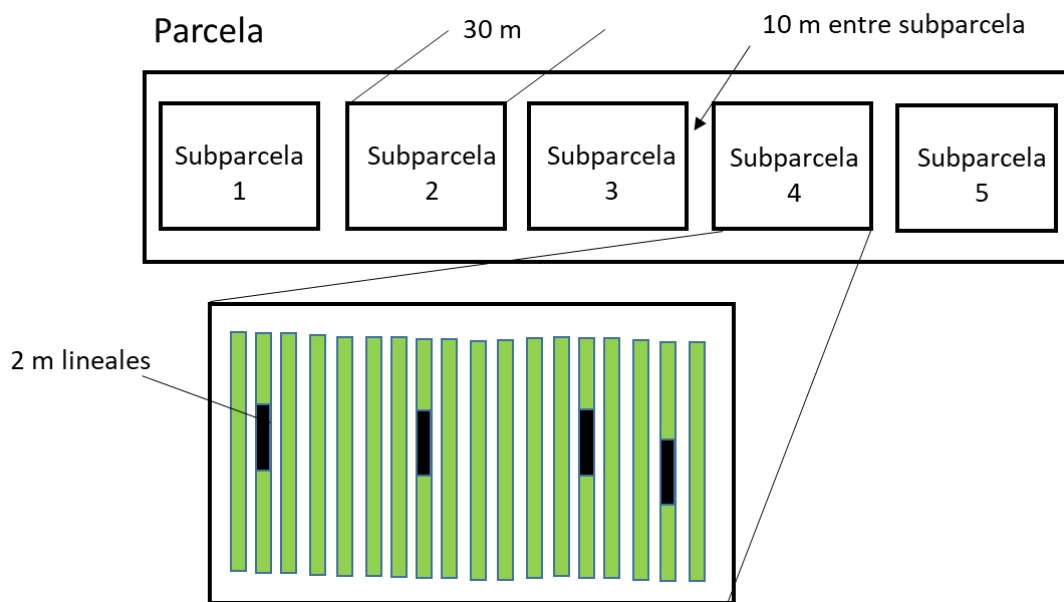


**Figura 3.** Ubicación espacial del Ingenio Santa Rosalía, parcelas en estudio (en número) y estaciones meteorológicas (círculos color verde).



### 3.2. Parcela experimental

Dentro del área cañera del ISR, se ubicaron parcelas cultivadas con las variedades CP 72-2086 y Méx 69-290 establecidas en subunidades Fluvisol eútrico y Vertisol eútrico (Cuadro 3). Dentro de cada una, se ubicó un área de 1.0 ha. Dentro de esta área, se marcaron cinco subparcelas de 30 x 30 m dejando una separación de 10 m entre cada una. La toma de datos y de muestras se realizó en dos metros lineales dentro de cada subparcela, evitando el efecto de borde. Estos dos m lineales se desplazaron al segundo surco inmediato siguiente, cada mes, para mantener el efecto de competencia. Cada subparcela fue considerada una repetición (Figura 4).



**Figura 4.** Esquema de la distribución de las subparcelas dentro del área experimental, y de los 2 m lineales para la toma de muestras.

Las dosis de fertilización aplicadas y la cosecha final de cada parcela fueron realizadas por los productores (Cuadro 3). La numeración de las parcelas en este estudio corresponde a las seleccionadas dentro del proyecto COMPASS mexicano para el estudio del crecimiento de variedades cañeras en la región.

### 3.3. Condiciones edáficas

Las características de los suelos donde se encuentran las variedades en estudio son:

**Cuadro 3.** Datos de las parcelas de caña de azúcar utilizadas en el estudio.

Parcela No.	Productor	Variedad	Subunidad suelo	Pp (mm)	Dosis Fertilización	Fecha de corte	Coordenadas geograficas
11	López Cacho Félix	Méx 69-290	FLeu	2040	130-80-60	20/03/2019	18° 8'1.42"N, 93°21'8.33"O
13	Luna Rodríguez Matilde	Méx 69-290	VReu	1960	160-60-60	22/03/2019	18° 4'0.50"N, 93°20'51.29"O
17	López Izquierdo Alfonso	CP 72-2086	VReu	1960	160-60-60	18/02/2019	18° 8'7.05"N, 93°23'48.88"O
18	Martínez Ruiz Miguel	CP 72-2086	FLeu	2100	130-80-60	20/02/2019	17°54'6.98"N, 93°24'11.15"O

Pp=precipitación; FLeu: Fluvisol eútrico; VReu: Vertisol éútrico.

**Vertisol (Eútrico).** Se ubica en un polígono de precipitación de 1937-2085 mm. Son suelos que tienen dentro de los 100 cm desde la superficie del suelo mineral, en algunas partes, condiciones de reducción por algún tiempo durante el año y en un 25% o más en el volumen del suelo, un patrón de color estágnico. Estos suelos, además, presentan una saturación de bases (por  $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) de 50% o más entre 20 y 100 cm desde la superficie del suelo (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007). Esta subunidad presenta bajos índices de infiltración, problemas de labranza en la época de lluvias debido a la plasticidad de la arcilla, y de agrietamiento en la época de sequía, en la cual el suelo se torna excesivamente duro por lo que dificulta la labranza. El pH varía con la profundidad de neutro a medianamente alcalino, el contenido de fósforo se incrementa con la profundidad de medio a alto. Presenta contenidos desde medios a altos de K conforme se incrementa la profundidad, el contenido de materia orgánica es medio, y alto el de N (Salgado-García *et al.*, 2013b).

**Fluvisol (Eútrico).** Se ubican en un polígono de 1920-1960 mm. Suelos que presentan propiedades flúvicas, es decir, que se derivan de sedimentos fluviales, lacustre o marinos y que reciben materiales nuevos a intervalos regulares y que, con excepción de materiales encauzados, tienen contenidos de carbono orgánico

que decrecen irregularmente con la profundidad o que se mantienen superiores a 0.20% a una profundidad de 125 cm; pueden presentar estratos finos de arena con un contenido menor, siempre y cuando los sedimentos más finos subyacentes tengan contenidos suficientes, excluyendo horizontes A enterrados. Una característica fundamental de los Fluvisoles es que mantienen una estratificación en al menos 25% del volumen de suelo entre la superficie y los 125 cm de espesor. Los Fluvisoles no deben tener ningún otro horizonte de diagnóstico que un A ócrico, mólico o úmbrico, un horizonte H hístico o un horizonte sulfúrico o materiales sulfídicos a menos de 125 cm de profundidad, o características salinas. Los Fluvisoles éutricos son los Fluvisoles que tienen una saturación de bases igual o mayor al 50%, al menos entre los 20 y 50 cm de profundidad, sin que sean calcáreos a esta profundidad, además no tienen horizontes sulfúricos, ni materiales sulfídicos dentro de los 125 cm de profundidad, tampoco presentan propiedades sálicas. Los Fluvisoles éutricos son suelos con buena permeabilidad, profundos, texturas medias o medias sobre gruesas, de poco desarrollo (presentan únicamente horizontes A y C diferenciados por el grosor del sedimento aluvial), suficientemente ricos en nutrimentos y materia orgánica, con buena agregación, muy buena actividad biológica y buen drenaje superficial, por ello se consideran como los mejores suelos del estado. Se clasifican según su capacidad de uso como suelos de primera clase (clase I), sin deméritos para su uso agrícola (Salgado-García *et al.*, 2013b).

### **3.3.1. Análisis de suelos.**

En cada parcela se tomaron muestras de suelos de 0-30 cm de profundidad con una barrena tipo Holandesa, en los cuatro puntos cardinales y una central para conformar una muestra compuesta. La muestra compuesta fue secada a la sombra, molida y tamizada. Se determinó la Conductividad Eléctrica, MO, Nt, P, K, Ca, Mg, Na, Acidez, Densidad aparente, Textura, y las constantes de humedad (Cuadro 4), de acuerdo a los procedimientos establecidos en la Norma-021-RECNAT (2000), en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.

**Cuadro 4.** Métodos y unidades de las propiedades fisicoquímicas de los suelos en estudio.

<b>Propiedad</b>	<b>Método</b>	<b>Unidad</b>
Conductividad eléctrica	AS-18: Conductímetro	DS m <sup>-1</sup>
pH	AS-02: Electrométrico	
Materia orgánica	AS-07: Walkley y Black	%
Nt	AS-08: Kjeldahl	%
P	AS-10: P-Olsen	ppm
Ca, Mg, K, Na	AS-12: Acetato de amonio	Cmol*kg <sup>-1</sup>
Textura	AS-09: Bouyoucos	%
Densidad aparente	AS-03: Terrón parafinado	g cm <sup>-3</sup>
Constantes de humedad	AS-06: Olla de presión	%

Fuente: NOM-021-RECNAT 2000.

### **3.4. Material biológico**

Las variedades utilizadas fueron la CP 72-2086 y Méx 69-290 (Cuadro 3), cuyas características han sido descritas por otros autores y se muestran a continuación:

**Variedad CP 72-2086.** Sus tallos son erectos de color verde amarillento con manchas irregulares cerosas, de corteza de dureza media y longitud moledera de 2.5 a 3 m entrenudos ligeramente embarrilados; con diámetro de medio a grueso: yema pequeña redonda que no rebasa el anillo de crecimiento, mismo que se pierde en la parte posterior de la cicatriz foliar; copa regular con hojas de anchura media color verde claro con la punta arqueada, por lo aserrado de sus bordes cortantes; collar color café-rojizo de forma Deltoide y lígula lineal; aurículas interna y externa tipo Deltoide; no contiene ahuates (García, 1984). Sus características agronómicas son de buena germinación, pronta emisión de brotes amacollo abundante temprano de rápido cierre de campo: al principio su crecimiento es abierto y termina ligeramente inclinado; susceptible al acame con alto tonelaje; despaje regular, las

hojas adheridas se desprenden fácilmente con la mano; desarrollo aletargado en invierno, rápido y profuso en verano.

**Variedad Méx 69-290.** Esta variedad ocupa el segundo lugar en superficie cultivada en el país (72, 427.16 ha). Presenta tallos erectos de color verde crema cuando están cubiertos por la vaina de la hoja, y de verde claro cuando están expuestos al sol; corteza suave, el tallo es de 2.5 a 3.0 cm de diámetro y de 10 a 12 cm de longitud; yema redondeada, con el poro germinal central abultado, ocasionalmente toca el anillo de crecimiento y a veces presenta yemas dobles asimétricas; hojas arqueadas, de anchura media, color verde claro y escasos ahuates; raíces profundas y abundantes. Es de regular germinación y amacollamiento temprano, con buen desarrollo cuando se siembra en la época adecuada; regular despaje, las hojas permanecen adheridas al tallo y se desprenden fácilmente con la mano; resistente al acame y susceptible al quiebre de los tallos por vientos fuertes; floración nula o escasa; se adapta a condiciones de riego o de temporal con precipitación anual superior a 1500 mm y altitud de 0 a 800 msnm; prospera en suelos de textura arcillosa, de espesor medio y con buen y regular drenaje. Los rendimientos que ha mostrado son de 100 t ha<sup>-1</sup> en plantilla y 92 ton ha<sup>-1</sup> en socas, superando a las variedades Méx 57-473 y Méx 68-P-23. Es resistente al mosaico, roya café, carbón y escaldadura de la hoja, pero susceptible a la mancha de ojo si se siembra en terrenos bajos con mal drenaje, en condiciones de exceso de humedad es susceptible al ataque de la conchuela harinosa rosada. Es de madurez mediana, con 15 % de sacarosa, 85 % de pureza y 13 % de fibra (Salgado *et al.*, 2013a).

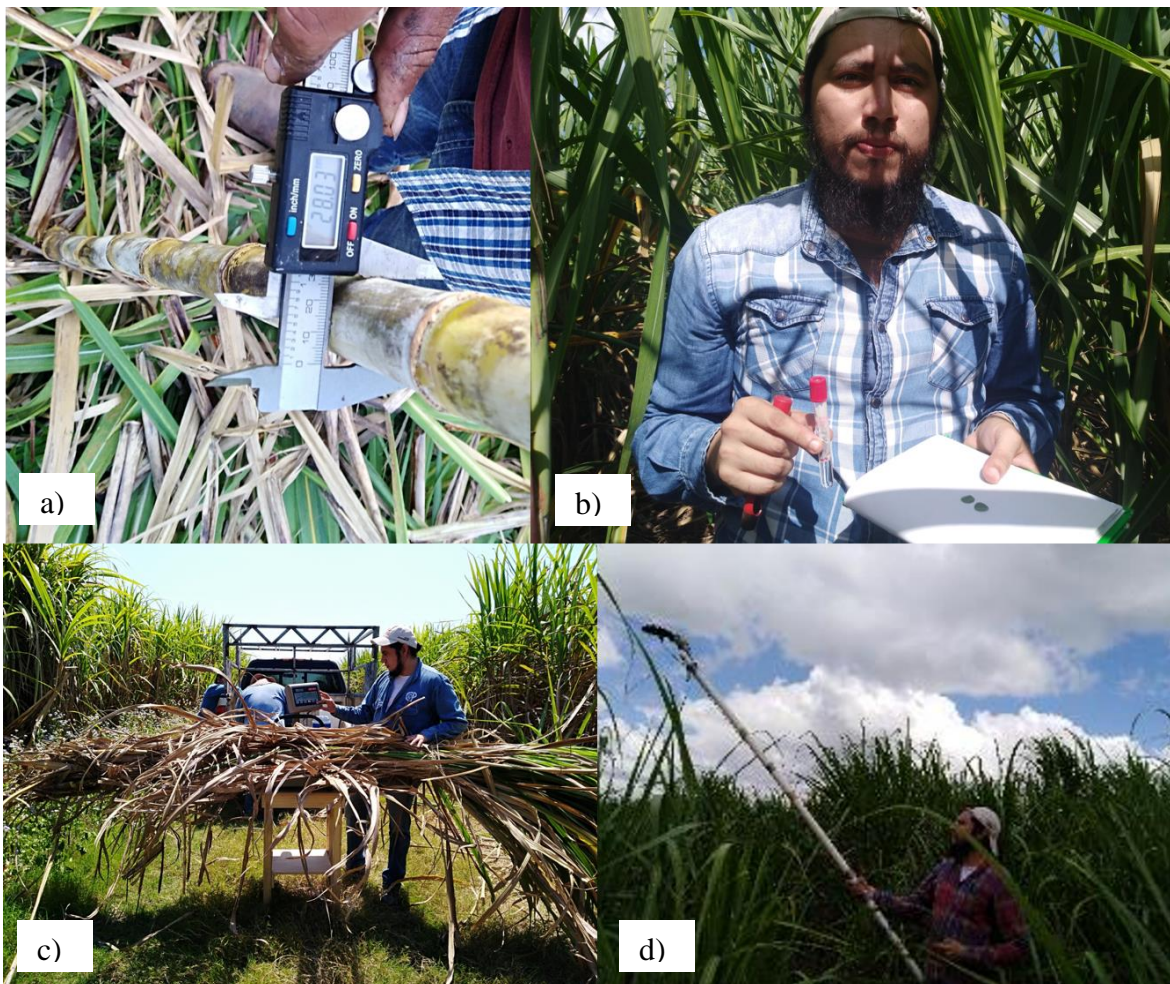
### **3.5. Manejo agronómico**

Se aplicó el paquete tecnológico del ISR que incluye las dosis de fertilización (Cuadro 3) generadas por el estudio de Salgado *et al.* (2005), y el manejo agronómico de malezas. La fertilización se hizo de forma manual (a los dos meses de edad del cultivo), se dió un pase de cultivo con ganchos inmediatamente después de la fertilización. Para el control de malezas se realizó la aplicación de herbicida Diuron® después del corte. Al inicio de las lluvias se hizo un chapeo manual,

aplicación de herbicida post emergente (Hexaxinona® + Diuron®), y una aplicación de herbicida Picloram® + 2,4-D Amina® para el control de malezas de hoja ancha.

### 3.6. Variables de estudio

A continuación, se presentan las variables que se tomaron durante este estudio y sus tiempos de muestreos. En la Figura 5 se ilustra la toma de algunas variables en campo:



**Figura 5.** Detalles de las mediciones de las variables: a) diámetro de tallo, b) clorofila, c) biomasa de tallos y d) medición del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI).

**Emergencia (Ahijamiento).** Se contó el número de plantas a los 1, 2 y 3 meses después del corte (cosecha de caña), en 2 m lineales por subparcela.

**Biomasa total, biomasa foliar, biomasa de tallos fresca y seca.** Se colectó a partir de los 3, 6, 9, y 11 meses después del corte en 2 m lineales por subparcela. El peso fresco de la biomasa total se registró en una balanza digital con capacidad de 200 kg. Enseguida las hojas y puntas de los tallos se separaron, y se registró el peso fresco de los tallos. Posteriormente, se tomó una muestra de 300 g de tallo y otra de hojas, y se colocaron en sobres de papel manila previamente identificados. Las muestras fueron puestas a secar en estufa de circulación forzada a 65°C durante 72 h para determinar el porcentaje de humedad y después calcular el peso seco de tallos y hojas.

**Altura y diámetro de tallos.** Se midieron a los 3, 6, 9, y 11 meses en dos metros lineales por subparcela. La altura se tomó de la base del tallo a la primera hoja con la lígula visible, con la ayuda de un flexómetro Marca Truper de 5 m longitud. El diámetro del tallo se determinó con un vernier digital Marca Truper.

**Número de tallos.** Se contó cada mes desde el ahijamiento hasta la cosecha en dos metros lineales por subparcela.

**Índice de área foliar.** Se midió mensualmente desde el mes 1 hasta el mes 10 de edad del cultivo, en dos metros lineales por subparcela, en las parcelas en estudio utilizando el equipo LAI 2200C marca LICOR (Welles y Cohen, 1996).

**Índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI).** Se midió el NDVI utilizando el sensor *GreenSeeker handheld crop sensor*, marca Trimble ([www.trimble.com/agriculture](http://www.trimble.com/agriculture)), cada mes hasta los 10 meses de edad del cultivo, en dos metros lineales por subparcela. En cada subparcela se realizaron 10 lecturas, colocando el sensor a 60 cm sobre el dosel del cultivo de caña de azúcar.

**Porcentaje de cobertura del dosel.** Se tomó cada mes en los mismos dos metros lineales donde se muestrearon las otras variables, utilizando la aplicación Canopeo desarrollada por la Universidad de Oklahoma (Patrignani y Ochsner, 2015), a partir de un dispositivo móvil. Por cada subparcela se tomaron 10 lecturas consecutivas.

**Concentración de pigmentos fotosintéticos.** El muestreo foliar para determinar clorofila se realizó cada mes, al mismo tiempo que el índice de área foliar, utilizando un horador circular de 1 cm<sup>2</sup>. Por subparcela, de una cepa de caña elegida al azar en los dos metros lineales, de la hoja número 4 contada de arriba hacia abajo, se obtuvieron dos discos de la parte media de la hoja. Los discos se colocaron en un tubo de ensayo de 10 mL conteniendo 5 mL de N, N dimetilformamida, protegido de la luz y conservado a 4 °C para su transporte al Laboratorio (Moran, 1982; Wellburn, 1994). En el laboratorio, las muestras continuaron la incubación a temperatura ambiente y en la oscuridad hasta completar 24 h. Las absorbancias se midieron a 480, 647 y 664 nm en un Espectrofotómetro UV-Visible marca Thermo Scientific modelo Multiskan go.

La concentración de clorofila a, clorofila b, clorofila total y carotenoides totales se calcularon de acuerdo a las siguientes ecuaciones según Moran (1982) y Wellburn (1994) expresadas en µg cm<sup>-2</sup>:

$$\text{Clorofila a} = 12.00 (A_{664}) - 3.11 (A_{647}) \quad (1)$$

$$\text{Clorofila b} = 20.78 (A_{647}) - 4.78 (A_{664}) \quad (2)$$

$$\text{Clorofila total} = 7.04 (A_{664}) + 20.27 (A_{647}) \quad (3)$$

$$\text{Carotenoides} = [1000(A_{480}) - 1.12(C_a) - 34.07(C_b)] / 275 \quad (4)$$

**Grados-Días-Calor o en desarrollo (GDD).** Los datos de crecimiento se graficaron como una función del tiempo termal y de días calendario. El tiempo termal se expresó como grados días en desarrollo, el cual se calculó con la Ec.5:  $GDD = \sum \left( \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \right) - T_b$  (FAO, 2006), donde T<sub>max</sub> es la temperatura máxima diaria, T<sub>min</sub> es la temperatura mínima diaria y la temperatura base (T<sub>b</sub>), debajo de la cual se asume ya no hay crecimiento. La temperatura base considerada para el cálculo de lo GDD fue de 12°C (Inman-Bamber, 1994; Allison *et al.*, 2007).



**Tasas relativa de crecimiento (TRC) y de crecimiento del cultivo (TCC).** La estimación de valores de TRC y TCC se realizó utilizando los datos de biomasa seca de tallos, con las siguientes relaciones (Hunt, 1981; Hunt *et al.*, 2002):

$$TRC = \ln P_2 - \ln P_1 / t_2 - t_1, \text{ kg kg}^{-1} \text{ día}^{-1} \quad (6)$$

P: peso seco aéreo (biomasa) de la planta en cualquier intervalo de tiempo., t= tiempo

$$TCC = 1/A(P_2 - P_1 / t_2 - t_1), \text{ kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1} \quad (7)$$

A= unidad de área de muestreo

**Grados Brix.** Se tomaron con un refractómetro digital a los 8, 10 y 12 meses en 10 tallos tomados al azar en cada subparcela por parcela.

**Calidad de los jugos** (<sup>o</sup>Brix, %Pol, %Fibra, %Azúcares reductores, %pureza y %humedad) se determinaron a los 9, 10 y 11 meses de edad en 10 tallos tomados al azar en cada subparcela por parcela. Las determinaciones se realizaron en el laboratorio del ISR.

**Rendimiento final de materia seca.** La cosecha se realizó a los 11 meses de edad del cultivo. Se contaron los tallos molederos en 10 m lineales para obtener el número de tallos por m lineal y posteriormente este valor, se multiplicó por 7692 que es la cantidad de m lineales ha<sup>-1</sup> de caña surcada a 1.3 m de distancia, para obtener el número de tallos ha<sup>-1</sup>. Posteriormente se tomó una muestra aleatoria de 10 tallos, los cuales se pesaron con punta y sin punta para obtener el peso promedio de los tallos y de la punta (hojas). Para el rendimiento en toneladas de caña por hectárea (t ha<sup>-1</sup>), se utilizó la ecuación 8:

$$\text{Rendimiento (t ha}^{-1}\text{)} = (\text{Peso promedio de tallos}) (\text{número de tallos ha}^{-1}\text{)} \quad (8)$$

**Datos meteorológicos.** Se tomaron de la estación climatológica Wacht Dog 2900 ET más cercana a cada sitio (Cuadro 5), donde se colectaron los datos de temperatura del aire, precipitación, humedad relativa, radiación solar y humedad

volumétrica del suelo. Los datos se registraron cada 30 minutos. Con los datos de humedad relativa y temperatura se calculó el déficit de presión de vapor (DPV) (Howell y Dusek 1995) con la Ec.9:

$$DPV = PV_{sat} - PV_{air} \quad (9)$$

$$PV_{sat} = 0.61078 * Exp^{\left(\frac{17.27 * T_m}{237.3 + T_m}\right)} \quad (10)$$

$$PV_{air} = \frac{HR * PV_{sat}}{100} \quad (11)$$

Donde:  $PV_{sat}$ : es la presión de saturación de vapor (KPa);  $PV_{air}$ : es la presión parcial de vapor (KPa); HR: humedad relativa (%) y  $T_m$ : temperatura del aire °C.

**Cuadro 5.** Coordenadas de las estaciones meteorológicas cercanas a las parcelas de caña en estudio.

Estación	Parcela de caña	Coordenadas
El Güiral	18	17°54'10.91"N, 93°24'4.37"O
Zapotal	13	18° 4'23.46"N, 93°23'57.83"O
Arena Sexta	11, 17	18° 9'56.99"N, 93°23'49.29"O

### 3.7. Análisis estadístico

Los datos de biomasa, altura y diámetro fueron sometidos a un análisis de varianza en arreglo factorial 2 x 2 x 4, considerando los factores de variedad (Mex 69-290 y CP 72-2086), subunidad de suelo (FLeu y VReu) y fecha de muestreo (3, 6, 9, 11 meses de edad) con cinco repeticiones. Los datos de IAF, NDVI, pigmentos fotosintéticos y número de tallos se analizaron mediante análisis de varianza en arreglo factorial 2 x 2 x 10, considerando los factores de variedad (Mex 69-290 y CP 72-2086), subunidad de suelo (FLeu y VReu) y fecha de muestreo (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 meses de edad) con cinco repeticiones. Para aquellas variables donde se encontraron diferencias significancias entre los tratamientos se realizó la prueba de comparación múltiple de medias por el método de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). Las

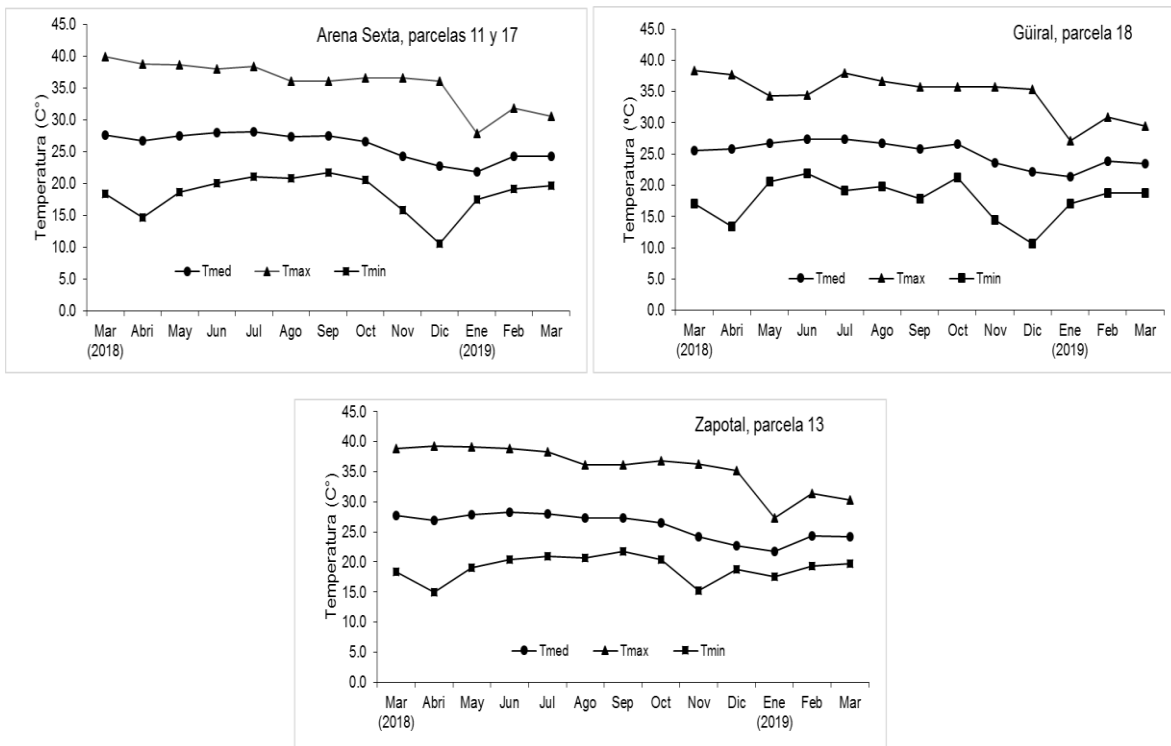
correlaciones de Pearson se calcularon entre el NDVI y las variables de crecimiento y calidad. Las variables que presentaron correlación estadística significativa con el NDVI e IAF, se analizaron mediante el modelo de la regresión lineal para obtener las ecuaciones de regresión y los coeficientes de determinación. Las dinámicas del crecimiento de caña respecto a los GDD, variedad y subunidad de suelo se ilustran mediante gráficas (xy dispersión). Todos los análisis se hicieron con el programa estadístico SAS 9.2.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Características climáticas durante el crecimiento del cultivo

Durante el crecimiento de las variedades de caña en estudio, se colectaron datos climatológicos de estaciones meteorológicas colocadas en campos de caña de azúcar cercanos a las parcelas de evaluación.

En la Figura 6 se muestran los climogramas de las temperaturas promedio máximas, mínimas y medias mensuales de las estaciones climatológicas utilizadas en este estudio. La Figura 6a corresponde a la estación meteorológica de la ranchería Arena Sexta ubicada en el municipio de Cunduacán y es la más cercana a las parcelas 11 y 17. La Figura 6b corresponde a la estación meteorológica de la ranchería Zapotal ubicada en el municipio de Cárdenas y es la más cercana a la parcela 13. La Figura 6c corresponde a la estación meteorológica de la ranchería Güiral ubicada en el municipio de Huimanguillo y es la más cercana a la parcela 18.



**Figura 6.** Temperaturas promedio máximas (Tmax), mínimas (Tmin) y medias (Tmed) de las estaciones climatológicas: Arena Sexta, Zapotal y Güiral.

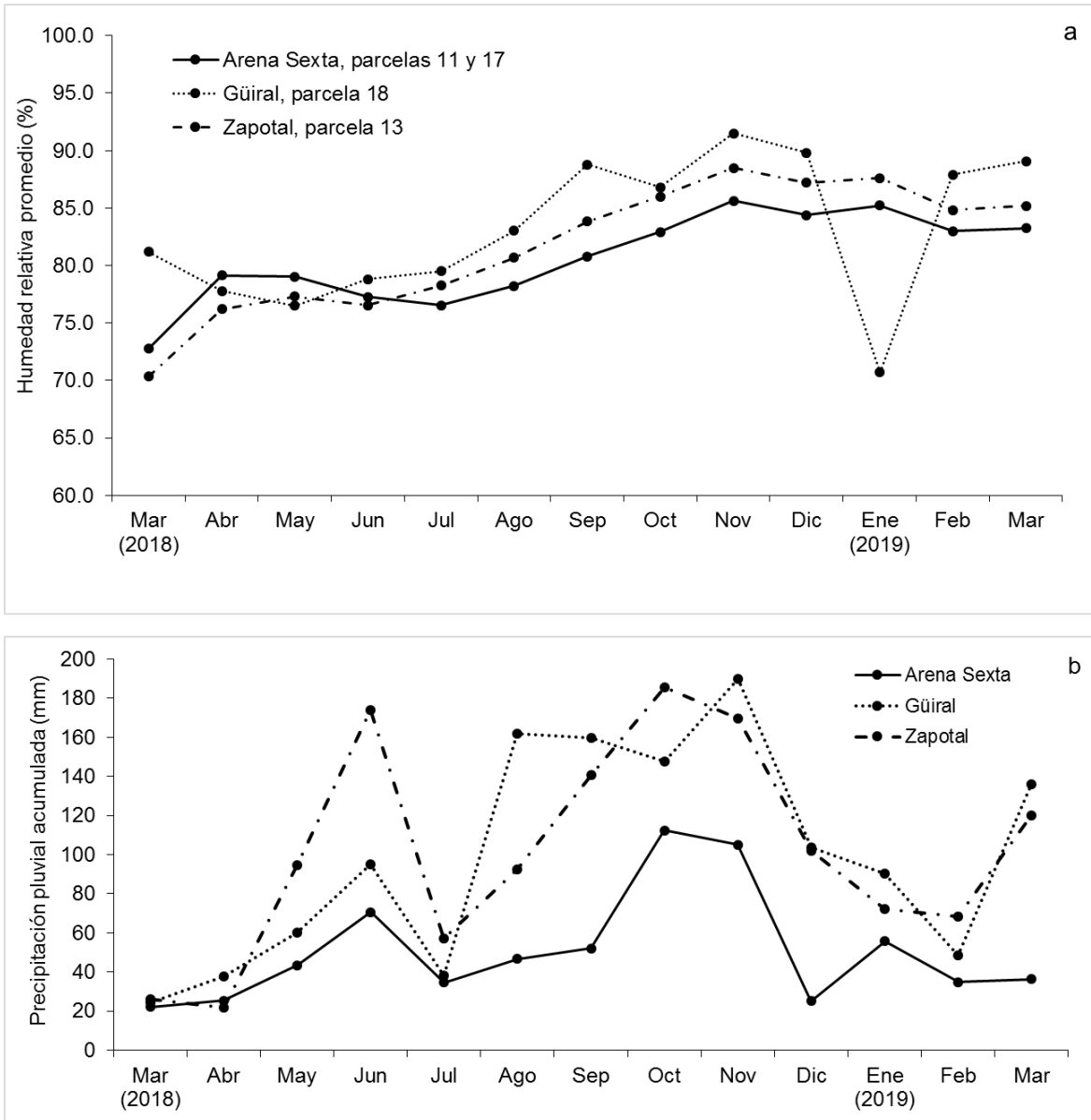
**Temperaturas máximas:** durante el crecimiento y desarrollo del cultivo de la caña de azúcar se registraron temperaturas máximas medias mensuales en un rango de oscilación desde 27.1°C hasta 39.9°C. Las temperaturas promedio máximas más elevadas fueron registrada en la estación de Arena Sexta (29.9°C a 39.9°C), seguidas de la estación de Zapotal (27.3°C a 39.3 °C) y de la estación de Güiral (27.1°C a 38.4°C). Durante el año de estudio la mayor y menor temperaturas máximas se presentaron en el mes de marzo y diciembre 2018, respectivamente.

**Temperaturas medias:** con respecto al patrón de las temperaturas medias mensuales en las tres estaciones meteorológicas fue similar, se observa una tendencia a la baja desde los meses de octubre 2018 a enero 2019, registrandose en este mes las temperaturas medias más bajas durante el periodo de estudio. Durante los meses de marzo a junio de 2018 ocurrió la brotación de los hijuelos y el amacollamiento del cultivo de caña.

**Temperaturas mínimas:** la variación de las temperaturas promedio mínimas durante el crecimiento y desarrollo de las variedades de caña de azúcar en estudio, fue de 10.6°C a 21.8°C; las mas elevadas se registraron en la estación de Zapotal (14.9°C a 21.8°C), seguida de las estaciones de Arena Sexta (10.6°C a 21.7°C) y Güiral (10.6°C a 21.8°C). En las estaciones de Arena Sexta y el Güiral la menor temperatura promedio mínima se registró en el mes de diciembre 2018; en cambio en la estación de Zapotal la menor temperatura promedio mínima se observó en los meses de diciembre 2018 y enero 2019 (Figura 6).

**Humedad relativa (HR):** el rango de variación fue de 70.3% a 91.5% en las tres estaciones en estudio (Figura 7). El mayor rango de HR se registró en la estación de Güiral (70.7 a 91.5%), seguido de la estación de Zapotal (70.3 a 88.5%) y la estación de Arena Sexta (72.7 a 85.6 %). El menor y mayor valor de HR se registró en marzo y noviembre 2018, la menor HR en el mes marzo coincide con el registro de mayor temperatura máxima promedio en este mes en las estaciones Arena Sexta y Zapotal; y el más alto en noviembre de 2018 coincidiendo con periodos de altas

precipitaciones en los meses de octubre y noviembre de 2018. En el caso de la estación de Güiral, la menor HR se observó en el mes de enero 2019 y la mayor en el mes de noviembre 2018 (Figura 7a).

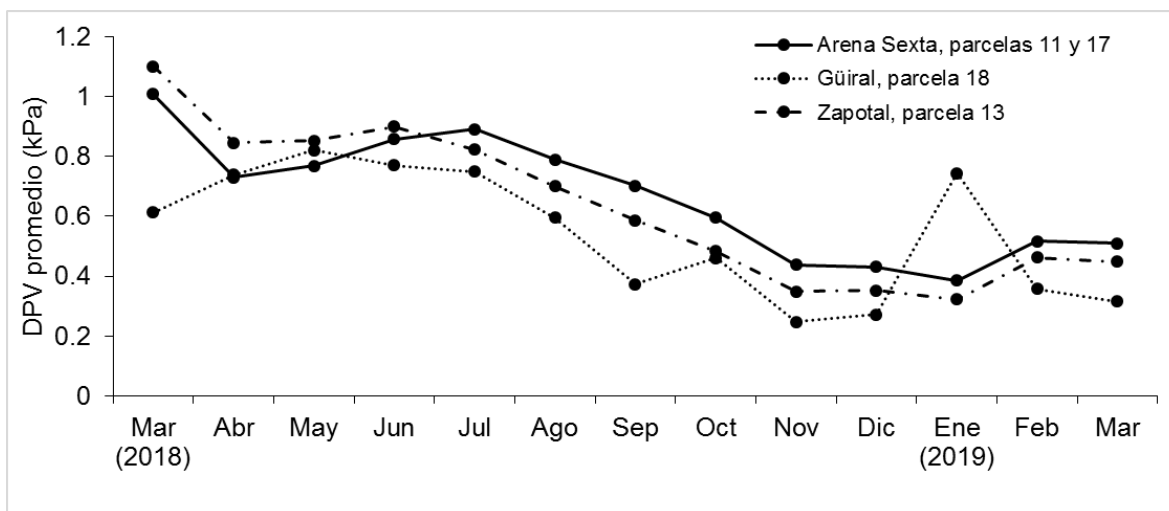


**Figura 7.** Humedad relativa promedio (a) y precipitación pluvial acumulada (b) de las estaciones climatológicas cercanas a las parcelas en estudio.

**Precipitación:** El registro de precipitación en las tres estaciones reveló que los meses más lluviosos fueron octubre y noviembre de 2018 en las estaciones Arena

Sexta y Zapotal. Pero la estación de Güiral presentó lluvia abundante desde el mes de agosto, con un máximo en noviembre de 2018 (Figura 7b). La precipitación acumulada durante el ciclo soca fue 663.7, 1293.1 y 1323.8 mm para la estación de Arena Sexta, Güiral y Zapotal, respectivamente. Un periodo de baja precipitación se observa en los meses de marzo y abril de 2018, con valores de precipitación de 22, 21.9, 24.3 mm para la estación de Arena Sexta, Zapotal y Güiral, respectivamente. Los meses de altas precipitaciones coinciden con edades de la caña de azúcar de 8 meses y los de menores precipitaciones con la época de cosecha e inicio de rebrote de socas.

**Déficit de presión de vapor (DPV):** Este se calculó a partir de los datos de humedad relativa y temperatura (Allen *et al.*, 1998) de las tres estaciones meteorológicas en estudio. El DPV promedio varió de 0.38 a 1.0 en la estación de Arena Sexta, 0.32 a 1.10 en la estación de Zapotal y de 0.24 a 0.82 en la estación de Güiral (Figura 8).



**Figura 8.** Déficit de presión de vapor promedio (kPa) durante el ciclo soca de caña de azúcar en las parcelas en estudio.

En el mes de abril de 2018, el DPV disminuyó en las estaciones climatológicas de Arena Sexta y Zapotal, y se incrementa ligeramente con las lluvias de junio 2018. Para la estación de Güiral el patrón de comportamiento es diferente, incrementando

en los meses de marzo a mayo de 2018, y registrando en el mes de enero de 2019 una subida abrupta para luego descender en el mes de marzo de 2019 (Figura 8), Este incremento es asociado principalmente a la presencia de una menor HR en enero 2019. En caña de azúcar se ha observado que DPV superiores a 0.5 kPa afectan los estomas disminuyendo su conductancia (Grantz y Zeiger, 1986), pero también cuando el DVP es <0.30 (cercano a cero), la humedad relativa es alta y el cultivo de caña deja de realizar el interambio gases, debido a que la atmósfera se encuentra saturada con vapor de agua, y no hay un gradiente de concentración hacia donde difunda el vapor de agua de los estomas (Cardozo, 2012), lo que afectará el crecimiento del cultivo.

#### 4.2. La fertilidad y humedad de los suelos

El análisis de fertilidad (Cuadro 6) y la curva de retención de humedad (Cuadro 7) de los suelos de las parcelas en estudio se describen a continuación:

**Cuadro 6.** Análisis de fertilidad de los suelos de las parcelas de caña de azúcar en estudio (0 a 30 cm de profundidad).

Parcela	pH H <sub>2</sub> O	CE dS m <sup>-1</sup>	MO %	Nt %	P mg kg <sup>-1</sup>	K	Ca	Mg	Na	Ac	Da g/cm <sup>3</sup>	Ar %	Li %	Are %	Clasif. Textural
11	6.5	0.06	4.9	0.20	14.58	0.44	2.69	1.19	0.32	0.12	1.04	51	33	16	Arcilla
13	6.2	0.06	5.2	0.18	17.08	0.46	2.77	1.02	0.39	0.14	1.07	43	39	18	Arcilla
17	6.7	0.05	5.5	0.22	15.83	0.41	2.58	1.01	0.44	0.19	1.12	47	37	16	Arcilla
18	5.8	0.08	5.8	0.25	14.17	0.44	2.72	0.89	0.42	0.17	1.08	45	35	20	Arcilla

Nt=nitrógeno total; P: fósforo-Olsen; Ac: acidez intercambiable; Ar=arcilla; Li=limo; Are=arena

**Parcela 11 (Méx 69-290; FLeu):** Es un suelo con pH ligeramente neutro, donde la mayoría de los nutrientes están disponibles para la planta y no presenta problemas de salinidad (<0.8 dS m<sup>-1</sup>) (Richards, 1974). La relación C/N, calculada con los datos de MO y Nt, fue de 14.2, indicando que la mineralización es moderada. El fósforo extractable Olsen fue de 14.58 ppm, el cual se clasifica como alto (CSTPA,1980), y coincide con los valores reportados por otros autores para este tipo de suelos (Salgado *et al.*, 2005; Naranjo *et al.*, 2006). El contenido de K fue de 0.44 cmol kg<sup>-1</sup> se clasifica como medio (Etchevers, 1988) lo que se atribuye a la mezcla de arcilla



llita y motmorillonita (Bolio *et al.*, 2008) y a su origen aluvial. Los valores de 2.69 y 1.19 cmol kg<sup>-1</sup> de Ca y Mg, respectivamente, se clasifican como bajos (Etchevers, 1988), aunque el estudio de Salgado-García *et al.* (2004) indica valores mas altos de estos dos elementos en el área de influencia del Ingenio Santa Rosalía (18.0 y 4.9 cmol kg<sup>-1</sup> de Ca y Mg, respectivamente).

**Parcela 13 (Méx 69-290; VReu):** Es un suelo sin salinidad (<2 dS m<sup>-1</sup>) (Richards, 1974). La relación C/N fue de 16.8, es decir, que la mineralización es moderadamente lenta y requiere de N suplementario. El fósforo extractable Olsen fue de 17.08 ppm, el cual se clasifica como alto (CSTPA, 1980). El contenido de K fue de 0.46 cmol kg<sup>-1</sup> se clasifica como medio (Etchevers, 1988). Los valores de 2.77 y 1.02 cmol kg<sup>-1</sup> de Ca y Mg, respectivamente, se clasifican como bajos (Etchevers, 1988). Estos podrían estar subestimados, ya que el estudio de Salgado-García *et al.* (2004) realizado en suelos del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, reporta valores de 16.0 y 7.6 cmol kg<sup>-1</sup> de Ca y Mg, respectivamente, para este tipo de suelos.

**Parcela 17 (CP 72-2086; VReu):** Es un suelo con pH ligeramente neutro, donde la mayoría de los nutrientes están disponibles para la planta, el resto de las propiedades del suelo es similar a la Parcela 13 (Cuadro 6).

**Parcela 18 (CP 72-2086; FLeu):** El pH del suelo se clasifica como moderadamente ácido, a este pH el P, Ca y Mg reducen su disponibilidad en la solución del suelo y Fe, Mn, B, Cu y Zn aumentan su disponibilidad (Salgado *et al.*, 2003). El resto de las propiedades del suelo son similares a la Parcela 11 (Cuadro 6).

Con respecto a la humedad aprovechable se observó que las parcelas 11 y 18 que corresponden a los suelos FLeu tienen mayor humedad aprovechable para el cultivo de caña de azúcar >17% (Cuadro 7). Las parcelas ubicadas en el suelo VReu proporcionan menos de 17% de humedad aprovechable.

**Cuadro 7.** Curva de retención de humedad de las parcelas de caña de azúcar en estudio.

Identificación		HCC	PMP	Potencial matricial (atm)				
Parcela	Prof.	%		0.3	1.0	2.0	4.0	5.0
		%Humedad						
11	0-30	37.98	20.47	36.67	31.87	28.78	25.61	23.89
13	0-30	35.66	19.69	34.89	30.54	28.86	25.09	24.34
17	0-30	37.53	20.65	37.12	34.37	30.29	26.84	24.51
18	0-30	38.86	18.48	38.44	34.76	31.53	29.36	27.27

HCC=humedad a capacidad de campo; PMP=punto de marchitez permanente.

En resumen, la fertilidad de suelo de 0-30 cm de profundidad de las cuatro parcelas es similar, todas requieren de la adición de N, son bajas en Ca y Mg. La parcela 18 tiene el suelo más ácido y la 13 el más cercano a la neutralidad. Todas presentan una textura arcillosa, aunque estén clasificadas como subunidades de suelo diferentes: Fluvisol eútrico y Vertisol eutríco. Asimismo, los valores de CC y PMP fueron similares para todas las parcelas (Cuadros 6 y 7).

### 4.3. Acumulación de biomasa

#### Altura de tallo

A los once meses de edad del ciclo soca, la altura del tallo fue afectada por la variedad, subunidad de suelo, fecha de muestreo y sus interacciones (Cuadro 8). La variedad CP 72-2086 requirió menos GDD en ambas subunidades de suelo (625° y 394° en FLeu y VReu, respectivamente) para completar su ciclo de desarrollo, que la Méx 69-290 (Figura 9).

La variedad CP 72-2086 presentó la mayor altura en la subunidad de suelo FLeu, respecto a cuando se cultiva en el VReu (Figura 9a). El rápido crecimiento de esta variedad durante los primeros seis meses de edad en relación con el de la Méx 69-290, refleja su característica de maduración temprana (Gilbert *et al.*, 2009). CP 72-2086 muestra una reducción en altura de planta a los 9 meses de edad (4345 GDD) en el FLeu. Esto puede deberse al DPV<0.4 y a las bajas temperaturas ambientales que se presentaron en noviembre y diciembre de 2018, lo que afectó el crecimiento (Figuras 6c, 8, 9a y 9b).

**Cuadro 8.** Cuadrados medios del ANOVA de variables de crecimiento y acumulación de biomasa de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

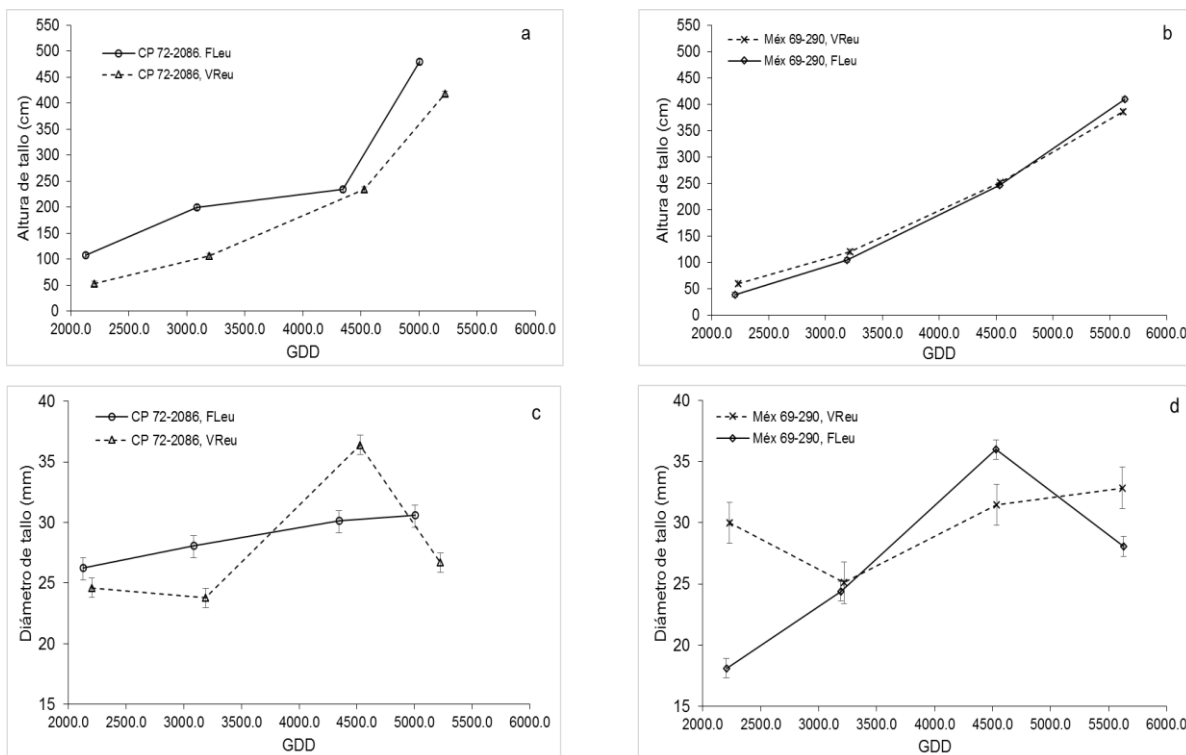
Factor de variación	GL	Cuadrado medio				
		Altura tallo (cm)	Diámetro tallo (mm)	Biomasa tallos (kg ha <sup>-1</sup> )	Biomasa hojas (kg ha <sup>-1</sup> )	Biomasa total (kg ha <sup>-1</sup> )
V	1	144367.1**	1.55 NS	28.7x10 <sup>8</sup> **	20.59x10 <sup>8</sup> **	97.93x10 <sup>8</sup> **
SS	1	113078.6**	261.74*	3.84x10 <sup>8</sup> NS	4.83x10 <sup>8</sup> **	17.29x10 <sup>8</sup> **
FM	3	14648819.2*	10000.81*	148.5x10 <sup>8</sup> **	17.14x10 <sup>8</sup> **	236.29x10 <sup>8</sup> **
V*SS	1	161317.68**	853.4**	30.19x10 <sup>8</sup> **	8.46x10 <sup>8</sup> *	70.63x10 <sup>8</sup> **
V*FM	3	127390.01**	338.71**	1.53x10 <sup>8</sup> NS	1.77x10 <sup>8</sup> NS	5.30x10 <sup>8</sup> NS
SS*FM	3	64492.29**	1251.94**	1.39x10 <sup>8</sup> NS	1.16x10 <sup>8</sup> NS	2.03x10 <sup>8</sup> NS
V*SS*FM	3	78133.7**	4151.32**	35.73x10 <sup>8</sup> *	0.93x10 <sup>8</sup> NS	6.52x10 <sup>8</sup> *
Error	64	765869.5	24952.9	1.03x10 <sup>8</sup>	0.47x10 <sup>8</sup>	1.55x10 <sup>8</sup>
CV (%)		14.5	19.94	29.94	30.57	22.11

V= variedad, SS= subunidad de suelo, FM= fecha de muestreo, GL= grados de libertad, \*=P<0.05, \*\*=P<0.01, NS= no significativo.

El DPV<0.4 refleja la elevada humedad relativa en el ambiente, que se sumó a las precipitaciones mayores a 100 mm que se presentaron durante estos meses, lo que pudo hacer que el contenido relativo de agua se mantuviera alto en el interior de la cavidad subestomática, y la difusión de vapor de agua disminuyera (Grantz y Zeiger, 1986; Cardozo, 2012) (Figura 7). En contraste, la variedad Méx 69-290 crece bien en ambas subunidades de suelo, aunque requiere mas GDD para completar su ciclo, por ser una variedad de maduración media (Flores, 2001).

### Diámetro del tallo

Para diámetro de tallo no se observó efecto de variedad a los once meses de edad del ciclo soca, pero la interacción V\*SS fue significativa, indicando que el diámetro del tallo depende de la variedad y el tipo de suelo (Cuadro 8). A los 9 meses de edad (4529 GDD acumulados) las variedades CP 72-2086 cultivada en suelo Vreu y la Méx 69-290 cultivada en suelo Fleu, alcanzaron el máximo diámetro de tallo (36 y 35 mm, respectivamente).



**Figura 9.** Altura de tallo de la variedad CP 72-2086 (a) y Méx 69-290 (b); diámetro de tallo de la variedad CP 72-2086 (c) y Méx 69-290 (d) durante el crecimiento cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. FLeu= Fluvisol eútrico, VReu= Vertisol eútrico.

Sin embargo, por la reducción de la precipitación de diciembre 2018 a marzo 2019 (Figura 7a y 7b) y por el inicio del proceso de sazonado y madurez, el diámetro del tallo se redujo a 28 y 26.6 mm, respectivamente, a los once meses de edad (Figuras 9c y d). Esta reducción en el crecimiento en diámetro del tallo puede deberse al efecto de las bajas temperaturas que se presentaron durante los meses previos a la cosecha (enero a marzo). Cardozo y Sentelhas (2013) indican que la tasa de crecimiento de los tallos (en longitud o en diámetro) disminuye con las temperaturas de invierno y el incremento en la tasa de acumulación de sacarosa en los tallos, resultado de una disminución de la fotosíntesis, ésta disminuye un 84 % cuando la temperatura pasa de 23 a 13.6 °C.

En socas que se cosechan en marzo, esta reducción en la tasa de crecimiento implica el inicio del proceso de maduración, pero sería interesante monitorear el diámetro del tallo en cañas que se cosechan en mayo, donde las reducciones en

crecimiento por los meses fríos aunadas a la baja en precipitaciones podrían llevar a una mayor pérdida de peso del tallo afectando el rendimiento. Es la primera vez que se documenta este tipo de observación para los ingenios ubicados en la Chontalpa, Tabasco.

### **Biomasa de tallos, follaje y total**

Los resultados del ANOVA para biomasa de tallos, hojas y total mostraron efectos significativos para V, SS, FM, V\*SS, V\*SS\*FM (Cuadro 8), con excepción de SS en biomasa de tallos y la triple interacción en biomasa de hojas.

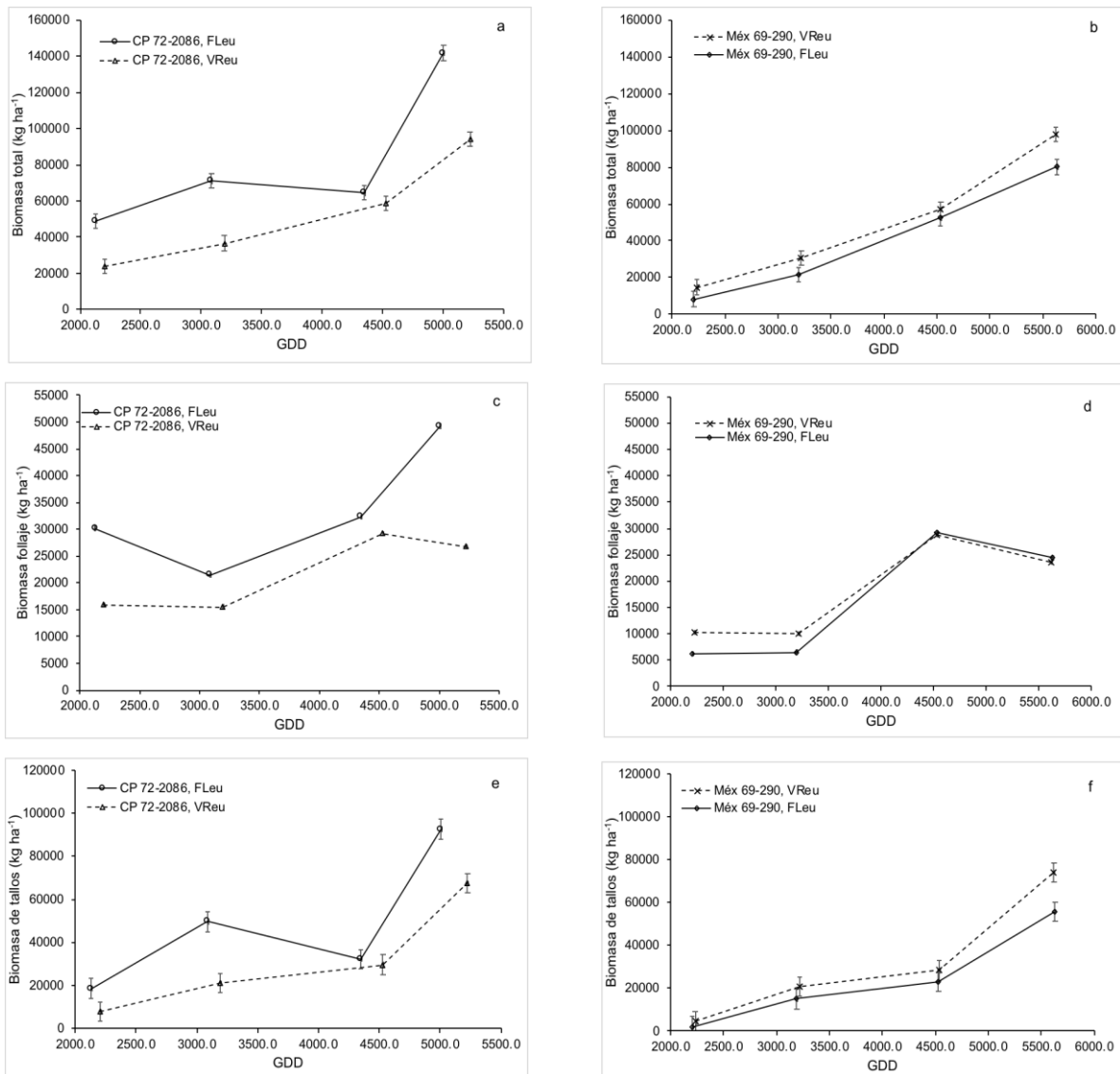
La variedad CP 72-2086 cultivada en el FLeu, mostró durante todo el ciclo soca una mayor acumulación de biomasa que es consistente con altura de planta y diámetro de tallo (Figura 10) que la Méx 69-290. Los mayores valores de biomasa de tallos y total, se reportaron a los once meses de edad en la variedad CP 72-2086 en la subunidad Fleu, y para la Méx 69-290 en Vreu (Figuras 10a y b). El efecto de subunidad de suelo puede estar asociado a características físicas del suelo como retención de humedad ya que la disponibilidad de agua del suelo interfiere con la de la planta y con la demanda nutricional (Silva *et al.*, 2017) En el Cuadro 7, se observa que la variedad CP 72-2086 cultivada en suelo FLeu tiene mayor humedad aprovechable para su crecimiento >17%; o de la capacidad de la variedad para absorber los nutrientes (Salgado *et al.*, 2013a).

### **Tasa relativa de crecimiento (TRC) y del cultivo (TCC)**

Los resultados del ANOVA para TRC y TCC de biomasa de tallos se presentan en el Cuadro 9. Para TRC el efecto de la variedad y meses después del corte fueron significativos; las interacciones fueron no significativas. Para TCC fueron significativos los meses después del corte y las interacciones. No hubo efecto de la subunidad de suelo. Para ambas variables el CV fue superior a 60.0% lo indica una alta variación de estos parámetros.

La Figura 11a muestra el efecto de la variedad para la TRC. La variedad Méx 69-290 acumuló mayor cantidad de MS por kg de MS presente por día que la CP 72-2086. La mayor TRC se observa de 3 a 6 meses después del corte, ya que de 6 a

9 disminuyó fuertemente. En general ambas variedades acumularon la mayor cantidad de biomasa en tallos de 3 a 6 meses después del corte (Figura 11b).

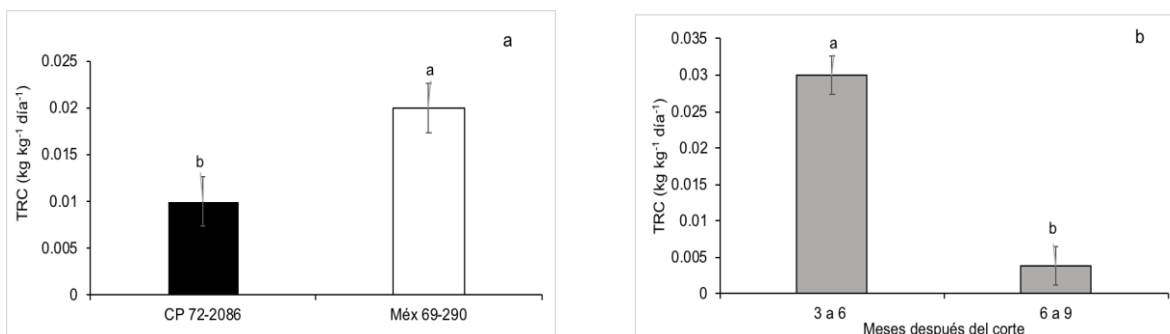


**Figura 10.** Biomasa de tallos de las variedades CP 72-2086 (a) y Méx 69-290 (b); biomasa follaje de las variedades CP 72-2086 (c) y Méx 69-290 (d); y biomasa total de las variedades CP 72-2086 (e) y Méx 69-290 (f) durante el crecimiento cultivadas en dos subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. FLeu = Fluvisol eútrico, VReu = Vertisol eútrico.

**Cuadro 9.** Cuadrados medios del ANOVA de las tasas relativa de crecimiento (TRC) y del cultivo (TCC) de biomasa de tallos de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

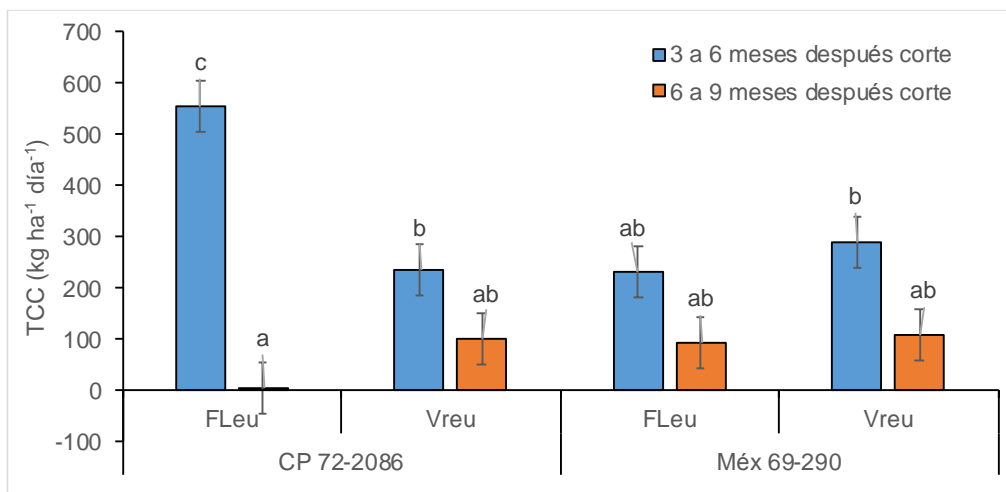
Factor de variacion	GL	TRC	TCC
Variedad (V)	1	0.0011**	18973 NS
Subunidad suelo (SS)	1	0.00013 NS	14090 NS
Meses después del corte (MDC)	1	0.01**	626036**
V*SS	1	0.00033 NS	55234 NS
V*MDC	1	0.00054 NS	84643*
SS*MDC	1	0.00029 NS	83719*
V*SS*MDC	1	0.00012 NS	128622**
Error	32	0.00014	12394
CV (%)		73.71	54.88

GL= grados de libertad, \*=P<0.05, \*\*=P<0.01, NS= no significativo.



**Figura 11.** Tasa relativa de crecimiento en función de la variedad y los meses después del corte.

Al igual que la TRC, la mayor TCC que indica acumulación de biomasa por ha día<sup>-1</sup> se dió de los 3 a los 6 meses de edad, principalmente en la variedad CP 72-2086 en la subunidad de suelo FLeu (Figura 12). Esta TCC mayor, de la variedad CP 72-2086 resulta del mayor número de tallos en Fleu (Figura 13).



**Figura 12.** Tasa de crecimiento del cultivo ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) en las variedades CP 72-2086 y Méx 69-290 en las subunidades de suelo Fluvisol eútrico (FLeu) y Vertisol eútrico (Vreu) del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía.

#### 4.4. Evolución del desarrollo del número de tallos, del índice de área foliar (IAF), del índice de vegetación de las diferencias normalizadas (NDVI) y pigmentos fotosintéticos

##### Número de tallos

El número de tallos presentó efectos significativos para todos los factores de estudio excepto para SS, con un CV de 22%, que indica alta variación de esta variable (Cuadro 10). La dinámica de producción de tallos mostró mayor variación durante los 4 meses después del corte en Méx 69-290 en ambas subunidades de suelo que CP 72-2086 (Figura 13). En suelo VReu, Méx 69-290 triplicó la cantidad de tallos a los 86 días después del corte (de 19 a 59), pero a partir de los 116 días después de corte disminuyó la cantidad de tallos (a alrededor de 32 tallos), cantidad que permaneció constante hasta los once meses de edad (Figura 13b). La mortalidad de tallos en el ciclo soca de caña de azúcar se ha asociado con una mayor sincronía en el rebrote lo que resulta en una mayor competencia por nutrientes y agua, lo que los lleva a la senescencia (Vasantha *et al.*, 2014).



**Cuadro 10.** Cuadrados medios del ANOVA de número de tallos, IAF, NDVI y pigmentos fotosintéticos de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

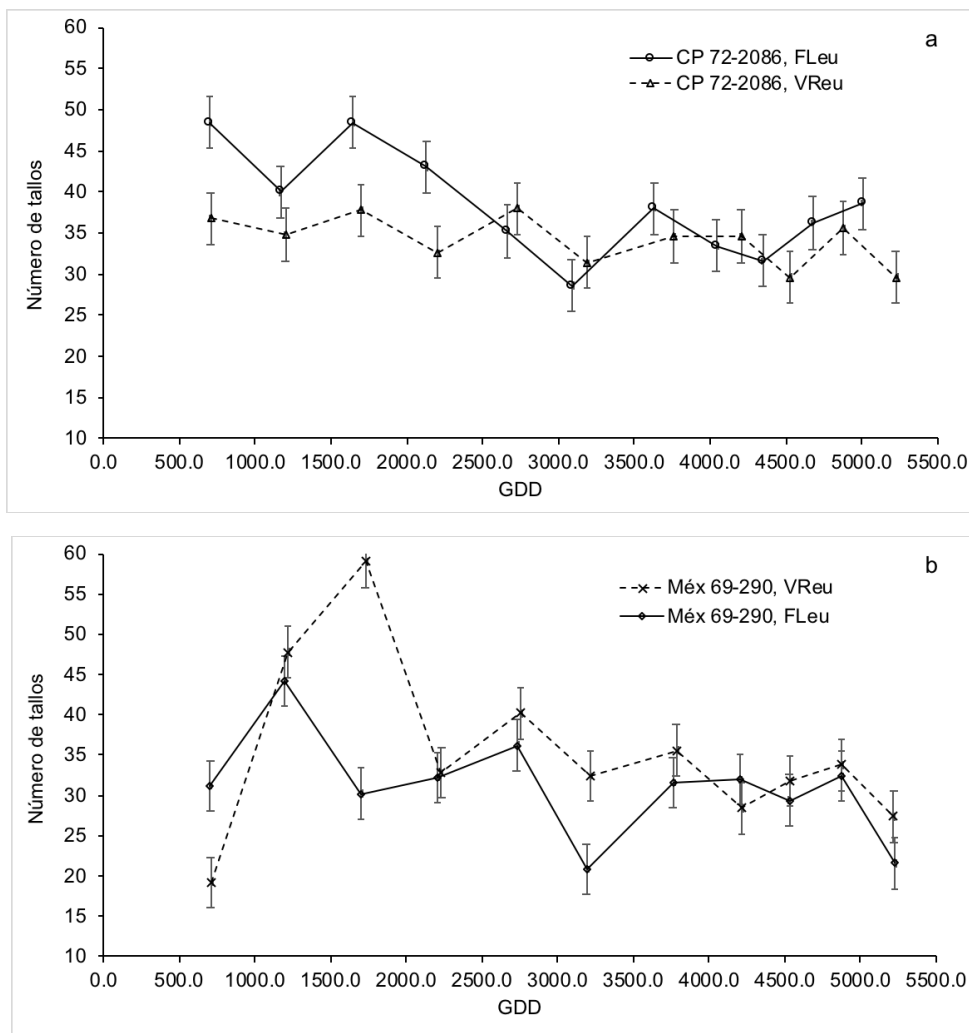
Factor de variación	GL	Cuadrados medios						
		Núm. de tallos	IAF	NDVI	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total	Caratenoides
								$\mu\text{g ml}^{-1}$
V	1	756.65**	40.42**	0.1*	10.31*	1.08*	18.06*	0.32*
SS	1	27.65*	1.75*	0.03*	9.26*	0.21	12.23*	0.09 NS
FM	10	357.68*	92.43*	0.23*	12.62*	1.23*	20.7*	0.71*
V*SS	1	1315.65*	1.19 NS	0.06*	0.3 NS	0.13 NS	0.04 NS	$1.7 \times 10^{-3}$ NS
V*FM	10	212.66*	1.65*	0.02*	1.39 NS	0.09 NS	2 NS	0.09*
SS*FM	10	250.8*	0.86*	0.0011*	1.96*	0.09 NS	2.66*	0.06 NS
V*SS*FM	10	313.06*	4.04*	0.01*	1.94*	0.16 NS	2.86*	0.07 NS
Error	176	57.7	0.33	$4.6 \times 10^{-3}$	0.82	0.16	1.16	0.04
CV (%)		22.1	13.1	3.25	21.66	35.6	20.4	21.01

V= variedad, SS= subunidad de suelo, FM= fecha de muestreo, GL= grados de libertad, \*=P<0.05,

\*\*=P<0.01, NS= no significativo.

En contraste CP 72-2086 mostró mayor estabilidad en el número de tallos durante el periodo de amacollamiento, al mantener entre 31 y 38 tallos en esta misma subunidad de suelo (Figura 13a). En suelo Fluvisol, ambas variedades incrementaron el número de tallos al inicio del ciclo de crecimiento disminuyendo a los seis meses de edad (Figura 13). Nuevamente CP 72-2086 mostró mayor estabilidad en el número de tallos que Méx 69-290.

Diversos estudios han asociado el más rápido desarrollo del dosel de ciertas variedades, con una reducción de la intercepción de luz de los estratos medios e inferiores del dosel, lo que afecta la producción de fotoasimilados para alimentar el crecimiento de los tallos, dándose la senescencia de los mismos (Simões *et al.*, 2005a; Bonet, 2014), lo que parece no ser el caso para la variedad CP 72-2086 (Figura 13a). Pero la variedad Méx 69-290 si parece ser afectado por la reducción de transmisión de luz en los estratos bajos del dosel por el cierre del mismo.



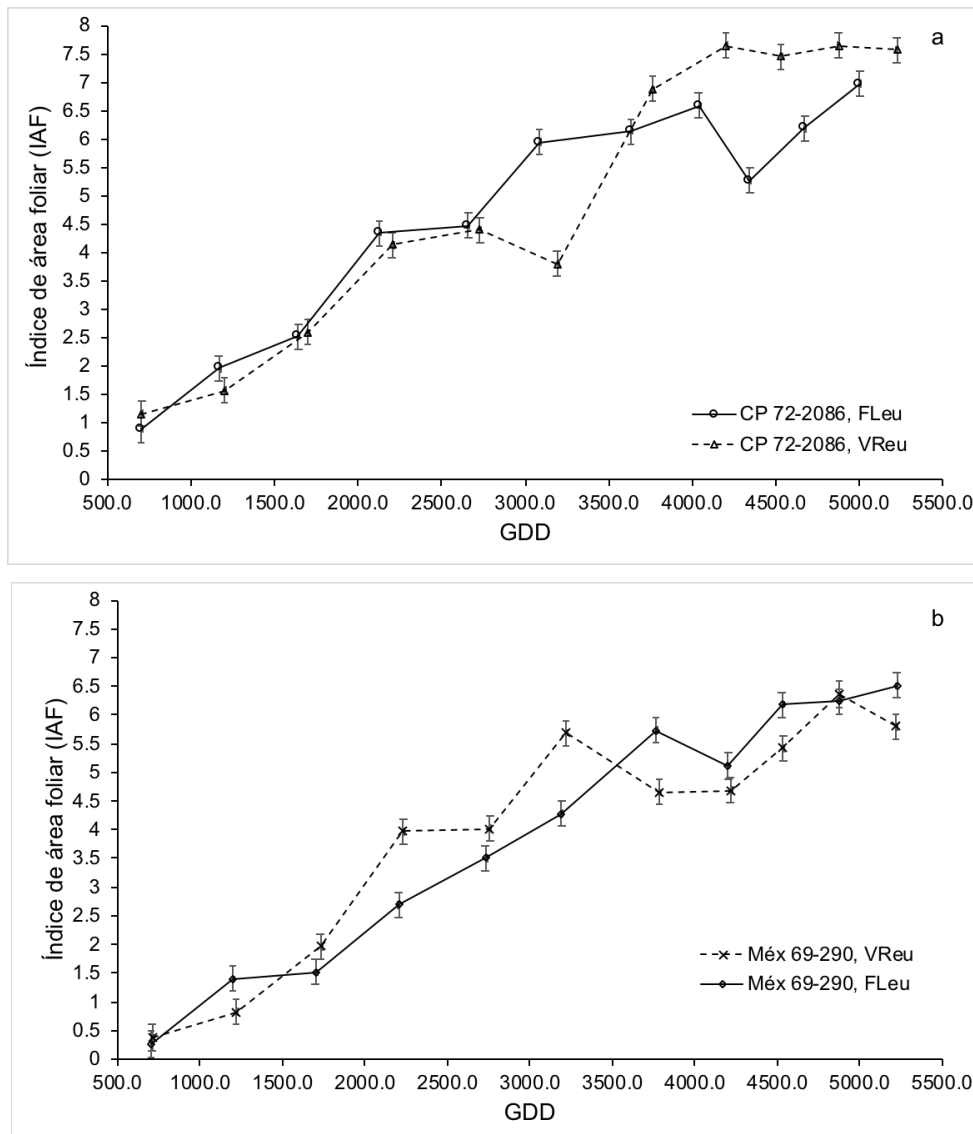
**Figura 13.** Número de tallos de la variedad CP 72-2086 (a) y Méx 69-290 (b) en dos metros lineales durante el crecimiento de la primera soca cultivadas en dos tipos de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

### Índice de área foliar (IAF)

Los resultados del ANOVA para el IAF mostraron efectos significativos para V, FM, V\*FM, SS\*FM, y V\*SS\*FM, con un CV de 12%, que indica poca variación de este índice (Cuadro 10).

La variedad CP 72-2086 presentó mayor IAF que Méx 69-290 durante su ciclo de desarrollo en ambos tipos de suelos (Figura 14). Los valores de IAF de CP 72-2086 son similares al 7.7 reportado en la India para la variedad CoLk 8102 (Radha *et al.*,

2010) y superior al observado por Vasantha *et al.* (2014) en ciclo soca de la variedad Co 98013 (4.4) establecida a un espaciamiento de 90 cm también en India.



**Figura 14.** Dinámica del índice de área foliar (IAF) de las variedades CP 72-2086 (a) y Méx 69-290 (b) de la primera soca, cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

A los seis meses de edad (alrededor de 3200 GDD) se observa una reducción en el IAF en la CP 72-2086 en la subunidad Vreu, coincidiendo con la reducción del DPV

producto de las lluvias en el mes de septiembre (Figura 8), recuperandose posteriormente hasta alcanzar un valor máximo de 7.5 (Figura 14a).

El máximo valor de IAF para Méx 69-290 fue de 6.5 en suelo FLeu. Un mayor IAF, no representa un mayor rendimiento de caña al momento de la madurez, ya que este follaje está consumiendo fotoasimilados (Pammenter y Allison, 2002), sin embargo algunos autores indican una asociación positiva con el rendimiento de caña (Vasantha *et al.*, 2014). Este índice tiende a disminuir durante la etapa de maduración, lo que solo se observó en ambas variedades en la subunidad Vreu, por la defoliación de la lámina foliar del cultivo de caña de azúcar, que aumenta la intercepción de la radiación y la tasa de asimilación por unidad de densidad de flujo de radiación, logrando incrementar el rendimiento de 73.9 t ha<sup>-1</sup> en el testigo sin defoliación a 93.1 t ha<sup>-1</sup> cuando se eliminó 42.2% del IAF (Radha *et al.*, 2010).

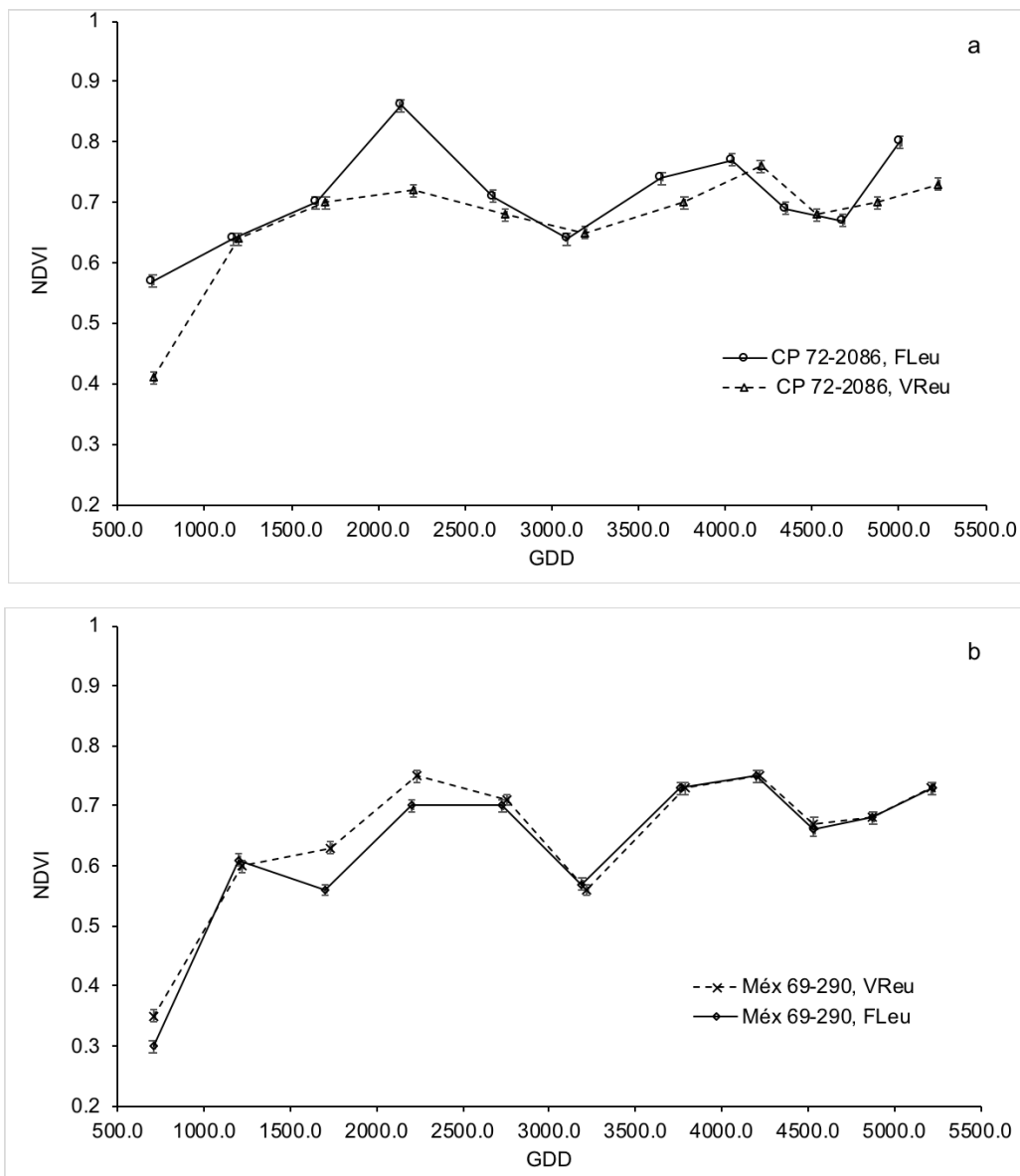
### **Índice de vegetación de las diferencias normalizadas (NDVI)**

El resultado del ANOVA para el NDVI mostró efectos significativos para todos los factores de estudio y sus interacciones (Cuadro 10). El NDVI se incrementó con el crecimiento del dosel del cultivo de caña de azúcar, y se estabilizó a los seis meses cuando ocurre el cierre del dosel, permaneciendo así hasta la etapa final del periodo de crecimiento vegetativo (Figura 15), aunque la subunidad de suelo y la variedad lo afectaron (Figuras 15a y b).

A los 11 meses de edad la Variedad CP 72-2086 presentó mayor NDVI que la Mex 69-290, con valores de 0.80 (FLeu) (Figura 15a). Estos valores, están dentro de los rangos observados en caña de azúcar durante 2004, 2005 y 2006 en Altinópolis, SP, Brasil por Fernandes *et al.* (2017).

### **Pigmentos fotosintéticos**

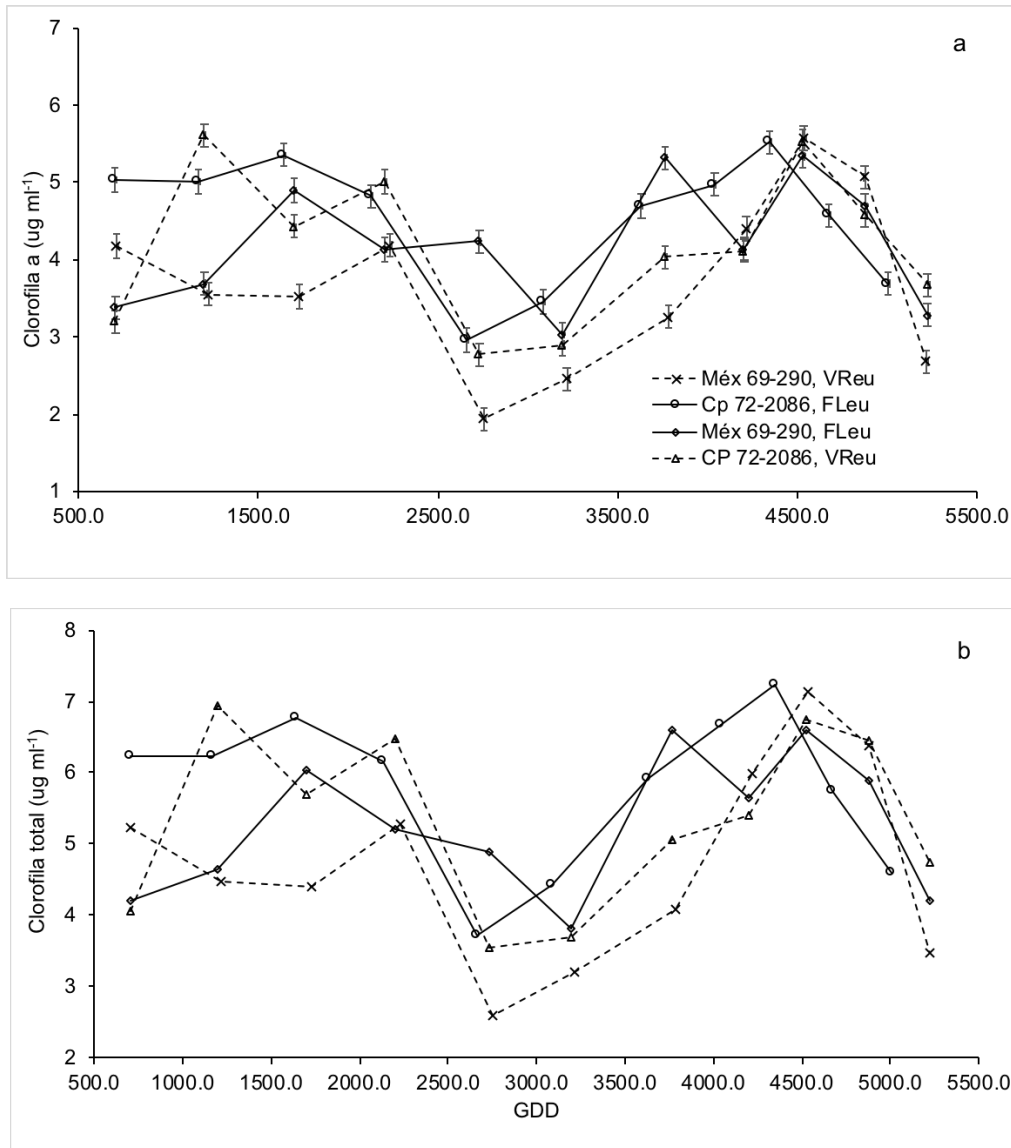
Los pigmentos fotosintéticos constituyen a la clorofila a y b, clorofila total, y carotenoides (Cuadro 10); su determinación es un parámetro importante para observar la concentración de pigmentos involucrados en la absorción de luz y transferencia de energía durante el proceso fotoquímico de la fotosíntesis, su disminución puede marcar el inicio de la senescencia de la hoja (Bassi *et al.*, 2018).



**Figura 15.** Desarrollo del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) de las variedades CP 72-2086 (a) y Méx 69-290 (b) durante el ciclo soca, cultivadas en las subunidades de suelo Fluvisol eútrico (FLeu) y Vertisol eútrico (VReu) del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Los resultados del ANOVA indican que la clorofila a y total fueron significativamente afectadas por el efecto de la V, SS, FM, y V\*SS\*FM. Mientras que la clorofila b, únicamente fue afectada por la V y FM (Cuadro 10). Con respecto a los carotenoides totales se observó respuesta significativa del efecto de la V, SS, FM (Cuadro 10).

Las Figuras 16 a y b muestran las variaciones en la concentración de clorofila a y total durante el crecimiento de las variedades de caña.



**Figura 16.** Evolución de la concentración de clorofila a (a) y total (b) de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 durante el crecimiento de la primera soca cultivadas en en las subunidades de suelo Fluvisol eútrico (FLeu) y Vertisol eútrico (VReu) del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

A los nueve meses de edad, se presentaron las mayores concentraciones de clorofila a y clorofila total en ambas variedades, siendo la variedad CP 72-2086 superior en ambas condiciones (Figura 16a y b), mientras que la Méx 69-290 obtuvo su mayor concentración de clorofila a y total en la subunidad VReu, para disminuir a los 11 meses en ambas variedades y subunidad de suelo, relacionado a la senescencia de hojas por el proceso de maduración de los tallos (Bassi *et al.*, 2018). Entre las variables ambientales que parece afectaron la concentración de clorofila o absorción de N para la formación de la molécula de clorofila fue una menor precipitación y humedad relativa durante el mes de agosto principalmente en las parcelas 11 y 17 cuando el cultivo de caña de azúcar tenía seis meses de edad. Medeiros *et al.* (2013) observaron que el déficit hídrico afecta negativamente el contenido de clorofila a, b y total pero no el de carotenoides en caña de azúcar. La mayor concentración de carotenoides se presentó hasta los nueve meses de edad en la variedad Méx 69-290 en la subunidad VReu mientras que en la variedad CP 72-2086 se registró hasta los once meses de edad en ambas subunidades.

#### **4.5. Relación entre el NDVI, parámetros fisiológicos y de calidad en caña de azúcar**

En el Cuadro 11 se presentan las correlaciones de Pearson entre las variables de crecimiento y desarrollo, IAF, NDVI, clorofila a, y parámetros de calidad. Los datos obtenidos entre el NDVI y la altura y biomasa de tallos durante todo el crecimiento y desarrollo de caña de azúcar en nuestro experimento mostraron una correlación altamente significativa ( $P \leq 0.05$ ) entre el NDVI y la altura y biomasa de tallos, con un coeficiente de correlación (R) de 0.86 y 0.81, respectivamente.

El NDVI que es un índice basado en las propiedades de reflectancia espectral del dosel que ha mostrado una alta correlación con parámetros fisiológicos del cultivo, incluyendo la producción de biomasa y el rendimiento. En caña de azúcar, ha mostrado una alta correlación con el rendimiento en caña y en sacarosa cuando el NDVI consideró los GDD ( $r^2$  0.48 y 0.42 respectivamente) (Lofton *et al.*, 2012). Estos autores indican que mejoraron la relación con el NDVI ajustando las lecturas con los

GDD, esto es el NDVI fue dividido por los GDD acumulados desde la siembra hasta el momento del monitoreo, para crear un estimado de tiempo del rendimiento al cual llamaron INSEY.

**Cuadro 11.** Correlaciones de Pearson entre NDVI e IAF con biomasa, parámetros fisiológicos y de calidad de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Parámetros	R	P-value		R	P-value
<b>Altura</b>	<b>0.86</b>	<b>&lt;0.0001*</b>	<b>Altura</b>	<b>0.82</b>	<b>&lt;0.0001*</b>
<b>Biomasa tallos</b>	<b>0.81</b>	<b>&lt;0.0001*</b>	<b>Biomasa tallos</b>	<b>0.74</b>	<b>&lt;0.0001*</b>
<b>IAF</b>	<b>0.56</b>	<b>0.02*</b>	N. Tallos	0.29	0.27
N. Tallos	0.19	0.52	Clorofila a	0.09	0.75
Clorofila a	0.17	0.54	Brix°	0.34	0.27
NDVI <b>Brix°</b>	<b>0.69</b>	<b>0.01*</b>	IAF Pol	0.28	0.38
<b>Pol</b>	<b>0.67</b>	<b>0.02*</b>	Pureza	0.08	0.8
Pureza	0.45	0.14	Red	0.53	0.08
Red	0.41	0.19	Fibra	0.18	0.58
<b>Fibra</b>	<b>0.62</b>	<b>0.03*</b>	Humedad	0.39	0.22
Humedad	0.57	0.07			

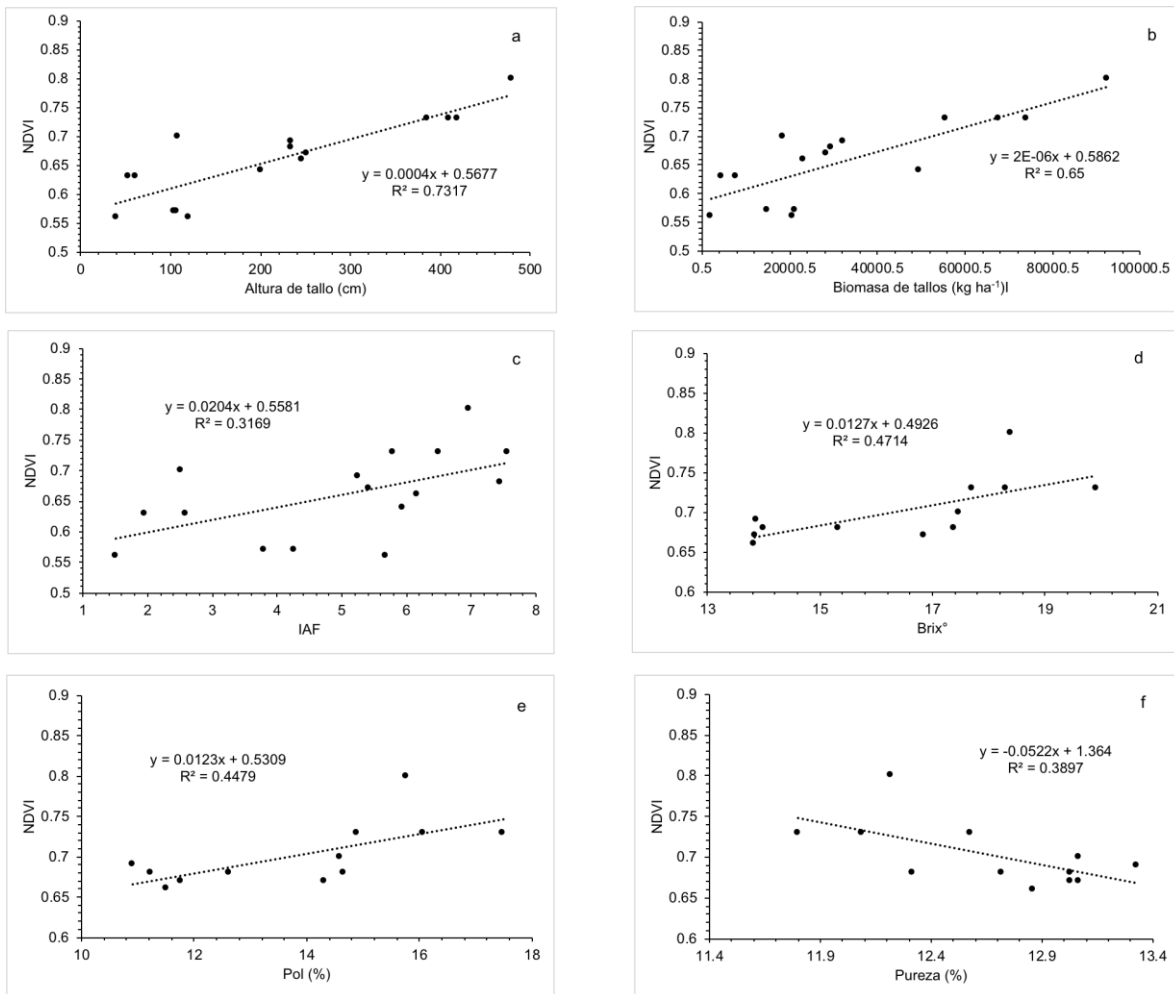
N. Tallos= número de tallos, Red= azúcares reductores, \*= significancia al  $P \leq 0.05$ .

A diferencia de evaluaciones con sensores remotos ya sea SPOT o MODIS NDVI y mediciones de °Brix, altura, diámetro, número de entrenudos y peso de caña de azúcar donde no se observó asociación con el rendimiento de caña o de sacarosa; ni tampoco fueron útiles para detectar diferencias asociadas con suelos de textura diferente o variedades de caña de azúcar (Gunnula *et al.*, 2012), en nuestro estudio, de los parámetros de calidad, se observó que las variables de °Brix, % pol y % fibra obtuvieron un R de 0.69, 0.67 y 0.62, respectivamente, todas las correlaciones fueron significativas estadísticamente ( $P \leq 0.05$ ).

Por otra parte, para el IAF se encontró una alta correlación para las variables de altura y biomasa de tallos, con un R de 0.82 y 0.74, respectivamente, ambos con correlaciones significativas estadísticamente ( $P \leq 0.05$ ).

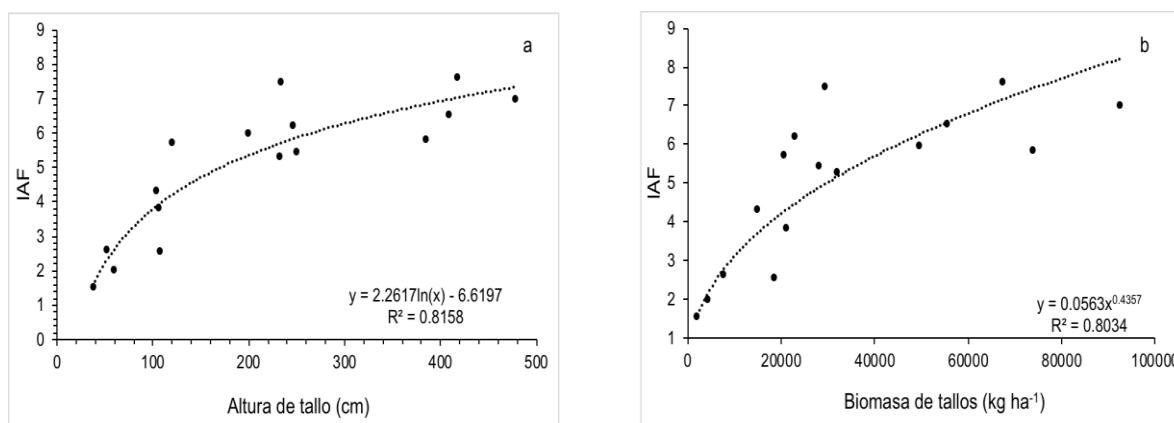


Solo para aquellas correlaciones que obtuvieron un R mayor de 0.50 y mostraron significancia ( $P \leq 0.05$ ), se graficaron y se ajustaron a los modelos de regresión, exponencial y potencial (Figuras 17 y 18). En ellas se observan las relaciones ya explicadas anteriormente.



**Figura 17.** Modelos ajustados de NDVI y a) altura, b) biomasa de tallos, c) IAF, d) Brix°, e) % pol y f) % pureza de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 a los once meses de edad cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

La Figura 18 muestra las relaciones entre IAF y la altura de planta y la biomasa de tallos. Como ya se discutió anteriormente, el IAF se incrementa conforme se incrementa la altura del dosel de caña y la biomasa de tallos para los datos confundidos de las dos variedades en ambas subunidades de suelo.



**Figura 18.** Modelos ajustados de IAF y a) altura y b) biomasa de tallos, de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 a los once meses de edad cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

#### 4.6. Calidad del jugo y rendimiento final de caña de azúcar

##### Calidad de jugo

La calidad del jugo está determinada por los grados Brix, el porcentaje de pol, pureza, fibra, azúcares reductores y humedad de los tallos de caña. A los once meses de edad del ciclo soca, el efecto de la variedad, de la subunidad de suelo y sus interacciones no fue significativo para ninguna variable de calidad determinada en los jugos de caña. La fecha de muestreo fue significativa para °Brix, pol, pureza y humedad (Cuadro 12).

Las mayores concentraciones de grados Brix y % pol, se presentaron a los once meses de edad de cultivo en ambas variedades en estudio (Cuadro 13). Lo anterior indica que ambas variedades habían alcanzado su madurez y es corroborado por los azúcares reductores, cuyos valores son muy bajos (Salgado-García *et al.*, 2016)

**Cuadro 12.** Cuadrados medios del ANOVA de parámetros de calidad de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Factor de variación	GL	°Brix	Pol	Pureza	Fibra	Azúcares reductores	Humedad
		%					
V	1	0.12 NS	1.43 NS	35.25 NS	0.86 NS	0.11 NS	3.48 NS
SS	1	3.81 NS	2.99 NS	0.37 NS	0.21 NS	0.04 NS	7.11 NS
FM	2	67.24*	66.55*	68.86*	2.33 NS	0.04 NS	272.6 NS
V*SS	1	3.49 NS	2.14 NS	0.12 NS	0.51 NS	0.09 NS	1*
V*FM	2	2.54 NS	3.95 NS	22.19 NS	0.12 NS	0.03 NS	1.86 NS
SS*FM	2	0.84 NS	1.74 NS	19.53 NS	0.31 NS	0.03 NS	4.08 NS
V*SS*FM	2	1.3 NS	1.04 NS	0.97 NS	0.17 NS	0.08 NS	2.65 NS
Error	24	1.17	1.26	12.81	0.79	0.03	5.38 NS
CV (%)		6.59	8.12	4.26	7	32	3

V= variedad, SS= subunidad de suelo, FM= fecha de muestreo, GL= grados de libertad, \*=P<0.05, \*\*=P<0.01, NS= no significativo.

**Cuadro 13.** Medias de Tukey de parámetros de calidad de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Edad meses	Variedad	Suelo	Brix°	Pol	Pureza	Fibra	Azúcares reductores	Humedad
			%					
9	CP 72-2086	Fleu	13.86 c	10.92 f	77.91 a	13.33 a	0.63 a	81.3 abc
		Vreu	14 c	11.24 ef	81.25 a	12.72 a	0.67 a	81.7 ab
10	CP 72-2086	Fleu	16.84 ab	14.33 abcd	85.19 a	13.07 a	0.57 a	73.13 d
		Vreu	17.47 ab	14.61 abcd	83.68 a	13.07 a	0.4 a	72 d
11	CP 72-2086	Fleu	<b>18.4 ab</b>	<b>15.77 ab</b>	85.74 a	12.22 a	0.45 a	<b>72.27 d</b>
		Vreu	<b>17.71 ab</b>	<b>14.9 abc</b>	84.17 a	12.58 a	0.48 a	<b>74.67 cd</b>
9	MEX 69-290	Fleu	13.83 c	11.53 cde	82.25 a	12.86 a	0.6 a	81.87 a
		Vreu	13.85 c	11.78 cdef	85.11 a	13.03 a	0.71 a	81.77 a
10	MEX 69-290	Fleu	17.39 ab	14.66 abcd	84.29 a	12.32 a	0.5 a	73.23 d
		Vreu	15.33 bc	12.64 bcdef	82.41 a	13.03 a	0.84 a	74.93 bcd
11	MEX 69-290	Fleu	<b>19.91 a</b>	<b>17.5a</b>	87.9 a	11.8 a	0.48 a	<b>72.47 d</b>
		Vreu	<b>18.3 ab</b>	<b>16.07 a</b>	87.87 a	12.09 a	0.76 a	<b>74.53 cd</b>
		DMS	3.18	3.31	10.53	2.61	0.55	6.83

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas entre tratamientos (P≤0.05).

Los mayores porcentajes de humedad se presentaron a los nueve meses de edad de cultivo, en ambas variedades y subunidades de suelo. Y a los once meses de edad en ambas variedades se observa una disminución.

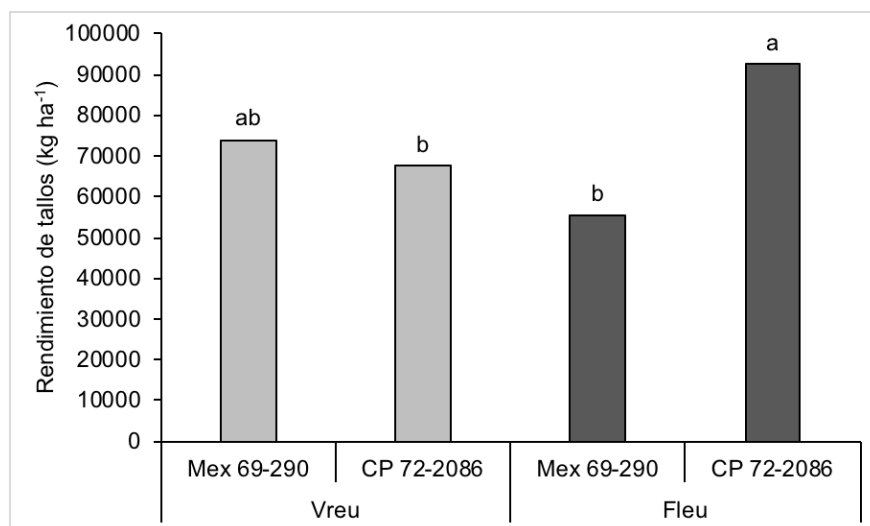
### Rendimiento de caña de azúcar

En el Cuadro 8 se presenta el ANOVA de la biomasa de tallos equivalente al rendimiento de tallos molederos a los once meses de edad, en ambas subunidades de suelo. Edad en la que la variedad CP 72-2086 supera en rendimiento de tallos a la Méx 69-290 en la subunidad Fluvisol eútrico (Figura 19). A esta edad se observó también el mayor porcentaje de °Brix y menor % humedad en tallos (Cuadro 13). Sin embargo, de acuerdo a la programación de corte por el ISR, las variedades fueron cosechadas tardíamente, la Méx 69-290 a los 14 meses y la CP 72-2086 a los 13 meses de edad (marzo-abril). En el comparativo del Cuadro 13, se observa una disminución en el rendimiento de caña cosechado, solo en la variedad CP 72-2086 en el suelo FLeu (Cuadro 14). Esto parece indicar la pérdida de peso de los tallos por el corte tardío en esta variedad de maduración temprana, y una mayor sensibilidad de esta variedad a las condiciones de humedad del suelo los meses de menor precipitación, ya que el suelo FLeu retiene menor cantidad de agua que el VReu. Este retraso en las fechas de corte, hizo que el rendimiento en biomasa de tallos disminuyera drásticamente en la variedad CP 72-2086 en suelo FLeu.

**Cuadro 14.** Medias de Tukey de rendimiento final de tallos de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Variedad	Subunidad	Rendimiento (11 meses, kg/ha)	Rendimiento cosechado según datos proporcionados por el ingenio (t ha <sup>-1</sup> )
Mex 69-290	Vrue	74053.64 ab	73.56 (14 meses)
	Fleu	55632.6 b	58.54 (14 meses)
CP 72-2086	Vrue	67578.48 b	66.76 (13 meses)
	Fleu	92515.72 a	51.91 (13 meses)
DMS		27682.37	

Letras diferentes por columna indican diferencias significativas entre tratamientos ( $P \leq 0.05$ ). FLeu = Fluvisol eútrico, VReu = Vertisol eútrico.



**Figura 19.** Rendimiento de tallos de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 a los once meses de edad cultivadas en dos subunidades de suelo (Fluvisol éútrico-FLeu y Vertisol eútrico-VReu) del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

#### 4.7. Relación entre variables climáticas y el NDVI, parámetros fisiológicos y de calidad en caña de azúcar

En el Cuadro 15 se presentan las correlaciones entre variables climáticas con las de crecimiento y parámetros de calidad. La temperatura media no mostró correlación con ninguna variable de crecimiento, de desarrollo y de calidad. La temperatura máxima mostró correlaciones significativas y negativas ( $P \leq 0.05$ ) con altura y biomasa de tallos y NDVI con R de -0.51, -0.66, -0.58 respectivamente; y significativa y positiva con la humedad de los tallos (0.60), (Cuadro 15). Es decir, a mayor temperatura menor altura, biomasa de tallos y NDVI y mayor humedad en tallos. La correlación entre la temperatura mínima y el %pureza fue significativa y positiva, pero con el contenido de fibra fue significativa y negativa (R de 0.64 y -0.57, respectivamente). También se observó que a mayor precipitación menor %pol y mayor %fibra (R de -0.58 y 0.57, respectivamente), ambas con correlaciones estadísticamente significativas ( $P \leq 0.05$ ). La humedad relativa no mostró correlación con ninguna variable de crecimiento, de desarrollo y de calidad.

**Cuadro 15.** Correlaciones de Pearson entre variables climáticas, de crecimiento, índices de vegetación y parámetros de calidad de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Variable	Tmed		Tmax		Tmin		Pp		HR	
	R	P-value	R	P-value	R	P-value	R	P-value	R	P-value
Altura	0.46	0.12	<b>-0.51</b>	<b>0.04*</b>	-0.19	0.48	-0.4	0.13	0.35	0.18
BT	-0.44	0.09	<b>-0.66</b>	<b>0.01*</b>	-0.17	0.54	-0.31	0.24	0.47	0.07
LAI	-0.27	0.31	-0.27	0.32	0.17	0.53	-0.24	0.38	0.34	0.2
N. Tallos	0.05	0.86	-0.01	0.96	0.13	0.63	0.48	0.06	-0.07	0.81
Clorofila a	-0.23	0.35	0.09	0.74	-0.32	0.23	-0.14	0.59	0.03	0.93
NDVI	-0.44	0.09	<b>-0.58</b>	<b>0.02*</b>	-0.22	0.44	-0.32	0.22	0.32	0.23
Brix°	0.07	0.87	-0.24	0.44	0.32	0.3	<b>-0.58</b>	<b>0.05*</b>	-0.14	0.67
Pol	0.09	0.78	-0.22	0.49	0.38	0.22	-0.55	0.07	-0.16	0.63
Pureza	0.12	0.72	-0.15	0.63	<b>0.64</b>	<b>0.03*</b>	-0.36	0.25	-0.22	0.49
Red	-0.14	0.68	-0.02	0.95	-0.07	0.82	0.46	0.13	0.21	0.5
Fibra	-0.45	0.14	-0.17	0.63	<b>-0.57</b>	<b>0.05*</b>	<b>0.57</b>	<b>0.05*</b>	0.12	0.71
Humedad	0.25	0.43	<b>0.6</b>	<b>0.04*</b>	-0.17	0.59	0.6	0.04	0.06	0.84

Tmed= temperatura media, Tmax= temperatura máxima, Tmin= temperatura mínima, Pp= precipitación, HR= humedad relativa, BT= biomasa de tallos, N. Tallos= número de tallos, Red= azúcares reductores, \*= significancia al  $P \leq 0.05$ .

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos se concluye que el crecimiento y desarrollo de la primera soca de las variedades en estudio es afectado por la variedad y la subunidad de suelo donde se cultivan, lo que se desglosa a continuación:

- a) La variedad CP 72-2086 fue superior a la Méx 69-290 en altura de tallo en ambas subunidades de suelo, pero fue en la subunidad Fluvisol eútrico donde ambas variedades registraron su mayor altura de tallo. Por subunidad de suelo, CP 72-2086 presenta su mayor diámetro de tallo en Fluvisol eútrico y la Méx 69-290 en Vertisol eútrico.
- b) El mayor número y acumulación de biomasa en tallos fue para la variedad CP 72-2086 en la subunidad Fluvisol eútrico, mientras que para Méx 69-290 en la subunidad Vertisol eútrico.
- c) La variedad CP 72-2086 en las subunidad Fluvisol eútrico, requirió menos GDD para alcanzar su madurez (5004) que la variedad Méx 69-290. Ambas variedades requirieron similar GDD para alcanzar madurez en la subunidad Vertisol eútrico (5219 y 5225 GDD) para Méx 69-290 y CP 72-2086, respectivamente.
- d) El índice de área foliar (IAF) y el índice de vegetación de las diferencias normalizadas (NDVI) mostraron un incremento constante durante la fase de crecimiento del cultivo, siendo siempre menor el de Mex 69-290 que el de CP 72-2086 en ambas subunidades de suelo.
- e) A los nueve meses de edad, la mayor concentración de pigmentos fotosintéticos (clorofila a, b y total, y carotenoides) fue superior en la variedad CP 72-2086 que en la Méx 69-290 en ambas subunidades de suelo. La variedad Méx 69-290 alcanza su mayor concentración de pigmentos fotosintéticos en la subunidad Vertisol eútrico y la CP 72-2086 en Fluvisol eútrico.
- f) Las correlaciones entre IAF y NDVI con las variables de altura y acumulación de biomasa de tallos en las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 fueron altas; así como entre el NDVI con °Brix, porcentaje de pol y de fibra. Las variables

climáticas no presentaron correlaciones altas y ni fueron significativas entre IAF, NDVI y parámetros de calidad del jugo de caña de azúcar.

- g) A los once meses de edad, los °Brix y los otros parámetros de calidad del jugo fueron similares en ambas variedades y subunidades de suelos. La variedad CP 72-2086 obtuvo los mayores rendimientos de tallos molidos de caña de azúcar en suelo Fluvisol eútrico y la Méx 69-290 en Vertisol eútrico.

## **5.2. Recomendaciones**

Ampliar el estudio de la dinámica de crecimiento a los ciclos plantilla y resocas para alimentar modelos que permitan predecir el rendimiento de las variedades de caña de azúcar cultivadas en la región.

Evaluar las relaciones entre NDVI de los ciclos plantilla y resocas con parámetros de biomasa y calidad en estas y otras variedades de caña de azúcar, usando un experimento diseñado para este propósito a fin de evitar errores por manejo agronómico y despoblación del campo cañero.



## VI. LITERATURA CITADA

- Aguilar, N., Galindo G., Fortanelli J., y Contreras C. 2010. Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. *Avances en investigación agropecuaria* 14(2): 49-65.
- Allen, R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56: 2-15.
- Allison, J.C.S., Pammenter N.W., and Haslam R.J. 2007. Why does sugarcane (*Saccharum* sp. hybrid) grow slowly? *South African Journal of Botany*. 73(4): 546-551.
- Bacchi, O.O.S., and Souza J.A.G.C. 1978. Minimum threshold temperature for sugar cane growth. *Proceedings of the Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists* 2. p. 1733-1741. ISSCT, São Paulo, SP, Brazil.
- Baez-González, A.D., Kiniry J.R., Meki M.N., Williams J., Alvarez-Cilva M., Ramos-Gonzalez J.L., Magallanes-Estala A., and Zapata-Buenfil G. 2017. Crop parameters for modeling sugarcane under rainfed conditions in Mexico *Sustainability* 9: 1337: 1-19. doi:10.3390/su9081337.
- Bal-Coelho, B., Tiessen H., Stewart J.W.B., Salcedo I.H., and Sampaio E.V.S.B. 1993. Residue management effects on sugarcane yield and soil properties in Northeastern Brazil. *Agronomy Journal*. 5(5): 1004-1008.
- Barbieri, V. 1993. Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp); um modelo matemático-fisiológico de estimativa. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 142 p.

- Bassi, D., Menossi M., and Mattiello L. 2018. Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. *Scientific Reports* 8:2327. DOI:10.1038/s41598-018-20653-1
- Bégué, A., Lebourgeois V., Bappel E., Todoroff P., Pellegrino A., Baillarin F., and Siegmund B. 2010. Spatio-temporal variability of sugarcane fields and recommendations for yield forecast using NDVI. *International Journal of Remote Sensing*. 31(20): 5391-5407. <https://doi.org/10.1080/01431160903349057>
- Benvenuti, F.A. 2005. Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos Dissertação (mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. 120 p.
- Blanco, M. A., Borroto J., Golles J.L., Capdesuñer Y., Cervantes A., Rodríguez S., y Peralta H.. 2003. Dinámica del crecimiento y desarrollo de cuatro variedades de caña de azúcar (*Saccharum* sp.): Aspectos fisiológicos y azucareros. *Cultivos Tropicales*. 24(1): 47-56.
- Bolio-López G. I., Salgado-García S., Palma-López D.J., Lagunes-Espinoza L.C., Castelán-Estrada M., y Etchevers-Barra J.D. 2008. Dinámica de potasio en suelos cañeros. *Terra Latinoamericana*. 26(3): 252-263.
- Bologna-Campbell, I., Franco H.C.J., Vitti A.C., Faroni C.E., Costa M.C.G., and Trivelin P.C.O. 2013. Impact of Nitrogen and Sulphur fertilisers on yield and quality of sugarcane plant crop. *Sugar Tech*. 15(4): 424–428.
- Bonnet, G.D. 2014. Chapter 3 Developmental Stages (Phenology). In: *Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology*, First Edition. Edited by Paul H. Moore and Frederik C. Botha. John Wiley & Sons, Inc. Published 2014 by John Wiley & Sons, Inc. 35-53 p.
- CAÑEROS. 2017. Estadísticas por ingenio. Unión Nacional de Cañeros, A.C: <http://www.caneros.org.mx/> (2017).

- Cardozo, N.P. 2012. Modelagem da maturação da cana-de-açúcar em função de variáveis meteorológicas. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. doi:10.11606/D.11.2012.tde-14032012-080359. Recuperado em 2019-09-09, de [www.teses.usp.br](http://www.teses.usp.br)
- Cardozo, N.P., and Sentelhas, P.C. 2013. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. *Scientia Agricola* 70(6): 449-456.
- Carneiro, V.A.E., Trivelin O.P.C., and Victoria L.R. 1995. Utilização da reserva orgânica e de nitrogênio do tolete de plantio (colmo-semente) on desenvolvimento da cana –planta. *Sci. Agric. Piracicaba, SP.* 52(2): 199-209.
- Castro-Nava, S., Huerta A. I., Plácido-de la Cruz J. M., and Mireles-Rodríguez E. 2016. Leaf growth and canopy development of three sugarcane genotypes under high temperature rainfed conditions in Northeastern Mexico. *International Journal of Agronomy* Article ID 2561026, 7 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2016/2561026>.
- CENICAÑA (Centro de Investigacion de la Caña de Azucar de Colombia). 1990. Análítico: Informe Annual. Colombia. <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=eesc.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=003043>
- CSTPA, 1980. Handboock on reference methods for soil testing. Council on Soil Testing and Plant Analysis. Athens, Georgia.
- Cuadra, S.V., Costa M.H., Kucharik C.J., Da Rochas H.R., Tatsch J.D., Inman-Bamber G., Da Rocha R.P., Leite C.C. and Cabral O.M.R. 2012. A biophysical model of Sugarcane growth. *GCB Bioenergy* 4: 36–48. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2011.01105.x.
- Da Silva, V.S.G., de Oliveira, M.W., Oliveira, T.B.A., Mantovanelli, B.C., da Silva, A.C.I., Soares, A.N.R., and Clemente, P.R.A.I. 2017. Leaf area of sugarcane

- varieties and their correlation with biomass productivity in three cycles. *African Journal of Agricultural Research*. 12(7): 459-466.
- Dillewijn, C.V. 1978. *Botánica de la caña de azúcar*. Edit. Rev. I.C.L. La Habana. 460 p.
- Dos Santos, S.M., Vieira R.J., and Camargo L.R.A. 2005. Growth indices and productivity in sugarcane. *Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.)*. 62(1): 23-30.
- Espinoza Pérez M. M. y Xool Piña T. J. 2014. Crecimiento inicial de cinco variedades de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en el sur de Quintana Roo, México. Informe Técnico de Residencia Profesional. [http://www.itzonamaya.edu.mx/web\\_biblio/archivos/res\\_prof/agro/agro-2014-12.pdf](http://www.itzonamaya.edu.mx/web_biblio/archivos/res_prof/agro/agro-2014-12.pdf)
- Etchevers, B.J.D. 1988. Interpretación de los análisis químicos de suelos. In: *Diagnóstico de la fertilidad del suelo. Curso intensivo*. CEICADES-CP. H. Cárdenas, Tabasco. pp. 180-196.
- Evans, L.T. 1975. *Crop Physiology: Some Case Histories*. Cambridge University, London.
- FAO. 2006. *Crop Water Management for Sugarcane*. EN: <http://www.fao.org/landandwater/aglw/cropwater/sugarcane.stm>
- Fauconnier, D., y Bassereau, D. 1975. *La caña de azúcar: técnicas agrícolas y producciones tropicales*. Edit. BLUME. Barcelona, España. 433 p.
- Feldman, P., Hont A.D., Guiderdoni E., Grivet L., and Glaszmann J.C. 1997. *La canne à sucre*. In: Charrier A., M. Jacquot, S. Hmon et D. Nicolas (Eds.). *L'amélioration des plantes tropicales*. CIRAD-ORSTOM. Toulouse, Francia. pp 197-216.
- Fernandes, J.L., Ebecken, N.F.F., and Esquerdo, J.C.D.M. 2017. Sugarcane yield prediction in Brazil using NDVI time series and neural networks ensemble. *International journal of remote sensing*. 38(16): 4631-4644. DOI:10.1080/01431161.2017.1325531

- Ferreira Jr, R.A., de Souza J.L., Lyra G.B., Teodoro I., Dos Santos M.A., and Porfirio A. 2012. Crescimento e fotossíntese de cana-de-açúcar em função de variáveis biométricas e meteorológicas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi* 16(11).
- Flores, C.S. 2001. Las variedades de caña de azúcar en México. Ciudad de México, 308 p.
- Fortes, C. and Demattê, J.A.M. 2006. Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data. *International Journal of Remote Sensing*. 27: 395–1412.
- García, E.A. 1984. Manual de campo en caña de azúcar. Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar. México. Disponible en: [httpwww.colpos.mxwb\\_pdfAgroproductividad2014AGROPRODUCTIVIDAD%20II%202014.pdf](httpwww.colpos.mxwb_pdfAgroproductividad2014AGROPRODUCTIVIDAD%20II%202014.pdf)
- Gilbert, R.A., Rainbolt C.R., Morris D.R. and McCray J.M. 2008. Sugarcane growth and yield responses to a 3-month summer flood. *Agriculture and water management* 95(3): 283-291.
- Gilbert, R.A., Shine J.M., Miller J.D., Rice R.W., and Rainbolt C.R. 2009. Maturity curves and harvest schedule recommendations for CP sugarcane varieties. IFAS- University of Florida. USA. 12 p.
- Goatly, M.B., Coombs J., and Smith H. 1975. Development of C4 photosynthesis in sugar cane: Changes in properties of phosphoenolpyruvate carboxylase during greening. *Planta (Berl.)* 125:15-24.
- Gomathi, R., Rao P.N.G., Rakkiyappan P., Sundara B.P., and Shiyamala S. 2013. Physiological studies on ratoonability of sugarcane varieties under tropical Indian condition. *American Journal of Plant Sciences* 4: 274-281.

- González, G.A., Ortiz V.B., y Pascual P.C.I. 1974. Sazonado y maduración de la caña de azúcar. CNIA. Serie Divulgación Técnica IMPA Libro No. 8. México, D.F. 165 p.
- Grantz, D.A., and Zeiger E. 1986. Stomatal responses to light and leaf-air water vapor pressure difference show similar kinetics in sugarcane and soya. *Plant Physiology* 81: 865-868.
- Gunnula, W., Kositrakun M., Righetti T.L., Weerathaworn P., and Prabpan M. 2012. Evaluating sugarcane growth and maturity using ground-based measurements and remote sensing data. *Thai Journal of Agricultural Science*, 45(1): 17-28.
- Howell, T.A. and Dusek D.A. 1995. Comparison of vapor-pressure-deficit calculation methods – Southern high plains. *Journal of irrigation and drainage engineering* 121(2): 191-198.
- Humbert, R.P. 1974. El cultivo de la caña de azúcar. Ed. Continental. México, D.F.
- Hunt, R. 1982. Plant growth analysis: Second derivatives and compounded second derivatives of splined plant growth curves. *Annals of Botany* 50(3): 317–328.  
<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a086371>
- Hunt, R., Causton D.R., Shipley B. and Askew A.P. 2002. A Modern tool for classical plant growth analysis. *Annals of Botany* 90: 485-488.
- Hunsgi G. 2001. Sugarcane in agriculture and industry. Eastern Press Pvt. Ltd., Bangalore, India. IBM SPSS Statistics 20. 2011. ©Copyright IBM Corporation 1989. 4-91 p.
- Inman-Bamber, N.G. 1991. A growth model for sugar-cane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance, *South African Journal of Plant and Soil* 8(2): 93-99. DOI: [10.1080/02571862.1991.10634587](https://doi.org/10.1080/02571862.1991.10634587).

- Inman-Bamber, N.G. 1994. Effect of age and season on components of sugar cane in South Africa. Proceedings of The South African. Sugar Technologists' Association p. 23-27.
- Inman-Bamber, N.G. and Smith D.M. 2005. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Fields Crops Research* 92: 185-202.
- IUSS Working Group WRB. 2014. World Reference Base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports No. 106*. FAO, Rome.
- Jimenez-Cordova, A., Vargas Tristán V., Salinas Castillo W.E., Aguirre Bortoni M.D.J., and Rodríguez Cabrera D. 2004. Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México. *Investigaciones geográficas*. 53: 58-74.
- Johnson, A.K.L., Cramb R.A., and Wegener M.K. 1994. The use of crop yield prediction as a tool for land evaluation studies in Northern Australia. *Agricultural Systems* 46(1): 93-111.
- Jones, C.A., Wegener M.K., Russell J.S., McLeod I.M., and Williams J.R. 1989. AUSCANE, Simulation of Australian Sugarcane with EPIC. CSIRO, Brisbane, Australia.
- Jurecka, F., Hlavinka P., Lukas V., Trnka M., and Zalud Z. 2016. Crop yield estimation in the field level using vegetation indices. In: Proceedings of International PhD students Conference. Czech Republic Phd MENDELNET:90-95. <https://mendelnet.cz/pdfs/mnt/2016/01/14.pdf>
- Keating, B.A., Robertson M.J., Muchow R.C., and Huth N.I. 1999. Modelling sugarcane production systems. I. Development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Research* 61: 253–271.
- Kumara, A.D.S., and Bandara D.C. 2001. Influence of nitrogen application and varietal differences on selected physiological parameters of sugarcane. *Tropical Agricultural Research* 13: 220-230.

- Lofton, J., Tubana B.S., Kanke Y., Teboh J., Viator H., and Dalen M. 2012. Estimating sugarcane yield potential using an in-season determination of normalized difference vegetative index. *Sensors*. 12(6): 7529-7547. doi:10.3390/s120607529.
- Loladze, A., Junior Rodrigues A.F., Toledo F.H.R.B., San Vicente F., Gerard B., and Boddupalli P. 2019. Application of remote sensing for phenotyping tar spot complex resistance in maize. *Frontiers in Plant Science*. 10: 552. doi: 10.3389/fpls.2019.00552.
- Magalhães, A.C.N. 1985. Análise quantitativa do crescimento. In: FERRI, M.G. *Fisiologia vegetal*. São Paulo: EDUSP. 350p.
- Marchiori, P.E., Ribeiro R.V., da Silva L., Machado R.S., Machado E.C., and Scarpari M.S. 2010. Plant growth, canopy photosynthesis and light availability in three sugarcane varieties. *Sugar Tech*. 12(2): 160-166.
- Marin, R.R., and Jones W. 2014. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. *Sci. Agric*. 7(1):1-16.
- Mauri, R., Coelho R.D., Fraga Jr. E.F., Barbosa F.S., and Leal D.P.V. 2017. Water relations at the initial sugarcane growth phase under variable water deficit. *Eng. Agríc., Jaboticabal*. 37(2): 268-276.
- Medeiros, B.D., da Silva E.C., Nogueira R.J.M.C., Teixeira M.M., Buckeridge M.S. 2013. Physiological limitations in two sugarcane varieties under water suppression and after recovering. *Theoretical and Experimental Plant Physiology* 25(3): 213-222.
- Mello, G., Bueno C.R.P., e Pereira G.T. 2006. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*.10(2): 294-305.



- Monteiro, L.A., and Sentelhas P.C. 2017. Sugarcane yield gap: can it be determined at national level with a simple agrometeorological model? *Crop and Pasture Science* 68: 272–284. <http://dx.doi.org/10.1071/CP16334>.
- Moran, R. 1982. Formulae for determination of chlorophyll pigments extracted with N.N-dimethylformamide. *Plant Physiol.* 69: 1376-1381.
- Naranjo de la F. J., Salgado G. S., Lagunes-Espinoza L.C., Carrillo Avila E., Palma-López D.J. 2006. Changes in the properties of a Mexican Fluvisol following 30 years of sugarcane cultivation. *Soil & Tillage Research* 88(1-2): 60-167.
- NOM-021-RECNAT-2000. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. Publicada el 31 de diciembre de 2002. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, D.F.
- Oliveira, R.A., Duros E., Zambon C.J.L., Weber H., Ido T.O., Bessalho-Filho J.C., Zufellato-Rivas K.C., and Silca T.D.K. 2007. Área foliar em três cultivares de cana de açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. *Pesp. Agropec. Trop.* 37(2): 71-76.
- Pammenter, N.W. and Allison J.C.S. 2002. Effects of treatments potentially influencing the supply of assimilate on its partitioning sugarcane. *J. Exp. Bot.* 53: 123-129.
- Patrignani, A. and Ochsner T.E. 2015. Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. *Agronomy Journal* 107(6): 2312-2320.
- Pereira de Souza, A., and Buckeridge M.S. 2014. Photosynthesis in sugarcane and its strategic importance to face the global climatic change, p.359-364. In Luis Augusto Barbosa Cortez (Coord.). *Sugarcane bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability*, São Paulo: Editora Edgard Blücher. [http://dx.doi.org/10.5151/BlucherOA-Sugarcane-SUGARCANEETHANOL\\_36](http://dx.doi.org/10.5151/BlucherOA-Sugarcane-SUGARCANEETHANOL_36).

- Poorter, H. and Gamier E. 1996. Plant growth analysis: an evaluation of experimental design and computational methods. *Journal of Experimental Botany* 47(302): 1343-1351.
- Radha, J., Kulshreshtha N., Shahi H.N., Solomon S., and Chandra A. 2010. Effect of leaf stripping on cane and sugar yield in sugarcane. *Sugar Tech* 12(1): 70-71.
- Rae, A.L., Martinelli A.P., and Dornelas M.C. 2014. Chapter 2. Anatomy and morphology. In: *Sugarcane: Physiology, biochemistry and functional biology*. P.H. Moore and F.C. Betha (Eds.). John Wiley & Sons, Inc. USA. <https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch2>.
- Rahman, M. R., Islam A.H.M.H., and Rahman M.A. 2004. NDVI derived sugarcane area identification and crop condition assessment. *Plan Plus*. 1(2): 1-12. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.612.5323&rep=rep1&type=pdf>
- Richards, L.A. 1974. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Laboratorio de salinidad de los E.U.A. UTHEA Noriega editores , Mexico. 172 p.
- Rodrigues, F., Blasch G., Defourny P., Ortiz-Monasterio J., Schulthess U., Zarco-Tejada P., and Gérard B. 2018. Multi-temporal and spectral analysis of high-resolution hyperspectral airborne imagery for precision agriculture: Assessment of wheat grain yield and grain protein content. *Remote Sensing*. 10(6): 930.
- Romero, E.R. 2009. Manual del cañero. 1era edición ISBN 978-987-21283-7-1. Editado por Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) Tucuman Argentina 232 p.
- Rouse, J.W., Haas R.H., Deering D.W. and Sehell J.A. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation.

Final Rep. RSC 1978-4, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station.

Salgado-García, S., Castelán-Estrada M., Aranda-Ibañez E.M., Ortiz-Laurel H., Lagunes-Espinoza L.C., y Córdova-Sánchez S. 2016. Calidad de jugos de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) según el ciclo de cultivo en Chiapas, México. *Agroproductividad* 9(7): 23-28.

Salgado, G.S., Lagunes E.L.C., Núñez E.R., Ortiz G.C.F., Bucio A.L., y Aranda I.E.M. 2013a. Caña de azúcar: Producción sustentable. BBA, Colegio de Postgraduados-Mundi Prensa. México, D.F. 520 p. ISBN: 9786077150916.

Salgado, G.S., Núñez E. R., y Bucio A. L. 2003. Determinación de la dosis óptima económica de fertilización en caña de azúcar. *Terra Latinoamericana* 21(2): 267-272.

Salgado-García, S., Palma-López D.J., Zavala-Cruz J., Lagunes-Espinoza L.C., Castelán-Estrada M., Ortiz-García C.F., Juárez-López J.F., Ruiz-Rosado O., Armida-Alcudia L., y Rincón-Ramírez J.A. 2013b. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilizantes en caña de azúcar (SIRDF): Ingenio Presidente Benito Juárez. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México. 84 p.

Salgado-García, S., Palma-López D.J., Zavala-Cruz J., Lagunes-Espinoza L.C., Castelán-Estrada M., Ortiz-García C.F., Juárez-López J.F., Ruiz-Rosado O., Armida-Alcudia L., Rincón-Ramírez J.A., y Córdova-Sánchez S. 2011. A Program of Sustainable Fertilization for the Sugar Factory 'Benito Juarez' in Tabasco, Mexico. *Avances en Investigación Agropecuaria* 15(3): 45-65.

Salgado-García, S., Palma-López D.J., Zavala-Cruz J., Lagunes-Espinoza L.C., Ortiz-García C.F., Castelán-Estrada M., Guerrero-Peña A., Aranda-Ibañez E.M., Moreno-Cáliz E., y Rincón-Ramírez J.A. 2010. Lotificación del campo cañero: una metodología para iniciar la agricultura de precisión en ingenios de México. *Interciencia* 35(3): 183-190.

- Salgado-García, S., Palma-López D.J., Lagunes-Espinoza L.C., Ortiz-García C.F., y Ascencio-Rivera J.M. 2004 Sistema integrado para recomendar dosis de fertilizantes en caña de azúcar (SIRDF): Ingenio Santa Rosalía. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México. 69 p.
- Salgado-García, S., Palma-López D.J., Lagunes-Espinoza L.C., Ortiz-García C.F., y Ascencio-Rivera J.M. 2005. Bases para generar un programa sustentable de fertilización en un ingenio de Tabasco, México *Interciencia*. 30 (7): 395-403.
- Sánchez, N.F. 1972. *Materia Prima: Caña de Azúcar*. Impreso en Talleres Larios e Hijos, impresores, S.A. 1ª. Ed. México. Porrúa Hnos. y Cía. S.A. pp. 2,4,8.
- Sandhu, H.S., Gilbert R.A., McCray J.M., Perdomo R., Eiland B., Powell G., and Montes G. 2012. Relationships among leaf area index, visual growth rating, and sugarcane yield. *Journal American Society of Sugar Cane Technologists* 32: 1-14.
- Scarpari, M. S., and Ferreira de Beauclair E.G. 2008. Spatial-temporal variation of leaf area index and brix in sugarcane. *Bragantia* 67(1): 35-41.
- Scarpari, M. S., and Ferreira de Beauclair E.G. 2009. Physiological model to estimate the maturity of sugarcane. *Scientia Agricola* 66(5): 622-628.
- Scarpari, M. S., and Ferreira de Beauclair E.G. 2004. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. *Scientia Agricola* 61(5): 486-491.
- Sharanappa, K., and Chandrashekar C.P. 2015. Growth indices and yield of sugarcane genotypes under organic, inorganic and integrated nutrient management practices. *Karnataka J. Agric. Sci.* 28(3): 322-326.
- Silva, V.S.G., Oliveira M.W., Oliveira D.C., Oliveira T.B.A., Pereira M.G., and Nogueira C.H.C. 2017. Nutritional diagnosis of sugarcane varieties in a Yellow Oxisol during three agricultural seasons. *African Journal of Agricultural Research* 12(1): 50-57.

- Simões, M.D.S., Rocha J.V. and Lamparelli R.A.C. 2005a. Spectral variables, growth analysis and yield of sugarcane. *Scientia Agricola* (Piracicaba, Brazil). 62: 199–207.
- Simões, S. M., R. J. Vieira, and L. R. A. Camargo. 2005b. Growth indices and productivity in sugarcane. *Scientia Agricola* (Piracicaba, Braz.). 62(1): 23-30.
- Singels, A., Jones M., Marin F., Ruane A., and Thorburn P. 2013. Predicting climate change impacts on sugarcane production at sites in Australia, Brazil and South Africa using the Canegro model. *Sugar Tech*. DOI 10.1007/s12355-013-0274-1. Publicado on line 27 november 2013.
- Smith, D.M., Inman-Bamber N.G., and Thorburn P.J. 2005. Growth and function of the sugarcane root system. *Field Crops Research* 92(2-3): 169-183.
- Tejera, N. A., Rodés R. and Ortega E. 2007. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. *Field Crops Research* 102: 67–72.
- Teruel, D.A., Barbieri V., Ferraro Júnior L.A. 1997. Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. *Scientia Agricola* 5: 39-44.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of the Environment* 8:127-150.
- Váldez B. A., Guerrero P.A., García-López E. y Obrador O.J.J.. 2009. Manual para el cultivo y producción de la caña de azúcar. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas Tabasco. México, 1-3 pp.
- Van Heerden, P.D., Donaldson R.A., Watt D.A., and Singels A. 2010. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. *Journal of Experimental Botany* 61(11): 2877-2887.
- Vasantha, S., Gupta C., and Shekinah D.E. 2014. Physiological studies on tiller production and its senescence in sugarcane-response comparison between plant and ratoon crops. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 84(1): 24-27.

- Verma, A. K., Garg P.K., Hari P.K.S., and Dadhwal V.K. 2019. Modelling of sugarcane yield using LISS-IV data based on ground LAI and yield observations. Geocarto International Pp.1-18.
- Wegener, M. K., Jones C.A., and McLeod I.M. 1995. Development and application of a simulation model for sugarcane. In Proceedings XXI Congress of ISSCT, Bangkok (Thailand). 5-14 Mar 1992.
- Wellburn, A. 1994. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. J. Plant Physiol. 144: 307-313.
- Welles, J. M., and Cohen, S. 1996. Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. Journal of Experimental Botany 47(9): 1335-1342.
- Zhao, D. and Li Y.-R. 2015. Climate Change and Sugarcane Production: Potential Impact and Mitigation Strategies. International Journal of Agronomy. Volume 2015, Article ID 547386, 10 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/547386>

## VII. ANEXOS

**Cuadro A 1.** Medias de Tukey de las variables de crecimiento y acumulación de biomasa de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Edad, meses (GDD)	Variedad	Suelo	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Biomasa tallos (kg ha <sup>-1</sup> )	Biomasa hojas (kg ha <sup>-1</sup> )	Biomasa total (kg ha <sup>-1</sup> )
3 (2128°)	CP 72-2086	Fleu	108.16 f	26.27 efg	18606.5 efg	30122.66 bc	48729.16 defg
3 (2203°)		Vreu	52.91 g	24.61 fg	7887.82 fg	15861.28 cde	23749.1 ghi
6 (3086°)	CP 72-2086	Fleu	199.86 e	28.11 cdef	49637.46 cd	21364.74 bcde	71002.22 bcd
6 (3191°)		Vreu	106.82 f	23.79 g	21179.76 efg	15502.88 cde	36682.66 efgh
9 (4346°)	CP 72-2086	Fleu	233.74 d	30.16 bcd	32175.24 de	32234.5 bc	64409.76 cde
9 (4529°)		Vreu	234.14 d	<b>36.4 a</b>	29599.16 def	29196.02 bc	58795.16 cdef
11 (5004°)	CP 72-2086	Fleu	<b>479.24 a</b>	30.63 bc	<b>92515.72 a</b>	<b>49203.14 a</b>	<b>141718.88 a</b>
11 (5225°)		Vreu	<b>418.42 b</b>	26.69 defg	67578.48 bc	26696.86 bc	<b>94275.35 b</b>
3 (2203°)	MEX 69-290	Fleu	39.33 g	18.11 h	2095.08 g	6188.22 e	8283.3 i
3 (2231°)		Vreu	60.5 g	29.98 bcde	4437.6 g	10229.9 de	14667.54 hi
6 (3191°)	MEX 69-290	Fleu	104.56 f	24.4 fg	15021.6 efg	6524.18 e	21545.8 ghi
6 (3218°)		Vreu	120.58 f	25.1 fg	20651.12 efg	10059.08 de	30710.2 fghi
9 (4529°)	MEX 69-290	Fleu	246.62 d	35.98 a	23107.06 efg	<b>29159.9 bc</b>	52266.98 cdef
9 (4535°)		Vreu	251.28 d	31.47 bc	28322.64 def	<b>28765.02 bc</b>	57087.62 cdef
11 (5630°)	MEX 69-290	Fleu	<b>409.42 b</b>	28.06 cdef	55632.6 bc	24447.7 bcd	<b>80080.3 bc</b>
11 (5619°)		Vreu	386.06 c	<b>32.84 ab</b>	<b>74053.64 ab</b>	23637.46 bcd	<b>97691.12 b</b>
		DMS	21.47	3.87	22890.27	15477.61	28096.64

(GDD)= grados días desarrollo, Fleu: fluvisol eútrico, VReu= vertisol eútrico. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas entre tratamientos (P≤0.05).

**Cuadro A 2.** Cuadrados medios del ANOVA de número de tallos, LAI, NDVI y pigmentos fotosintéticos de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Cuadrados medios								
Factor de variación	GL	Núm. de tallos	IAF	NDVI	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total	Carotenoides
ug ml <sup>-1</sup>								
V	1	1324.96*	9.42*	0.11*	4.97*	0.56 NS	8.85*	0.02* NS
SS	1	112.36 NS	0.56 NS	0.01*	5.85*	0.2 NS	8.18*	0.01 NS
FM	4	455.96*	134.98*	0.32*	20.22*	1.18*	31.07*	0.85*
V*SS	1	1681*	0.06 NS	0.06*	0.81 NS	0.31 NS	2.13 NS	0.07 NS
V*FM	4	221.86*	1.04*	0.02*	0.34 NS	0.06 NS	0.6 NS	0.04 NS
SS*FM	4	558.46*	0.8*	0*	1.06 NS	0.04 NS	1.35 NS	0.05 NS
V*SS*FM	4	603.3*	7.27*	0.01*	2.14*	0.26 NS	3.3*	0.11*
Error	80	49.7	0.24	0.08	0.75	0.2	1.09	0.04
CV (%)		22	12	5	21	41	20	18

V= variedad, SS= subunidad de suelo, FM= fecha de muestreo, GL= grados de libertad, \*=P<0.05,

\*\*=P<0.01, NS= no significativo.



**Cuadro A 3.** Medias de Tukey para número de tallos, LAI, NDVI y pigmentos fotosintéticos de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Edad (meses)	Variedad	Suelo	Núm. de tallos	IAF	NDVI	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total	Carotenoides
						ug ml <sup>-1</sup>			
1 (701°)	CP 72-2086	Fleu	38.4 bc	0.88 hij	0.57 fgh	5.04 abcd	1.21 a	6.24 abcdef	1.2 abcd
1 (705°)		Vreu	36.8 bcde	1.16 hij	0.41 i	3.2 def	0.86 a	4.06 efgh	0.85 bcdef
3 (1641°)	CP 72-2086	Fleu	48.4 a	2.52 g	0.7 bcd	5.35 abc	1.42 a	6.78 abc	1.15 abcde
3 (1699°)		Vreu	37.8 abcd	2.59 g	0.63 efgh	4.43 abcdef	1.26 a	5.69 abcdefg	1.11 abcdef
6 (3086°)	CP 72-2086	Fleu	28.6 cdef	5.94 bcd	0.64 def	3.46 cdef	0.98 a	4.43 cdefgh	0.79 cdef
6 (3191°)		Vreu	31.4 cdef	3.8 f	0.57 gh	2.9 ef	0.78 a	3.68 fgh	0.71 ef
9 (4346°)	CP 72-2086	Fleu	31.6 cdef	5.26 de	0.69 bcde	5.52 ab	1.71 a	7.23 a	1.09 abcdef
9 (4529°)		Vreu	29.6 cdefg	7.45 a	0.68 bcde	5.53 a	1.23 a	6.76 abc	1.23 abc
11 (5004°)	CP 72-2086	Fleu	38.6 bc	6.97b	0.8 a	3.69 abcdef	0.89 a	4.58 cdefgh	1.27 ab
11 (5225°)		Vreu	29.6 cdefg	7.57 a	0.73 ab	3.67 abcdef	1.07 a	4.75 bcdefgh	1.25 ab
1 (705°)	MEX 69-290	Fleu	31.2 cdefg	0.26 j	0.3 j	3.38 cdef	0.83 a	4.21 defgh	0.86 bcdef
1 (709°)		Vreu	19.2 fg	0.38 ij	0.35 ij	4.17 abcdef	1.05 a	5.22 abcdef	1.12 abcde
3 (1700°)	MEX 69-290	Fleu	15.2 g	1.51 ghi	0.56 h	4.9 abcde	1.13 a	6.03 abcdef	1.07 abcdef
3 (1730°)		Vreu	59 a	1.97 gh	0.63 defg	3.53 bcdef	0.87 a	4.4 cdefgh	0.88 abcdef
6 (3191°)	MEX 69-290	Fleu	20.8 efg	4.28 ef	0.57 gh	3.03 ef	0.77 a	3.8 fgh	0.75 def
6 (3218°)		Vreu	32.4 bcdef	5.69 cd	0.56 gh	2.45 f	0.75 a	3.21 h	0.66 f
9 (4529°)	MEX 69-290	Fleu	29.4 cdefg	6.18 bcd	0.66 cde	5.34 abc	1.25 a	6.59 abcd	1.21 abc
9 (4535°)		Vreu	31.8 cdef	5.42 cde	0.67 bcde	5.58 a	1.56 a	7.13 ab	1.32 a
11 (5225°)	MEX 69-290	Fleu	27.4 cdefg	6.51 abc	0.73 bc	3.28 def	0.92 a	4.2 defgh	1.19 abcd
11 (5219°)		Vreu	21.6 defg	5.8 cd	0.73 ab	2.68 f	0.79 a	3.47 gh	1.28 ab
	DMS		16.34	1.14	0.072	2.0	1.03	2.42	0.45

(°)= grados días calor, Fleu: fluvisol eútrico, VReu= vertisol eútrico. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas entre tratamientos ( $P \leq 0.05$ ).

**Cuadro A 4.** Medias de Tukey para número de tallos, LAI, NDVI y pigmentos fotosintéticos de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos tipos de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Edad	Variedad	Suelo	Núm. De tallos	IAF	NDVI	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total ug ml-1	Caratenoides
1 (701°)	CP 72-2086	Fleu	48.4 ab	0.88 st	0.57 n	5.04 abcd	1.21 ab	6.24 abcdefg	1.2 abcdef
1 (705°)		Vreu	36.8 bcdefg	1.16 rst	0.41 p	3.2 cdefgh	0.89 ab	4.06 efghijk	0.85 abcdefgh
2 (1166°)	CP 72-2086	Fleu	40 bcde	1.96 qrs	0.57 n	5.01 abcde	1.23 ab	6.24 abcdefg	1.19 abcdef
2 (1198°)		Vreu	34.8 bcdefg	1.57qrst	0.54 no	5.61 a	1.33 ab	6.94 abc	1.13 abcdefgh
3 (1641°)	CP 72-2086	Fleu	48.4 ab	2.52 pqr	0.71 cdefghij	5.35 abc	1.42 ab	6.78 abcd	1.15 abcdefg
3 (1699°)		Vreu	37.8 bcdefg	2.59 opqr	0.65 klm	4.43 abcdefg	1.26 ab	5.69 abcdefghij 6.16	1.11 abcdefg
4 (2128°)	CP 72-2086	Fleu	43 abcd	4.34 ijklmn	0.8 ab	4.82 abcdef	1.34 ab	abcdefg	1.23 abcd
4 (2203°)		Vreu	32.2 bcdefgh	4.13 klmn	0.64 lm	5.01 abcde	1.46 ab	6.47 abcdef	1.24 abc
5 (2659°)	CP 72-2086	Fleu	35.2 bcdefg	4.47 hijklmn	0.66 jklm	2.96 defgh	0.76 ab	3.71 ghijk	0.7 efgh
5 (2730°)		Vreu	38 bcdefg	4.4 hijklmn	0.63 m	2.77 efgh 3.46	0.76 ab	3.54 hijk	0.68 fgh
6 (3086°)	CP 72-2086	Fleu	28.6 defgh	5.94 defg	0.72 cdefgh	abcdefg	0.98 ab	4.43 cdefghijk	0.79 bcdefgh
6 (3191°)		Vreu	31.4 bcdefgh	3.8 mnop	0.69 efghijk	2.9 defgh	0.78 ab	3.68 ghijk 5.92	0.71 defgh
7 (3632°)	CP 72-2086	Fleu	38 bcdefg	6.13 cdef	0.73 cdefg	4.69 abcdefg 4.04	1.23 ab	abcdefghi 5.06	1.03 abcdefgh
7 (3762°)		Vreu	34.6 bcdefg	6.87 abcd	0.7 efghijk	abcdefg	1.03 ab	abcdefghijk	0.97 abcdefgh
8 (4039°)	CP 72-2086	Fleu	33.4 bcdefgh	6.58 abcde	0.75 bcd	4.97 abcde 4.12	1.69 a	6.66 abcde 5.4	1.09 abcdefgh
8 (4203°)		Vreu	34.6 bcdefg	7.64 a	0.72 cdefgh	abcdefg	1.29 ab	abcdefghij	1.23 abcd

9 (43451°)	CP 72-2086	Fleu	31.6 bcdefgh	5.26 efghijkl	0.76 abc	5.52 ab	1.71 a	7.23 a	1.27 abc
9 (4529°)		Vreu	29.6 bcdefgh	7.45 abc	0.74 cde	5.53 ab	1.23 ab	6.76 abcd	1.25 abc
10 (4675°)	CP 72-2086	Fleu	36.2 bcdefg	6.18 bcdef	0.74 cdefg	4.57 abcdefg	1.17 ab	5.74	1.07 abcdefgh
10 (4876°)		Vreu	35.6 bcdefg	7.64 a	0.73 cdefg	5.1 abcd	1.34 ab	6.44 abcdef	1.18 abcdefg
11 (5004°)	CP 72-2086	Fleu	38.6 bcdef	6.97 abcd	0.82 a	3.69	0.89 ab	4.58	0.85 abcdefgh
11 (5225°)		Vreu	29.6 bcdefgh	7.57 ab	0.74 cdef	3.67	1.07 ab	4.75	0.84 abcdefgh
1 (705°)	MEX 69-290	Fleu	31.2 bcdefg	0.26 t	0.3 q	3.38	0.83 ab	4.21 defghijk	0.86 abcdefgh
1 (709°)		Vreu	19.2 gh	0.38 t	0.35 q	4.17	1.05 ab	5.22	1.12 abcdefgh
2 (1198°)	MEX 69-290	Fleu	44.2 abcd	1.4 qrst	0.5 o	3.69	0.96 ab	4.65	0.85 abcdefgh
2 (1219°)		Vreu	47.8 abc	0.83 st	0.49 o	3.55	0.92 ab	4.47	0.7 efgh
3 (1699°)	MEX 69-290	Fleu	15.2 h	1.51 qrst	0.57 n	4.9 abcdef	1.13 ab	6.03	1.07 abcdefgh
3 (1730°)		Vreu	59 a	1.97 qrs	0.56 n	3.53	0.87 ab	5.2	0.88 abcdefgh
4 (2203°)	MEX 69-290	Fleu	32.6 bcdefgh	2.69 opq	0.57 n	4.13	1.06 ab	5.28	0.99 abcdefgh
4 (2231°)		Vreu	32.8 bcdefgh	3.97 lmno	0.69 ghijklm	4.18	1.1 ab	4.89	1.04 abcdefgh
5 (2730°)	MEX 69-290	Fleu	36.2 bcdefg	3.5 nop	0.68 hijklm	4.24 abcdefg	0.65 b	5.2	0.82 abcdefgh
5 (2756°)		Vreu	40.2 abcde	4.02 klmno	0.67 ijklm	1.96 h	0.65 b	2.59 k	0.61 h
6 (3191°)	MEX 69-290	Fleu	20.6 fgh	4.28 jklmn	0.73 cdefg	3.03 defgh	0.77 ab	3.8 fghijk	0.75 cdefgh
6 (3218°)		Vreu	32.4 bcdefgh	5.69 defghij	0.69 fghijkl	2.45 gh	0.75 ab	3.21 jk	0.66 gh
7 (3762°)	MEX 69-290	Fleu	31.6 bcdefgh	5.73 defghi	0.71 cdefghij	5.32 abc	1.27 ab	6.59 abcde	1.19 abcdef
7 (3784°)		Vreu	35.6 bcdefg	4.65	0.71 cdefghij	3.26 cdefgh	0.83 ab	4.09 defghijk	0.78 bcdefgh

8 (4203°)	MEX 69-290	Fleu	32 bcdefgh	5.11 fghijklm 4.68	0.73 cdefg	4.14 abcdefgh	1.52 ab	5.65 abcdefghij 5.98	1.21 abcde
8 (4216°)		Vreu	28.defgh	ghijklmn	0.74 cdefg	4.4 abcdefg	1.58 ab	abcdefghi	1.32 a
9 (4529°)	MEX 69-290	Fleu	29.4 cdefgh	6.18 bcdef	0.74 bcde	5.34 abc	1.25 ab	6.59 abcde	1.19 abcdef
9 (4535°)		Vreu	31.8 bcdefgh	5.42 efghijk	0.74 cdefg	5.58 a	1.56 ab	7.13 ab 5.88	1.28 ab
10 (4876°)	MEX 69-290	Fleu	32.4 bcdefgh	6.24 abcdef	0.72 cdefghi	4.7 abcdefg	1.18 ab	abcdefghij	1.09 abcdefgh
10 (4874°)		Vreu	33.8 bcdefgh	6.36 abcdef	0.71 defghij	5.07 abcd	1.3 ab	6.37 abcdefg	1.22 abcde
11 (5225°)	MEX 69-290	Fleu	21.6 efgh	6.51 abcdef	0.74 cdef	3.28 bcdefgh	0.92 ab	4.2 defghijk	0.76 cdefgh
11 (5219°)		Vreu	27.4 defgh	5.8 defgh	0.74 cdefg	2.68 fgh	0.79 ab	3.47 ijk	0.66 gh
DMS			18.95	1.44	0.053	2.25	0.9887	2.689	0.45

(°)= grados días calor, Fleu: fluvisol eútrico, VReu= vertisol eútrico. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas entre tratamientos

( $P \leq 0.05$ ).

**Cuadro A 5.** Cuadrados medios del ANOVA de la cobertura de cultivo de las variedades Méx 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Factor de variación	GL	Cobertura de cultivo
V	1	12104**
SS	1	18507.2 **
FM	4	102809.01**
V*SS	1	1139.39**
V*FM	4	3338.24**
SS*FM	4	4199.53**
V*SS*FM	4	2652.6**
Error	980	87.38**
CV (%)		14

V= variedad, SS= subunidad de suelo, FM= fecha de muestreo, GL= grados de libertad, \*\*=P<0.01, \*\*=P<0.01, NS= no significativo.

**Cuadro A 6.** Medias de Tukey para la cobertura de cultivo de las variedades MEX 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos tipos de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Edad (meses)	Variedad	Suelo	Núm. de tallos
1 (701°)	CP 72-2086	Fleu	53.9 e
1 (705°)		Vreu	41.14 g
2 (1165°)	CP 72-2086	Fleu	73.35 c
2 (1198°)		Vreu	50.98 ef
3 (1640°)	CP 72-2086	Fleu	79.82 bc
3 (1699°)		Vreu	65.43 d
4 (2128°)	CP 72-2086	Fleu	81.49 b
4 (2203°)		Vreu	77.41 bc
5 (2659°)	CP 72-2086	Fleu	100 a
5 (2730°)		Vreu	100 a
1 (705°)	MEX 69-290	Fleu	45.29 fg
1 (709°)		Vreu	14.11 h
2 (1198°)	MEX 69-290	Fleu	56.21 e
2 (1219°)		Vreu	53.73 e
3 (1699°)	MEX 69-290	Fleu	66.41 d
3 (1730°)		Vreu	64.44 d
4 (2203°)	MEX 69-290	Fleu	78.55 bc
4 (2231°)		Vreu	75.27 bc
5 (2730°)	MEX 69-290	Fleu	100 a
5 (2759°)		Vreu	100 a
	DMS		6.64

(°)= grados días calor, Fleu: fluvisol eútrico, VReu= vertisol eútrico. Letras diferentes por columna indican diferencias significativas entre tratamientos ( $P \leq 0.05$ ).