



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

PROGRAMA PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

**DINÁMICA DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE CAÑA DE
AZÚCAR EN DOS CONDICIONES EDAFOCLIMÁTICAS
DEL INGENIO SANTA ROSALÍA, TABASCO**

MANUEL SÁNCHEZ JIMÉNEZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO

2022

La presente tesis, titulada: “**Dinámica de crecimiento del cultivo de caña de azúcar en dos condiciones edafoclimáticas del Ingenio Santa Rosalía, Tabasco**” realizada por el alumno **Manuel Sánchez Jiménez** 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

POSGRADO EN PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO

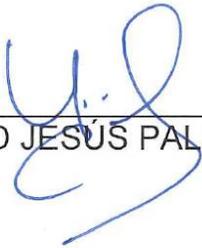
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA:



DRA. LUZ DEL CARMEN LAGUNES ESPINOZA

ASESOR:



DR. DAVID JESÚS PALMA LÓPEZ

ASESOR:



DR. SAMUEL CORDOVA SÁNCHEZ

H. CÁRDENAS, TABASCO, MÉXICO, JUNIO DE 2022

DINÁMICA DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR EN DOS CONDICIONES EDAFOCLIMÁTICAS EN EL INGENIO SANTA ROSALÍA, TABASCO

Manuel Sánchez Jiménez, M. C.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

El objetivo fue evaluar la evolución del crecimiento de las variedades CP 72-2086 y Mex 69-290 durante dos ciclos de crecimiento, en respuesta a dos subunidades de suelo (Fluvisol eútrico, FLeu y Vertisol eútrico, VReu), y su relación con el índice de área foliar (IAF) y el índice de vegetación de las diferencias normalizadas (NDVI), variables de calidad y climáticas. El número de tallos, el diámetro y altura de tallo, la biomasa foliar, biomasa de tallos y la biomasa total se determinaron en dos metros lineales a los 3, 6, 9 y 11 meses; el IAF y el NDVI mensualmente. A los 11 meses el porcentaje de °Brix, Pol, Fibra, Azúcares reductores, pureza y humedad. El experimento se realizó en parcelas de productores del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Tabasco, durante el ciclo la zafra 2019/2020 y 2020/2021. Los datos climatológicos se tomaron en estaciones próximas a las parcelas de estudio. Los datos se analizaron bajo un diseño anidado cruzado completamente al azar donde el factor anidado fue la variedad dentro del suelo, y considerando como factores a las variedades, subunidades de suelo y ciclos. Los resultados muestran diferencias varietales por subunidad de suelo para las variables evaluadas. CP 72-2086 presentó mayor altura, número de tallos, IAF, en la subunidad FLeu que la Mex 69-290 en las subunidades VReu durante el ciclo resoca 1; Mex 69-290 mantiene este comportamiento en la Resoca 2. La mayor producción de biomasa de tallos ($t\ ha^{-1}$) de CP 72-2086 se da FLeu, mientras que la de Mex 69-290 en VReu. Las correlaciones de Pearson fueron altas entre el NDVI con altura ($r=0.78$) y diámetro de tallos ($r=0.58$) e IAF (0.61); y el IAF con altura (0.63), biomasa tallos (0.55), del follaje (0.57) y total (0.66).

Palabras claves: Caña de azúcar, suelo, LAI, NDVI, rendimiento

GROWTH DYNAMICS OF THE SUGAR CANE CROPS UNDER TWO EDAPHOCLIMATIC CONDITIONS IN THE SANTA ROSALÍA MILL, TABASCO.

Manuel Sánchez Jiménez, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

The objective was to evaluate the evolution of the growth of the varieties CP 72-2086 and Mex 69-290 during two growth cycles, in response to two soil subunits (Fluvisol eutricto, FLeu and Vertisol eutricto, VReu), and its relationship with the leaf area index (LAI) and normalized difference vegetation index (NDVI), quality and climatic variables. The number of stems, stem diameter and height, foliar biomass, stem biomass and total biomass were determined in two linear meters at 3, 6, 9 and 11 months; the LAI and the NDVI monthly. At 11 months the percentage of °Brix, pol, fiber, reducing sugars, purity and humidity. The experiment was carried out in plots of producers in the supply area of the Ingenio Santa Rosalía, Tabasco, during the 2019/2020 and 2020/2021 harvest cycles. Climatological data were taken at stations close to the study plots. The data were analyzed under a completely randomized crossed nested design where the nested factor was the variety within the soil, and considering varieties, soil subunits and cycles as factors. The results show varietal differences by soil subunit for the evaluated variables. CP 72-2086 presented greater height, number of stems, LAI, in the FLeu subunit than Mex 69-290 in the VReu during first ratoon cycle, Mex 69-290 maintains this behavior in the second ratoon. The highest stem biomass production ($t\ ha^{-1}$) of CP 72-2086 is given in FLeu, while that of Mex 69-290 in VReu. Pearson's correlations were high between NDVI with height ($r=0.78$) and stem diameter ($r=0.58$) and LAI (0.61); and the LAI with height (0.63), stem biomass (0.55), foliage biomass (0.57) and total biomass (0.66).

Keywords: Sugarcane, growth, soil, LAI, DVI, yield

DEDICATORIA

A Dios

Por darme las fuerzas de poder culminar este reto en mi vida personal, porque a pesar de muchas dificultades y obstáculos nunca me soltó de la mano y me permitió llegar firme al objetivo.

A mi madre Doris.

Por darme cada día un consejo, por siempre procurar por mi, por brindarme sus conocimientos y paciencia durante mi vida, por ser siempre un apoyo incondicional, gracias por tanto amor.

A mi padre Manuel.

Por los ejemplos de perseverancia y constancia, de no temerle al trabajo y de saber valorar cada situación, por verle lo positivo siempre a la vida y afrontar cada problema de una forma tranquila, gracias por tanto amor.

A mis hermanos.

Cristi, Migue, Ceci, por estar siempre conmigo, darme consejos cuando he tenido problemas personales y por darme el ejemplo de cómo salir adelante a pesar de las adversidades. Los 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 siempre hemos estado en momentos difíciles, que nos hemos sabido apoyar para salir adelante y que hemos compartido el conocimiento para lograr cada uno nuestros objetivos profesionales y personales.

AGRADECIMIENTOS

A Dios.

Por haberme dado el valor, fe y fuerzas necesarias para alcanzar un objetivo más dentro de mi vida profesional

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Gracias totales a la institución que me brindó la oportunidad para forjarme profesionalmente, quien instituyó en mi persona las claves para desarrollarme de forma plena y feliz en el área donde hoy no me arrepiento estar.

Al Colegio de Postgraduados Campus-Tabasco.

Por haberme impulsado, acercado y haberme dado la oportunidad de desarrollarme en el campo de la investigación, por el financiamiento otorgado y por el acceso a la infraestructura de laboratorios.

Al CONACYT.

Por haberme brindado el apoyo económico durante estos dos años para poder cumplir un objetivo más dentro de mi vida académica, ya que gracias a ello pude sostener mis estudios, y lograr un título más en mi vida. Gracias.

Al Dr. Sergio Salgado García.

Por haberme dado la confianza, la oportunidad y la seguridad que necesitaba para poder empezar y culminar un objetivo más en mi vida, porque sus consejos y sabias palabras me hicieron ver claramente de todo lo que puedo llegar a ser capaz, gracias totales. D.E.P.

A la Dra. Luz del Carmen Lagunes Espinoza.

Por haber asumido este reto, por sus enseñanzas en el aula, en sus sugerencias y por su tiempo invertido en cada una de las reuniones que sirvió para mejorar el trabajo actual. Gracias.

Al Dr. Samuel Córdova Sánchez.

Por el apoyo e interés brindado en campo para la toma de muestras, por sus sabios consejos y por las palabras de aliento para seguir adelante. Gracias.

Al Dr. David Jesús Palma López.

Por sus atinadas sugerencias para mejorar este trabajo. Gracias.

Al M.C. Sergio Salgado Velázquez.

Por tu tiempo brindado en apoyarme cuando se me presentaron las dudas en relación con el trabajo actual, por darme los consejos de como poder mejorar la redacción y sobre todo por tu valioso apoyo en la toma y recolección de datos en campo. Gracias.

CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE CUADROS.....	xi
I. INTRODUCCIÓN	12
II. REVISIÓN DE LITERATURA	14
2.1. Producción de caña de azúcar	14
2.2. La caña de azúcar: morfología, desarrollo fenológico y análisis de crecimiento.....	14
2.2.1. Estructura morfológica	14
2.2.3. Características de variedades las variedades CP 72-2086 y Mex 69-290	18
2.3. Índices de área foliar y de vegetación.....	20
2.3.1. Índice de las diferencias normalizadas (NDVI)	20
2.3.2. Índice de área foliar (IAF)	22
2.4. Factores ambientales que influyen el desarrollo fenológico.....	23
2.4.1. Condiciones edáficas.....	25
III. HIPÓTESIS	29
3.1. Hipótesis general.....	29
3.2. Hipótesis específicas.....	29
IV. OBJETIVOS	30
4.1. Objetivo general.....	30
4.2. Objetivos específicos.....	30
V. MATERIALES Y MÉTODOS	31
5.1. Sitio experimental.....	31
5.2. Parcela experimental.....	32
5.3. Análisis de fertilidad de suelos.....	32
5.4. Material biológico.....	33
5.5. Manejo agronómico.....	33
5.6. Variables de estudio.....	34

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
6.1. Características climáticas durante desarrollo fenológico del cultivo	39
6.1.1. Temperatura.....	39
6.1.2. Humedad relativa y precipitación	41
6.2. La fertilidad y humedad de los suelos.....	43
6.3. Acumulación de biomasa, IAF y NDVI.....	46
6.4. Rendimiento de caña y calidad de jugos	61
6.5. Relación entre los índices de área foliar y vegetación con parámetros de crecimiento.....	62
6.6. Relación entre variables climáticas, índices de vegetación y parámetros fisiológicos en caña de azúcar	65
V. CONCLUSIONES.....	66
VI. LITERATURA CITADA.....	67

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Ciclo fenológico del cultivo de caña de azúcar. Tomado de Benvenuti (2005) y FAO (2006). 16
- Figura 2.** Ubicación espacial del Ingenio Santa Rosalía, parcelas en estudio (en número) y estaciones meteorológicas (círculos color verde)..... 31
- Figura 3.** Esquema de la distribución de las subparcelas dentro del área experimental, y de los 2 m lineales para la toma de muestras. 33
- Figura 4.** Detalles de las mediciones de las variables: a) diámetro de tallo, b) altura de tallo, c) biomasa de tallos y d) medición del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI)..... 36
- Figura 5.** Temperaturas promedio máximas (Tmax), mínimas (Tmin) y medias (Tmed) de las estaciones climatológicas: Arena Sexta en el municipio de Cunduacán y cercana a las parcelas 11 y 17 (a), Zapotal en el municipio de Cárdenas y es la más cercana a la parcela 13 (b) y Güiral en el municipio de Huimanguillo y es la más cercana a la parcela 18 (c). 40
- Figura 6.** Humedad relativa promedio y precipitación pluvial acumulada de las estaciones climatológicas: Arena Sexta (a), Zapotal (b) y Güiral (c). 42
- Figura 7.** Promedio de variables de crecimiento (Altura, diámetro y número de tallos) e Índice de área foliar (IAF) de primera y segunda resoca de variedades de caña de azúcar cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco..... 48
- Figura 8.** Altura de tallo de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b); diámetro de tallo de Mex 69-290 (c) y CP 72-2086 (d) durante el crecimiento del ciclo resoca 1 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. FLeu= Fluvisol eútrico, VReu= Vertisol eútrico. 49
- Figura 9.** Altura de tallo del cv. Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b); diámetro de tallo del cv. Mex 69-290 (c) y CP 72-2086 (d) durante el crecimiento de resoca 2 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. FLeu= Fluvisol eútrico, VReu= Vertisol eútrico. 50
- Figura 10.** Número de tallos de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b) en dos metros lineales durante el crecimiento de la resoca 1 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco..... 51
- Figura 11.** Número de tallos de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b) en dos metros lineales durante el crecimiento de la resoca 2 cultivadas en dos

subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco..... 52

Figura 12. Dinámica del índice de área foliar (IAF) del ciclo resoca 1 de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b), cultivadas en dos subunidades de suelo del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. 53

Figura 13. Dinámica del índice de área foliar (IAF) del ciclo resoca 2 de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b), cultivadas en dos subunidades de suelo del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. 54

Figura 14. Desarrollo del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b) durante el ciclo resoca 1, cultivadas en las subunidades de suelo Fluvisol eútrico (FLeu) y Vertisol eútrico (Vreu) del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. 56

Figura 15. Desarrollo del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b) durante el ciclo resoca 2, cultivadas en las subunidades de suelo Fluvisol eútrico (FLeu) y Vertisol eútrico (Vreu) del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. 57

Figura 16. Biomasa de tallos de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b); biomasa follaje de las variedades Mex 69-290 (c) y CP 72-2086 (d); y biomasa total de las variedades Mex 69-290 (e) y CP 72-2086 (f) durante el ciclo de resoca 1 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. FLeu = Fluvisol eútrico, VReu = Vertisol eútrico. 59

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Datos de las parcelas de caña de azúcar utilizadas en el estudio.	32
Cuadro 2. Métodos y unidades de las propiedades fisicoquímicas de los suelos en estudio.....	34
Cuadro 3. Coordenadas de las estaciones meteorológicas cercanas a las parcelas de caña en estudio.	37
Cuadro 4. Análisis de fertilidad de los suelos de las parcelas de caña de azúcar en estudio (0 a 30 cm de profundidad).....	44
Cuadro 5. Curva de retención de humedad de las parcelas de caña de azúcar en estudio.....	44
Cuadro 6. Cuadrados medios del ANOVA de variables de crecimiento, NDI y IAF de las variedades Mex 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.	46
Cuadro 7. Cuadrados medios de efectos principales del ANOVA de variables de crecimiento, NDVI e IAF de las variedades Mex 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.	47
Cuadro 8. Cuadrados medios del ANOVA de la acumulación de biomasa de las variedades Mex 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.	58
Cuadro 9. Medias de rendimiento de caña y de calidad de jugos de dos variedades de caña de azúcar cultivadas en dos subunidades de suelo del área de abastecimiento del ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.	63
Cuadro 10. Correlaciones de Pearson entre el NDVI y el IAF con parámetros de crecimiento y acumulación de biomasa de las variedades Mex 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.....	64
Cuadro 11. Correlaciones de Pearson (R) entre variables climáticas, índices de área foliar y de vegetación y parámetros de crecimiento de las variedades Mex 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.	65

I. INTRODUCCIÓN

El cultivo de caña de azúcar es considerado el principal cultivo proveedor de azúcar en el mundo; en México se introdujo hace 498 años, enfocándose al inicio en la producción de panela y aguardiente, y con la creación del Ingenio de Santa Clara en Michoacán, México, a la producción de azúcar (Salgado-García *et al.*, 2013a). En México, el consumo per cápita de azúcar es alto (47.9 kg), lo que en 2020 generó un consumo nacional aparente de azúcar de 4.8 millones de toneladas anuales (SIAP, 2020). Este consumo es acompañado con la producción de caña de azúcar, actividad que genera más de 450 mil empleos a nivel nacional. En el país, durante la zafra 2020/2021 la caña de azúcar se cultivó en 789,996 ha, de las cuales el estado de Tabasco aportó 38,568 ha (Unión Nacional de Cañeros, 2021).

En Tabasco, se encuentran dos ingenios ubicados en la región de la Chontalpa: el Ingenio Presidente Benito Juárez y el Ingenio Santa Rosalía. El Ingenio Santa Rosalía (ISR) perteneciente a la empresa Grupo Beta San Miguel, se ubica en el municipio de Cárdenas. Este Ingenio ha mejorado sus niveles de productividad, al incrementar de 2006 a 2020, la superficie cultivada de 9,038 a 12,248 ha, y los rendimientos de caña de 41.6 a 56.5 t ha⁻¹. El incremento en rendimientos, aunque ha mejorado aún son inferiores a la media nacional obtenida en la zafra 2020/2021 que fue de 64.9 t ha⁻¹ (CAÑEROS, 2021). En el área de abastecimiento del ISR, las principales variedades cultivadas son Mex 69-290 y CP 72-2086, ambas ampliamente distribuidas a nivel nacional. Estas variedades se encuentran cultivadas en diferentes condiciones edafoclimáticas del área de influencia del ISR. Los estudios realizados para recomendar dosis de fertilización por subunidad de suelo, indican que diferentes dosis de fertilización se deben aplicar dependiendo de la subunidad de suelo para suplir las necesidades del cultivo de caña (Salgado-García *et al.*, 2005). También se ha demostrado que el área de abastecimiento de un ingenio presenta heterogeneidad en tipos de suelos presentes, por lo que se deben de hacer recomendaciones de fertilización y manejo de sitio con base a la variedad (Salgado-Velázquez *et al.*, 2020). Lo anterior implica que las evaluaciones de fertilidad, deben de ser acompañadas por el estudio del crecimiento y

productividad de cada variedad presente en un campo cañero, incluyendo su seguimiento en el tiempo (ciclos plantilla, socas y resocas). Lo que además es afectado por las condiciones ambientales durante el desarrollo fenológico, lo que podría acentuarse por el cambio climático (Zhao y Li, 2015; Mauri *et al.*, 2017).

Los estudios de dinámicas del crecimiento de la caña de azúcar, basados en mediciones secuenciales de la acumulación de biomasa de variables fisiológicas y agronómicas, permiten conocer los cambios que experimenta el cultivo durante su desarrollo en respuesta a las diferentes condiciones agroclimáticas y ciclos de producción (Magalhães, 1985), y son la base para modelar esta respuesta y predecir el rendimiento (Rudorff y Batista, 1990). Entre las variables fisiológicas que deben de incluirse por su relación con la acumulación de biomasa y el rendimiento están el índice de área foliar, el Índice de Vegetación de las Diferencias Normalizadas (NDVI) y las tasas de crecimiento (Dos Santos *et al.*, 2005).

Los estudios conjuntos de recomendación de dosis de fertilización por tipo de suelo dentro del área de abastecimiento de un ingenio azucarero, con las dinámicas de crecimiento de las variedades presentes, en diferentes ciclos de cultivo, ha recibido poca atención en el cultivo de caña de azúcar del estado de Tabasco.

El presente estudio es una primera aproximación a este complejo sistema suelo-planta-clima y sitio específico, dentro de un área de abastecimiento del ingenio Santa Rosalía, y permitiría proveer de información más detallada a los tomadores de decisiones sobre la respuesta del crecimiento de una variedad cañera de acuerdo al ambiente específico donde se cultive, incluyendo su respuesta en el tiempo a través de los ciclos de cultivo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Producción de caña de azúcar

El azúcar se produce en 121 países. En 2021 los principales países productores fueron Brasil, India, China, Tailandia, Pakistán, México, Estados Unidos, Australia e Indonesia (FAOSTAT, 2021). México produjo 53,952,698 toneladas de azúcar, ocupando el sexto lugar como país productor, con un rendimiento promedio de 64.9 t ha⁻¹, y exportó 273,474 toneladas de azúcar refinada. Durante ese año, la producción de caña se realizó en 797 mil hectáreas que abastecieron a 49 ingenios de 15 estados cañeros (Francisco y Fernández, 2021), donde aproximadamente 500 mil familias, más de 180 mil abastecedores de caña, 155 mil jornaleros, 70 mil cortadores, 32 mil transportistas, 35 mil trabajadores sindicalizados, 7,689 trabajadores de confianza y 11,822 jubilados están involucrados (Gómez-Merino *et al.*, 2021). Esta agroindustria genera más de 440 mil empleos directos y beneficios indirectos a más de 2.2 millones de personas en 267 municipios del país, con un valor de producción entre 40 y 50 mil millones de pesos (Secretaría de Agricultura y Desarrollo rural, 2021).

2.2. La caña de azúcar: morfología, desarrollo fenológico y análisis de crecimiento

2.2.1. Estructura morfológica

La caña de azúcar forma parte de la familia Poaceae, y presenta tallos especializados para la acumulación de sacarosa (Rae *et al.*, 2014). Su estructura morfológica está constituida por raíces, tallos, hojas e inflorescencias.

Durante la siembra, en el ciclo plantilla, el sistema radical del brote se forma durante los primeros 50 a 60 días, donde emergen primero las raíces 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, depósitos donde se almacena el azúcar, pueden alcanzar una longitud total de 3 hasta 6 m, dependiendo de la variedad, la condición ambiental y de manejo. El contenido de azúcares en los tallos 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.

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, 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 CO₂ y H₂O, además de ser un factor de ajuste en los modelos de predicción del rendimiento (Sandhu *et al.*, 2012).

La floración natural de la caña es abundante entre el ecuador y los 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-García *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).

2.2.2. Etapas de desarrollo fenológico

El ciclo fenológico de la caña de azúcar comprende cuatro etapas (Figura 1): 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). Cada etapa con una duración de 5 a 6 meses en ciclos de plantilla y de 4 a 5 meses en socas. La duración de las etapas fenológicas puede variar dependiendo de la fecha de siembra en las plantillas o de corte en las socas, prácticas de manejo y condiciones climáticas presentes durante el desarrollo del cultivo (González *et al.*, 1974). Aunque, 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).

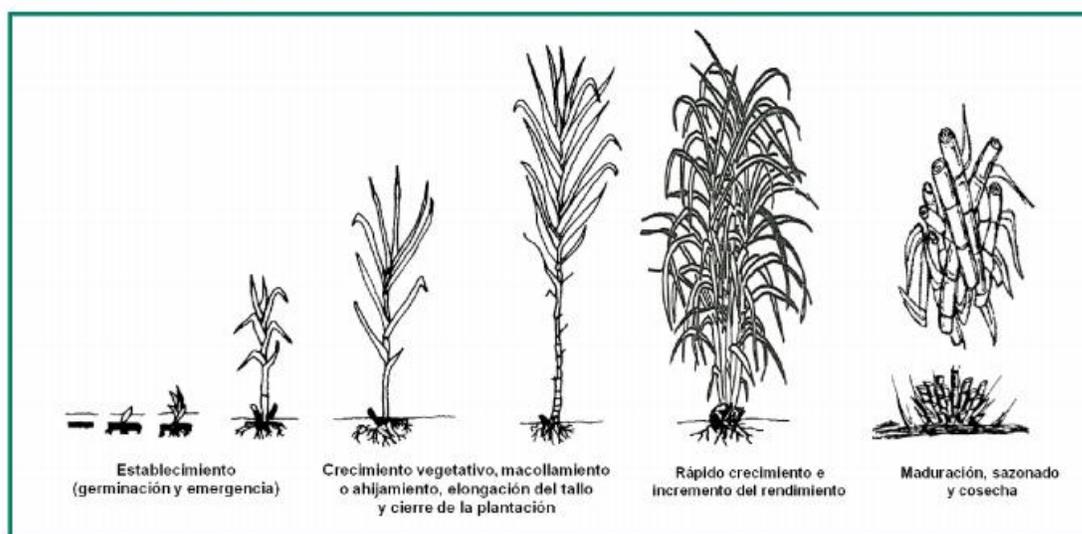


Figura 1. Ciclo fenológico del cultivo de caña de azúcar. Tomado de Benvenuti (2005) y FAO (2006).

a) Establecimiento (emergencia 30-50 días). Inicia con la emergencia de los brotes de caña, a partir 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).

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 meristemas 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 (Barbieri, 1993).

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 previa 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 Bassereau, 1975; Dillewijn, 1978). En los últimos años, la cosecha en verde, es privilegiada debido a la menor contaminación ambiental que produce (Ochoa *et al.*, 2010).

2.2.3. Características de variedades las variedades CP 72-2086 y Mex 69-290

La variedad CP 72-2086, es la principal variedad cultivada de México con una superficie de 212,678 ha (31%). La Mex 69-290 de ser la variedad principal del ex Instituto Mexicano para la producción de azúcar (IMPA), ahora ocupa el segundo lugar en superficie cultivada con 72,427 ha (26%) (CONADESUCA, 2020). Las características han sido descritas por otros autores para cada variedad 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 (García, 1984).

Variedad Mex 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⁻¹ en plantilla y 92 ton ha⁻¹ en socas, superando a las variedades Mex 57-473 y Mex 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).

2.2.4. Análisis del crecimiento de caña de azúcar

El crecimiento es un proceso fisiológico complejo, 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, 1982; Hunt *et al.*, 2002). Este crecimiento 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).

Para el estudio de la dinámica de crecimiento, se hace uso de los análisis de regresión múltiple y lineal donde los índices de crecimiento en función de los días calendario o tiempo termal, se correlacionan con variables agronómicas (IAF y número de plantas por m²) con la biomasa y productividad (Poorter y Gamier, 1996). Dos Santos *et al.* (2005) aplicaron en el estudio de la variedad SP80-1842 en cuarta y quinta soca, el análisis de crecimiento, observando que 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. 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 m², necesita mejorarse con la introducción de otras variables derivadas del suelo y datos de sensores remotos para su uso en predicción de rendimientos (Hunt *et al.*, 2002).

2.3. Índices de área foliar y de vegetación

2.3.1. Índice de las diferencias normalizadas (NDVI)

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. Lofton *et al.* (2012) determinaron, usando el sensor portátil GreenSeeker® de 2008 a 2011, 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. 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) (Loladze *et al.*, 2019).

2.3.2. Índice de área foliar (IAF)

El índice de área foliar (IAF) 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 mas viejas del tallo, acelerando su senescencia (Tejera *et al.*, 2007), donde la arquitectura de las hojas podría influir.

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 RB 92-579 que presentó el IAF más alto (4.46) también tuvo la mayor biomasa seca en el ciclo plantilla.

2.4. Factores ambientales que influyen el desarrollo fenológico

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 (Barbieri, 1973).

Temperatura: 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 35°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 (Valdez *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). 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).

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⁻². El metabolismo de carbono de la caña de azúcar es del tipo C₄, por lo que tiene altas tasas fotosintéticas (hasta 45 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ 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 (Pereira de Souza y Buckeridge, 2014).

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 (Valdez *et al.*, 2009). Cuando una alta disponibilidad de PAR se da a nivel del estrato inferior en la variedad IACSP 95-3028 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). Dentro del metabolismo C₄, 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).

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 (Valdez *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).

2.4.1. 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⁻³, 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 (cm³ de agua por cm³ 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 semidetallados 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 éútrico, Fluvisol eutri-gléyico, Gleysol éútrico, Gleysol mólico, Vertisol éútrico, y Vertisol pélico. El análisis de la fertilidad establece que los factores limitantes son altos contenidos de 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, Éútrico, Arcillico), Cambisol endogleyico vértico (Arcillico, Éútrico), Cambisol vértico (Arcillico, Éútrico), Fluvisol háplico (Arcillico, Éútrico), Leptosol mólico gléyico (Hiperesquelético, Húmico), Leptosol réndzico (Húmico), Luvisol cutánico (Arcillico, Hipéreútrico), Luvisol cutánico (Férrico, Hiperéútrico), Luvisol gléyico vértico (Arcillico), y Vertisol estágnico (Pélico, Éútrico). 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 los altos contenidos 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, P₂O₅ y K₂O en kg ha⁻¹): 130-80-60, 150-60-60, 160-80-60 para los Fluvisoles éútricos con pH ácido, neutro y alcalino; 130-60-80, 140- 80-80, 160-80-80 para los Fluvisoles éútri-gleyicos con pH ácido, neutro y alcalino, respectivamente; 120-60-60 para el Gleysol éútrico con pH ácido y neutro; 140-60-80 para el Gleysol mólico; 160-60-60 y 160-80-80 para el Vertisol éútrico de pH ácido, y neutro (Salgado-García *et al.*, 2005).

Las características de los suelos Fluvisol éútrico y Vertisol éútrico donde se establecieron estas dosis de fertilización en el Ingenio Santa Rosalía son:

Vertisol (Eútrico). Se ubica en un polígono de precipitación de 1937-2085 mm. Son suelos de textura arcillosa 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 estagnico. Estos suelos, además, presentan una saturación de bases (por NH_4OAc) de 50% o más entre 20 y 100 cm desde la superficie del suelo (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2014). 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 recientes 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 nutrientes 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).

III. HIPÓTESIS

3.1. Hipótesis general

Los parámetros de crecimiento y acumulación de biomasa de las variedades MEX 69-290 y CP 72-2086 en dos ciclos de producción (Resoca 1 y Resoca 2) son afectados por las diferentes condiciones edafoclimáticas del área de abastecimiento del ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa, Tabasco.

3.2. Hipótesis específicas

- a) El índice de área foliar (IAF) y NDVI, altura, diámetro, número de tallos y acumulación de biomasa durante el crecimiento de las variedades MEX 69-290 y CP 72-2086 son afectadas por las dos condiciones edafoclimáticas.
- b) Los parámetros de crecimiento y los índices de vegetación muestran correlaciones altas entre sí; y con las variables climáticas.

IV. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Evaluar los parámetros del crecimiento del cultivo de caña de (biomasa aérea, índice de área foliar, NDVI, número de tallos y peso de tallos) y rendimiento del cultivo, en dos ciclos de producción (resoca 1 y resoca 2) y dos condiciones edafoclimáticas del área de abastecimiento del ingenio Santa Rosalía de la Chontalpa, Tabasco.

4.2. Objetivos específicos

- a) Analizar la evolución de los parámetros de crecimiento (altura, diámetro y número de tallos y acumulación de biomasa), el índice de área foliar (IAF) y NDVI durante el desarrollo fenológico de las variedades MEX 69-290 y CP 72-2086 en dos ciclos de producción y dos condiciones edafoclimáticas.
- d) Determinar el grado de asociación entre los parámetros de crecimiento, el índice de vegetación y el índice de área foliar de las variedades MEX 69-290 y CP 72-2086 en dos ciclos de producción y dos condiciones edafoclimáticas, y con las variables climáticas.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Sitio experimental

El presente trabajo se realizó en el área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía (ISR) (Figura 2), durante la zafra diciembre 2019-junio 2021, que incluyó los ciclos resoca 1 y resoca 2 de las variedades de caña de azúcar en estudio. El ISR está ubicado a los 18°5' 20.19" de latitud norte y a los 93°21'21.15" longitud oeste en la región de la Chontalpa, Tabasco. El clima del lugar es cálido húmedo, y se define como Am(i') g, con una temperatura media anual de 26°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).

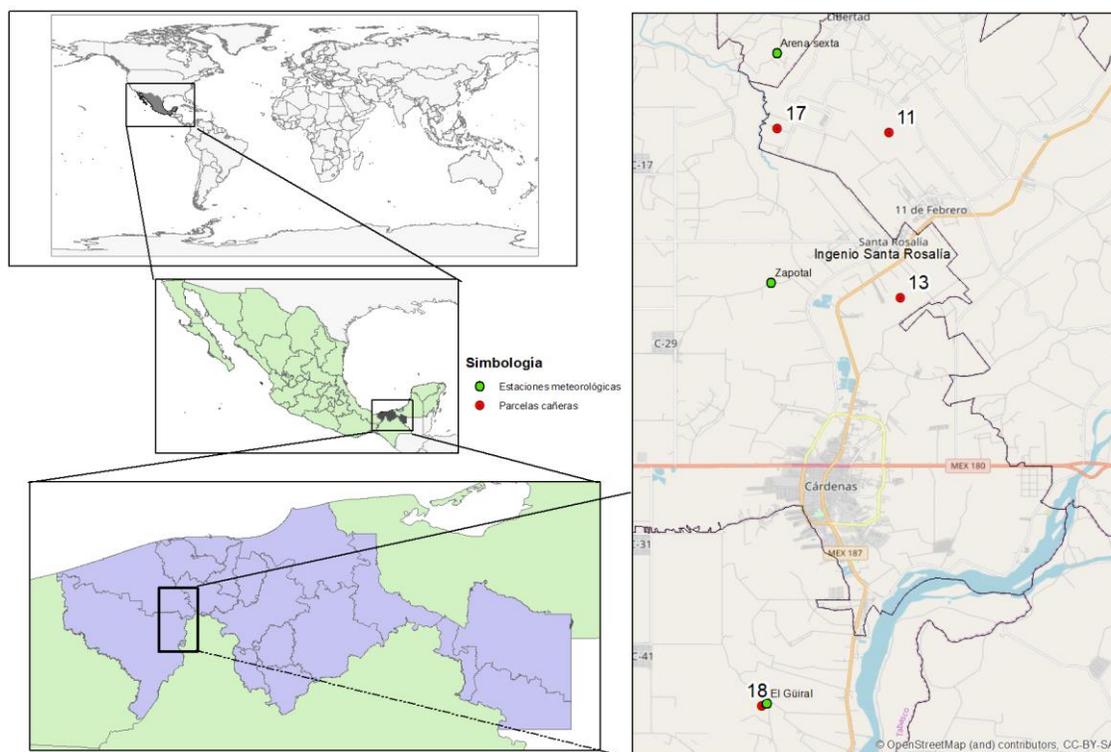


Figura 2. Ubicación espacial del Ingenio Santa Rosalía, parcelas en estudio (en número) y estaciones meteorológicas (círculos color verde).

5.2. Parcela experimental

Dentro del área de abastecimiento del ISR, se ubicaron 4 parcelas cultivadas con las variedades CP 72-2086 y Mex 69-290 establecidas en las subunidades de suelo Fluvisol éutrico y Vertisol éutrico (Cuadro 1).

Cuadro 1. Datos de las parcelas de caña de azúcar utilizadas en el estudio.

Parcela No.	Productor	Variedad	Subunidad suelo	PP (mm)	Dosis Fertilización	Factor limitante	Fecha de corte
11	López Cacho Félix	Mex 69-290	FLeu	2040	130-80-60	Despoblación y relieve irregular	20/03/2019
13	Luna Rodríguez Matilde	Mex 69-290	VReu	1960	160-60-60	Malezas	22/03/2019
17	López Izquierdo Alfonso	CP 72-2086	VReu	1960	160-60-60	Relieve irregular y se observa sequía	18/02/2019
18	Martínez Ruiz Miguel	CP 72-2086	FLeu	2100	130-80-60	Despoblación	20/02/2019

PP=precipitación; FLeu: Fluvisol éutrico; VReu: Vertisol éutrico.

Dentro de cada parcela, 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 bordo. Estos dos metros lineales se desplazaron al segundo surco inmediato siguiente, cada mes, para mantener el efecto de competencia. Cada subparcela fue considerada una repetición (Figura 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.

5.3. Análisis de fertilidad de suelos

En cada parcela se tomaron muestras, al momento de emergencia de la caña, 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.

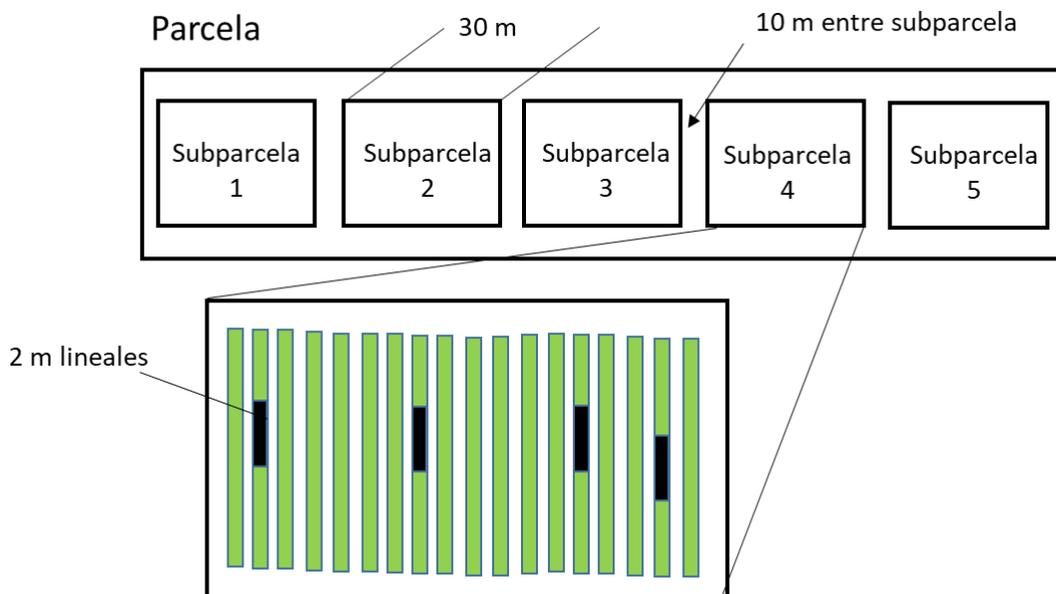


Figura 3. Esquema de la distribución de las subparcelas dentro del área experimental, y de los 2 m lineales para la toma de muestras.

La muestra fue secada a la sombra, molida y tamizada. Se determinó la Conductividad Eléctrica, MO, Nt, P, K, Ca, Mg, Na, Acidez intercambiable, Densidad aparente, y las constantes de humedad (Cuadro 2), 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.

5.4. Material biológico

Las variedades utilizadas fueron la CP 72-2086 y Mex 69-290 (Cuadro 1).

5.5. Manejo agronómico

Se aplicó el paquete tecnológico del Ingenio Santa Rosalía (ISR) que incluye las dosis de fertilización (Cuadro 1) 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.

Cuadro 2. Métodos y unidades de las propiedades fisicoquímicas de los suelos en estudio.

Propiedad	Método	Unidad
Conductividad eléctrica	AS-18: Conductímetro	DS m ⁻¹
pH	AS-02: Potenciométrico	
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 _(c) kg ⁻¹
Textura	AS-09: Bouyoucos	%
Densidad aparente	AS-03: Terrón parafinado	g cm ⁻³
Constantes de humedad	AS-06: Olla de presión	%

Fuente: NOM-021-RECNAT 2000.

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.

5.6. Variables de estudio

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 (Salgado *et al.*, 2013a).

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 (Figura 4 a y b) (Molijn *et al.*, 2018).

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 (Figura 4 c) (Salgado-García *et al.*, 2004).

Número de tallos. Se contó cada mes desde el ahijamiento hasta la cosecha en dos metros lineales por subparcela (Molijn *et al.*, 2018).

Índice de área foliar. Se midió mensualmente desde el mes uno 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).



Figura 4. Detalles de las mediciones de las variables: a) diámetro de tallo, b) altura de tallo, c) biomasa de tallos y d) medición del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI).

Índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI). Se midió el NDVI utilizando el sensor *GreenSeeker handheld crop sensor*, marca Trimble (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 (Figura 4d).

Rendimiento de caña. 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^{-1} de caña surcada a 1.3 m de distancia, para obtener el número de

tallos ha⁻¹. 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⁻¹), se utilizó la ecuación (Salgado-García *et al.*, 2004):

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

Calidad de los jugos (°Brix, %Pol, %Fibra, %Azúcares reductores, %pureza y %humedad) se determinaron a los 11 meses de edad en 10 tallos tomados al azar en cada subparcela por parcela. Las determinaciones se realizaron en el laboratorio del ISR usando las normas mexicanas NMX-F-266-SCFI-2012.

Datos meteorológicos. Se tomaron de la estación climatológica Wacht Dog 2900 ET más cercana a cada sitio (Cuadro 3), donde se colectaron los datos de temperatura del aire, precipitación y humedad relativa. Los datos se registraron cada 30 minutos.

Cuadro 3. 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

5.8. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza bajo un diseño anidado cruzado de efectos fijos, donde los factores fueron el suelo con dos niveles (FLeu y VReu) y los ciclos de cultivo (Resoca 1 y Resoca 2), el factor anidado fue la variedad en el suelo. Para aquellas variables donde se encontraron diferencias significativas para los factores e interacciones 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. Todos los análisis se hicieron con el programa estadístico SAS 9.2.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Características climáticas durante desarrollo fenológico del cultivo

6.1.1. Temperatura

En la Figura 5 se muestran los climogramas de las temperaturas promedio máximas, mínimas y medias mensuales de las estaciones climatológicas utilizadas en este estudio.

Durante el crecimiento y desarrollo del cultivo de la caña de azúcar se registraron temperaturas máximas promedio mensuales que oscilaron desde 28.2°C hasta 38.5°C para el ciclo resoca 1 y desde 29.2 hasta 38.2°C para el ciclo resoca 2. Para el ciclo resoca 1, las temperaturas promedio máximas más elevadas fueron registrada en la estación de Arena Sexta (28.2°C a 38.5°C), seguidas de la estación de Zapotal (27.3°C a 39.3 °C) y de la estación de Güiral (27.1°C a 38.0°C). Para el ciclo resoca 2, las temperaturas promedio máximas más elevadas fueron registrada en la estación de Arena Sexta (29.2°C a 38.2°C), seguidas de la estación de Zapotal (28.2°C a 39.4 °C) y de la estación de Güiral (28.5°C a 38.4.0°C). Durante los ciclos de estudio, la mayor y menor temperaturas máximas se presentaron en el mes de abril y enero, respectivamente.

La variación de las temperaturas promedio mínima durante el crecimiento y desarrollo de las variedades de caña de azúcar en estudio, fue de 12.3°C a 21.8°C; las mas elevadas se registraron en la estación de Zapotal (15.3°C a 21.8°C), seguida de las estaciones de Arena Sexta (12.3°C a 21.8°C) y Güiral (12.0°C a 21.8°C). En las estaciones de Arena Sexta y el Güiral la menor temperatura promedio se registró en el mes de diciembre 2019 y; en cambio en la estación de Zapotal la menor temperatura promedio mínima se observó en el mes de noviembre 2019 para el ciclo resoca 1 (Figura 5b). Para el ciclo resoca 2, se encontró que en la estación de Arena sexta la temperatura promedio mínima osciló de 14.0°C a 22.3°C; la estación Zapotal de 16°C a 21.8°C y para la estación de Guiral de 12°C a 21.8°C. Se puede observar que para el ciclo resoca 1 (zafra 2019-2020) se presenta una tendencia a la baja desde el mes de octubre 2019 hasta diciembre 2019 y para el ciclo resoca 2 la tendencia se retrasa un mes a partir del mes de noviembre 2020 a enero 2021.

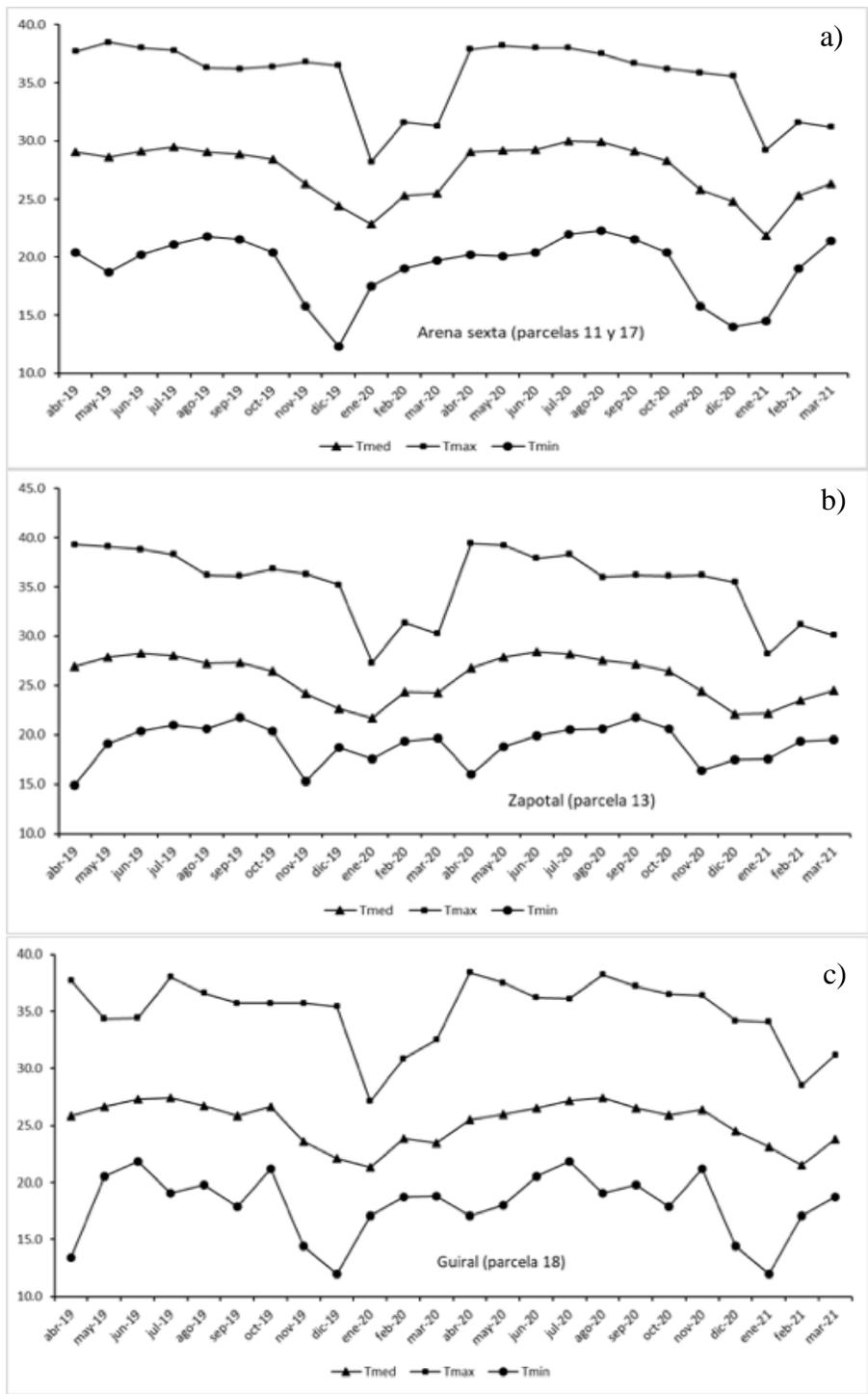


Figura 5. Temperaturas promedio máximas (Tmax), mínimas (Tmin) y medias (Tmed) de las estaciones climatológicas: Arena Sexta en el municipio de Cunduacán y cercana a las parcelas 11 y 17 (a), Zapotal en el municipio de Cárdenas y es la más cercana a la parcela 13 (b) y Güiral en el municipio de Huimanguillo y es la más cercana a la parcela 18 (c).

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 septiembre 2019 a enero 2020, en este mes se registran las temperaturas medias más bajas durante el ciclo resoca 1. Para el ciclo resoca 2 la tendencia a la baja se presenta desde agosto 2020 a enero 2021 (Figuras 5a, b y c). Durante los meses de marzo a junio ocurrió la brotación de los hijuelos (Figuras 10 y 11) y el amacollamiento del cultivo de caña. La temperatura cercana a 30°C es considerada como óptima para el ahijamiento (Fauconnier y Bassereau, 1975). Temperaturas por encima de 38°C reducen la tasa fotosintética e incrementan la tasa de respiración, temperaturas que se alcanzaron durante los meses de menor precipitación en el área de estudio y que permite la cosecha de la caña, pero también afecta el rebrote del ciclo siguiente. La maduración ocurre durante el invierno en el área de estudio donde generalmente se tienen temperaturas mas bajas. Valdez *et al.* (2019) indican que bajas temperaturas en el rango 12° a 14°C son deseables para que ocurra este proceso en caña, dado que esto, tiene una influencia en reducir el crecimiento vegetativo e incrementar la concentración de sacarosa en los tallos.

6.1.2. Humedad relativa y precipitación

Humedad relativa (HR): el rango de variación de HR fue de 72.7% a 85.6% en las tres estaciones en estudio (Figura 6). El mayor rango de HR se registró en la estación de Güiral (72.7 a 85.6%), seguido de la estación de Zapotal (76.2 a 88.5%) y la estación de Arena Sexta (72.7 a 85.6 %). Para el ciclo resoca 1, el menor y mayor valor de HR se registró en abril 2019 y diciembre 2019, coincidiendo con el descenso de la temperatura máximo pomedio desde el mes de julio 2019 hasta enero de 2020 en la estación Arena Sexta; en las estaciones del Zapotal y el Guiral, la HR presenta el mismo patrón de ascender desde el mes de junio 2019 hasta diciembre de 2019.

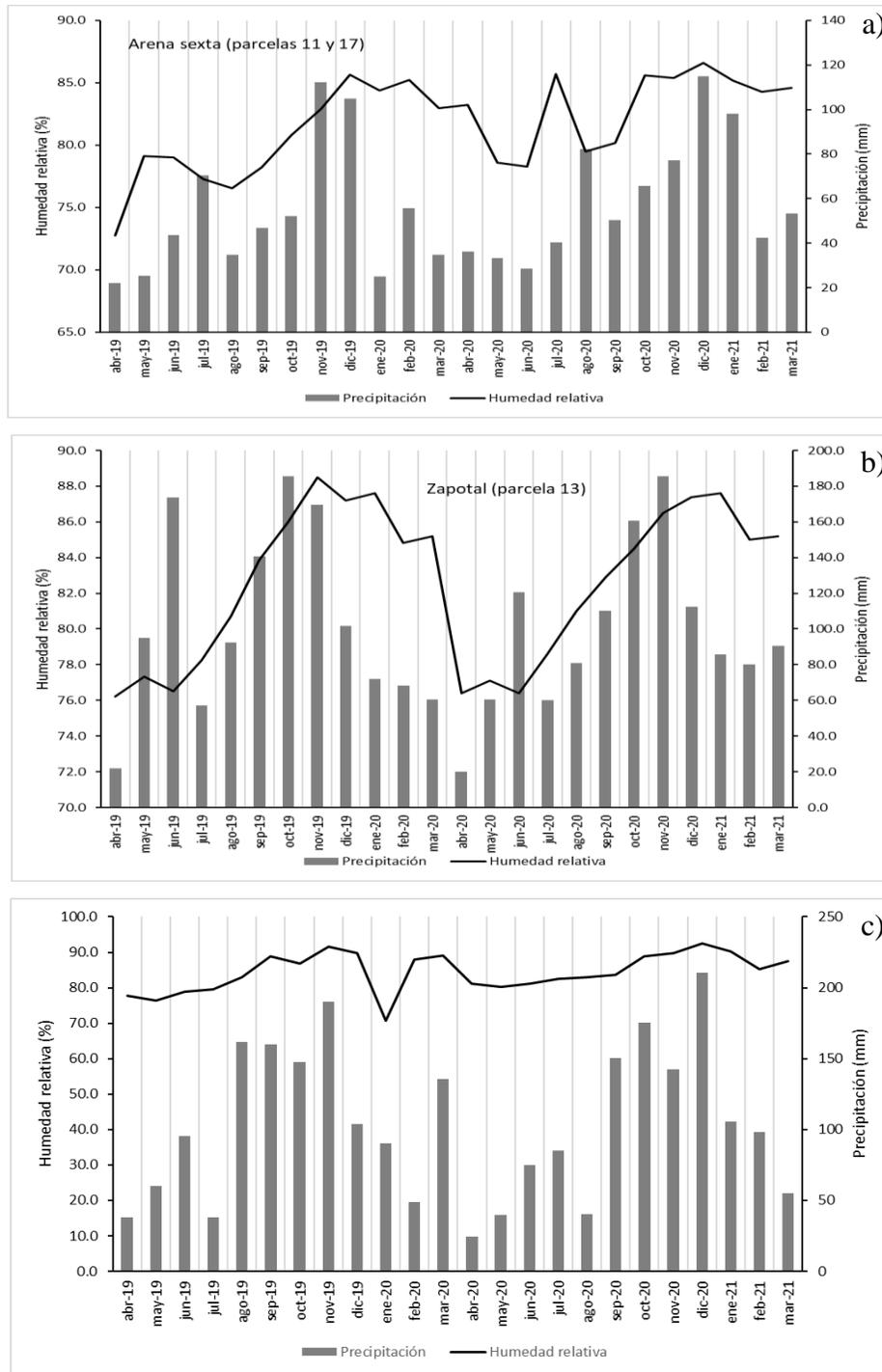


Figura 6. Humedad relativa promedio y precipitación pluvial acumulada de las estaciones climatológicas: Arena Sexta (a), Zapotal (b) y Güiral (c).

Para el ciclo resoca 2, en la estación de Arena sexta se presenta un descenso de la HR desde el mes de marzo de 2020 hasta junio de 2020 y posteriormente aumenta desde agosto 2020 hasta diciembre de 2020; en la estación del Zapotal desde julio

de 2020 hasta diciembre de 2020, se presenta un ascenso de la HR; y en la estación de Guiral desde junio 2020 hasta diciembre de 2020, existe un ascenso de HR, aunque es menos marcado que en las demás estaciones (Figuras 6a, b y c).

Precipitación pluvial acumulada: El registro de precipitación en las tres estaciones reveló que los meses más lluviosos fueron septiembre, octubre y noviembre en las estaciones Arena Sexta y Zapotal en los dos ciclos en estudio (Figuras 6a, b y c). La precipitación acumulada durante el ciclo resoca 1 fue 627.4, 1268.8 y 1238.3 mm para la estación de Arena Sexta, Güiral y Zapotal, respectivamente. Para el ciclo resoca 2, la precipitación acumulada fue 722.8, 1202.3 y 1167.6 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 en las tres estaciones en estudio. 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 las resocas. 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). La precipitación acumulada es adecuada para el crecimiento de la caña de azúcar, ya que se requiere 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 (Valdez *et al.*, 2009), aunque los sitios 11 con suelo FLeu y 17 con suelo VReu presentaron precipitaciones anuales por debajo de este rango recomendado, por lo que el cultivo podría haber experimentado estrés por déficit hídrico durante su crecimiento y afectar sus funciones fisiológicas. 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).

6.2. La fertilidad y humedad de los suelos

El análisis de fertilidad (Cuadro 4) y la curva de retención de humedad (Cuadro 5) de los suelos de las parcelas en estudio se describen a continuación:

Cuadro 4. Análisis de fertilidad de los suelos de las parcelas de caña de azúcar en estudio (0 a 30 cm de profundidad).

Parcela	pH H ₂ O	CE dS m ⁻¹	MO	Nt	P	K	Ca	Mg	Na	Ac	Da g cm ⁻³	Ar	Li	Are	Clasif. Textural
			%			mg kg ⁻¹	Cmol _(c) kg ⁻¹					%			
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

Cuadro 5. Curva de retención de humedad de las parcelas de caña de azúcar en estudio.

Identificación		HA	HCC	PMP	Potencial matricial (atm)				
Parcela	Prof.	%			0.3	1.0	2.0	4.0	5.0
		% Humedad							
11	0-30	17.5	37.98	20.47	36.67	31.87	28.78	25.61	23.89
13	0-30	15.9	35.66	19.69	34.89	30.54	28.86	25.09	24.34
17	0-30	16.8	37.53	20.65	37.12	34.37	30.29	26.84	24.51
18	0-30	20.3	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. HA=humedad aprovechable

Parcela 11 (Mex 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⁻¹) (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_(c) kg⁻¹ se clasifica como medio (Etchevers, 1988) lo que se atribuye a la mezcla de arcilla illita y motmorillonita (Bolio-López *et al.*, 2008) y a su origen aluvial reciente. Los valores de 2.69 y 1.19 cmol_(c) kg⁻¹ 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⁻¹ de Ca y Mg, respectivamente). Estos valores tan bajos de Ca y Mg no parecen coincidir con las otras variables determinadas ya que es un

suelo casi neutro, estos valores se encuentran en suelos ácidos, además posee una buena cantidad de arcilla y de P.

Parcela 13 (Mex 69-290; VReu): Es un suelo sin salinidad ($<2 \text{ dS m}^{-1}$) (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 $0.46 \text{ cmol kg}^{-1}$ se clasifica como medio (Etchevers, 1988). Los valores de 2.77 y $1.02 \text{ cmol kg}^{-1}$ de Ca y Mg, respectivamente, se clasifican como bajos (Etchevers, 1988). Como se comentó anteriormente, 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 $7.6 \text{ cmol}_{(c)} \text{ kg}^{-1}$ 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 5). Las parcelas ubicadas en el suelo VReu proporcionan menos de 17% de humedad aprovechable.

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 éutrico y Vertisol eutrítico. Asimismo, los valores de CC y PMP fueron similares para todas las parcelas, dado que estas variables están fuertemente asociadas a la cantidad de arcilla presente (Cuadros 4 y 5).

6.3. Acumulación de biomasa, IAF y NDVI

Altura de tallo

Durante el crecimiento del cultivo de caña de azúcar en los dos ciclos de estudio de resoca 1 y resoca 2, y con base en el análisis de varianza, la altura del tallo fue afectada solamente por el factor ciclo (Cuadro 6). Dado que en la mayoría de los parámetros de crecimiento no se encontraron diferencias significativas en las interacciones (Cuadro 6).

Cuadro 6. Cuadrados medios del ANOVA de variables de crecimiento, NDI y IAF de las variedades Mex 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)	Núm. de tallos	NDVI	IAF
C	1	70958.34**	2898.11**	42412.80**	3X10 ⁻³ NS	515.73**
SS	1	923.98 NS	30.61 NS	151.88 NS	3.4X10 ⁻⁴ NS	0.18 NS
SS>V	2	3377.42 NS	400.58**	233.27*	4.9x10 ⁻⁴ NS	7.74 NS
C*SS	1	682.5 NS	7.01 NS	21.68 NS	0.01 NS	0.54 NS
C*V	1	3300.34 NS	35.44 NS	18.41 NS	0.01 NS	11.9 NS
Error	473	5666	34.69	75.41	3.4x10 ⁻³	3.42
CV (%)		42.4	24.9	31.52	8.67	49.5

C= ciclo, V= variedad, SS= subunidad de suelo, SS>V= factor anidado (V dentro de SS), GL= grados de libertad, *=P<0.05, **=P<0.01, NS= no significativo.

Por lo anterior, las interacciones se eliminaron del modelo para correr un modelo de efectos fijos y el efecto anidado de la variedad (V) dentro de la subunidad del suelo (SS) (Cuadro 7).

La altura, diámetro y número de tallos disminuye con el ciclo de cultivo en todos los sitios de estudio, así como IAF, independientemente de la subunidad de suelo presente. La resoca 1 siempre presenta mayor altura, diámetro de tallo, número de tallos e IAF que la resoca 2 (Figura 7). El declive en el crecimiento de las resocas no se ha relacionado con factores genéticos, sino mas bien a efectos ambientales y fisiológicos, como puede ser la compactación del suelo, o un periodo de sequía, un sistema de raíces mas superficial para el avance de los retoños, lo que limita la absorción de agua y nutrientes, entre otros (Matsuoka y Stolf, 2012). La evolución del crecimiento en el tiempo en altura y diámetro del tallo (Figura 8) muestra que la

variedad CP 72-2086 presentó mayor altura de tallo al final del ciclo resoca 1 que la Mex 69-290 en la subunidad FLeu. Para el ciclo resoca 2 ambas variedades presentaron alturas similares cercanas a los 3.5 m. La variedad Mex 69-290 en el ciclo resoca 2 presentó su mayor altura de tallo en la subunidad de suelo Vertisol eútrico (VReu) mientras que la CP 72-2086 presentó su mayor altura de tallos en la subunidad de suelo Fluvisol eutricto (FLeu) (Figuras 9 a y b), independientemente de la precipitación diferencial recibida en los sitios de estudio. La variedad Mex 69-290 está indicada que prospera en suelos de textura arcillosa, de espesor medio y con buen y regular drenaje (Flores, 2001).

Cuadro 7. Cuadrados medios de efectos principales del ANOVA de variables de crecimiento, NDVI e IAF de las variedades Mex 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	Diámetro tallo	Núm. de tallos	NDVI	IAF
C	1	70958.34**	2898.11**	42412.80**	3X10 ⁻³ NS	515.73**
SS	1	923.98 NS	30.61 NS	151.88 NS	3.4X10 ⁻⁴ NS	0.18 NS
SS>V	2	3377.42 NS	400.58 **	233.27*	4.9x10 ⁻⁴ NS	7.74 NS
Error	475	5650.82	34.64	75.06	3.4x10 ⁻³	3.43
CV (%)		42.4	24.9	31.52	8.67	49.5

C= ciclo, V= variedad, SS= subunidad de suelo, SS>V= factor anidado (V dentro de SS), GL= grados de libertad, *=P<0.05, **=P<0.01, NS= no significativo.

Diámetro del tallo

Durante el crecimiento del cultivo de caña de azúcar en los dos ciclos de estudio de resoca 1 y resoca 2, el diámetro de tallo fue afectado por el ciclo (C) y el efecto de anidamiento (SS>V) (Cuadro 7), lo que indica que el diámetro del tallo depende de la variedad y el tipo de suelo. Los mayores diámetros de tallos se observaron en el ciclo resoca 2 (Figura 9c y d). En ambos ciclos, el máximo valor del diámetro del tallo se observó al final del ciclo. La variedad Mex 69-290 cultivada en suelo VReu presenta diámetros de tallos mayores que en suelo FLeu y se observó lo inverso para la variedad CP 72-2086.

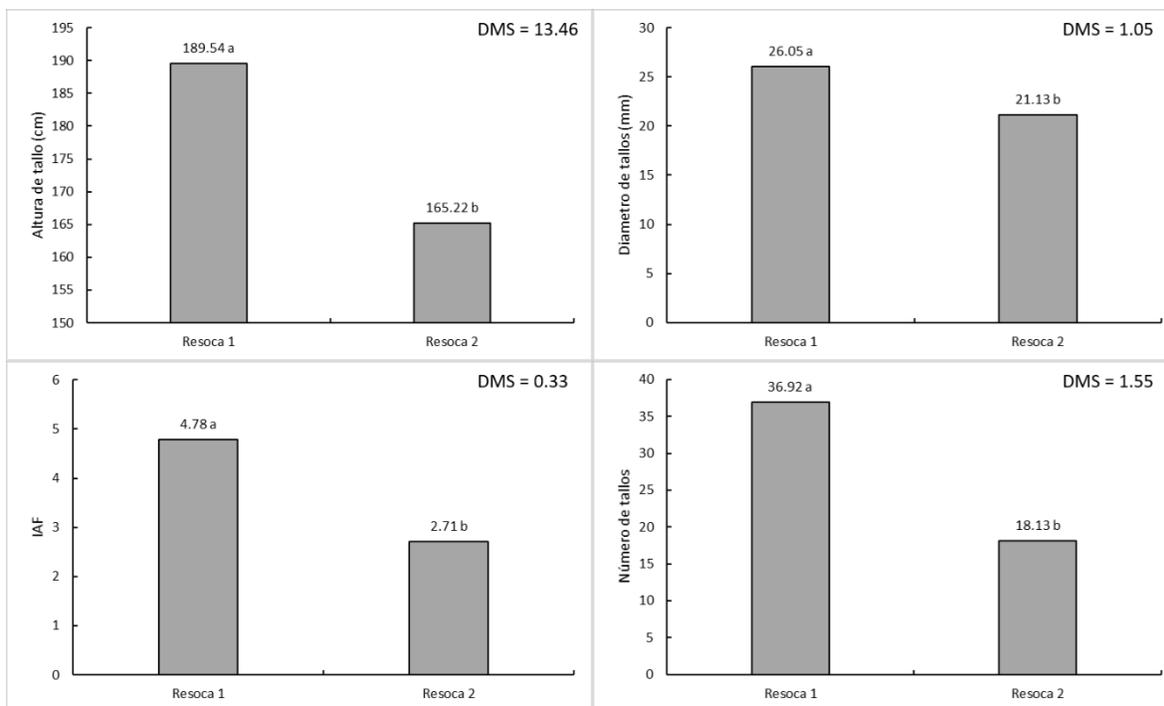


Figura 7. Promedio de variables de crecimiento (Altura, diámetro y número de tallos) e Índice de área foliar (IAF) de primera y segunda resoca de variedades de caña de azúcar cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

En el ciclo resoca 2 se observa en los meses de noviembre una reducción del diámetro y este se mantuvo estable hasta los 10 meses de edad, edad del cultivo, cuando la caña de azúcar se encuentra en la etapa de maduración y sazonado. Esta reducción en el crecimiento en diámetro del tallo puede deberse al efecto de las bajas temperaturas.

Al respecto, 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.

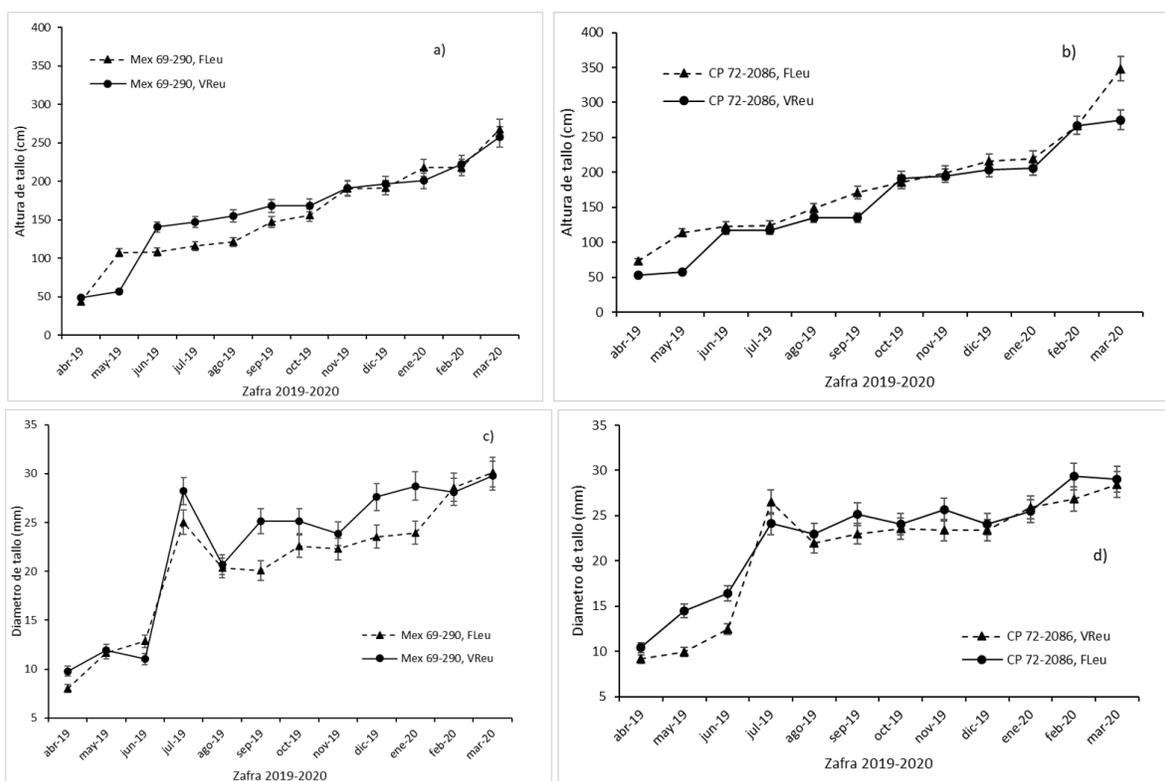


Figura 8. Altura de tallo de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b); diámetro de tallo de Mex 69-290 (c) y CP 72-2086 (d) durante el crecimiento del ciclo resoca 1 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. FLeu= Fluvisol eútrico, VReu= Vertisol eútrico.

Número de tallos

El número de tallos presentó efectos significativos para el ciclo (C) y el efecto de anidamiento SS>V (Cuadro 7). La dinámica de producción de tallos durante el ciclo resoca 1 mostró un incremento en el número de tallos durante los 4 meses después del corte en Mex 69-290 en ambas subunidades de suelo que CP 72-2086 (Figura 10), efecto que también observó Salgado (2019) en el ciclo soca. En suelo VReu, Mex 69-290 aumentó la cantidad de tallos a los 3 meses de edad de cultivo (de 26 a 45) pero a partir de los 6 hasta hasta los 12 meses de edad, la cantidad de tallos disminuyó de 45 hasta 37 tallos por dos metros lineales (Figura 10a).

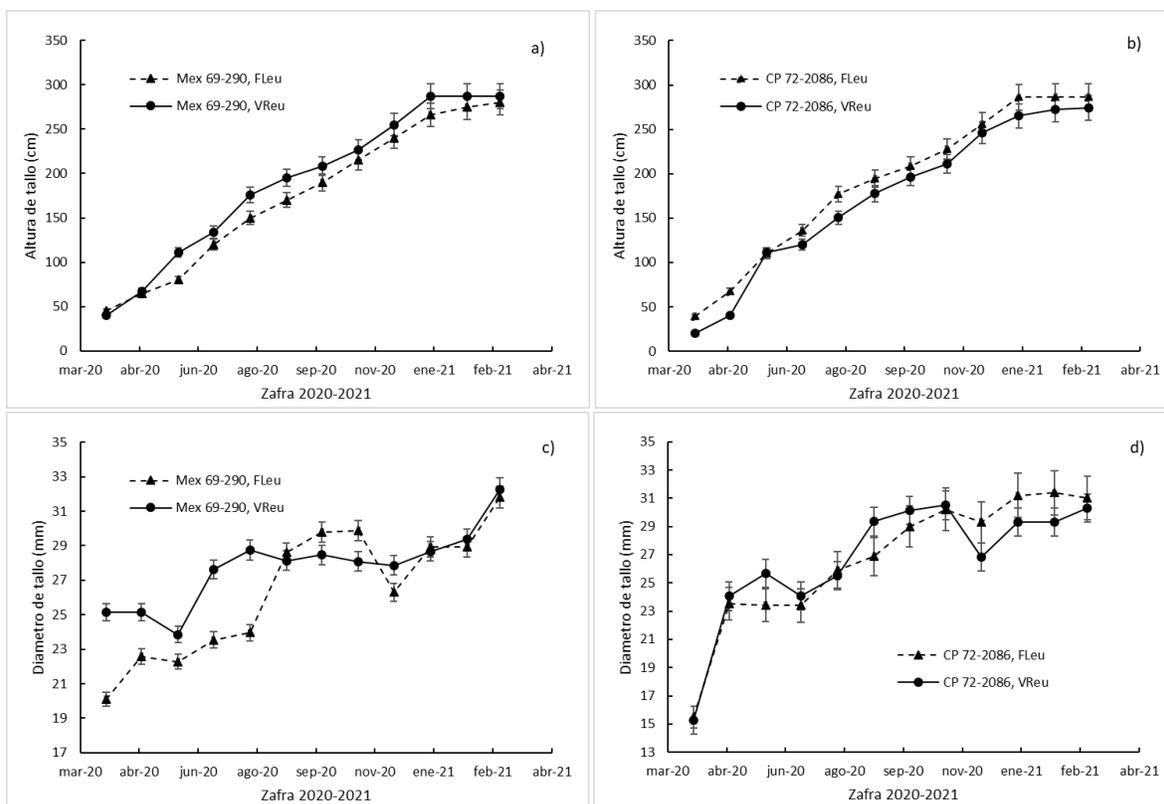


Figura 9. Altura de tallo del cv. Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b); diámetro de tallo del cv. Mex 69-290 (c) y CP 72-2086 (d) durante el crecimiento de resaca 2 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. FLeu= Fluvisol eútrico, VReu= Vertisol eútrico.

La mortalidad de tallos en el ciclo resaca 1 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 (Vasanth *et al.*, 2014). En contraste CP 72-2086 mostró mayor estabilidad en el número de tallos durante el periodo de amacollamiento, al mantener entre 48 y 51 tallos en esta misma subunidad de suelo y disminuyendo de 48 a 38 tallos por dos metros lineales (Figura 10b). En suelo FLeu, ambas variedades incrementaron el número de tallos al inicio del ciclo de crecimiento disminuyendo a los seis meses de edad (Figura 10). Por otra parte, para el ciclo resaca 2, se encontró que el número de tallos aumentó drásticamente a partir de los 7 meses de edad de cultivo hasta la cosecha (Figura 11), es decir, la caña de azúcar siguió su crecimiento poblacional lo cual se atribuye a las precipitaciones en la zona, las cuales en promedio fueron 100 mm mayores en los sitios 11 (Mex69-290 FLeu) y 13 (CP 72-2086 VReu) (Figura 6). 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; Bonnet, 2014), lo que parece ser el caso para el ciclo resoca 1 en este estudio.

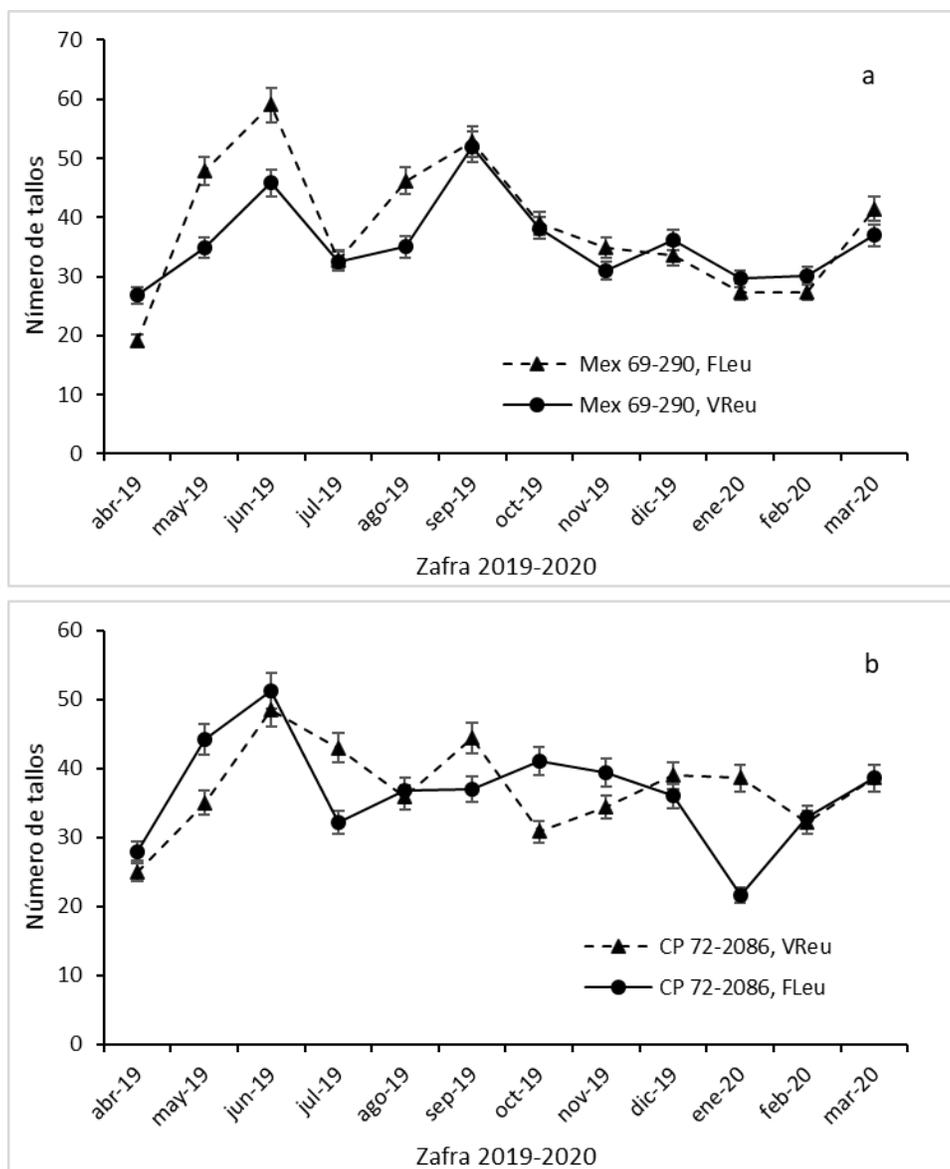


Figura 10. Número de tallos de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b) en dos metros lineales durante el crecimiento de la resoca 1 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

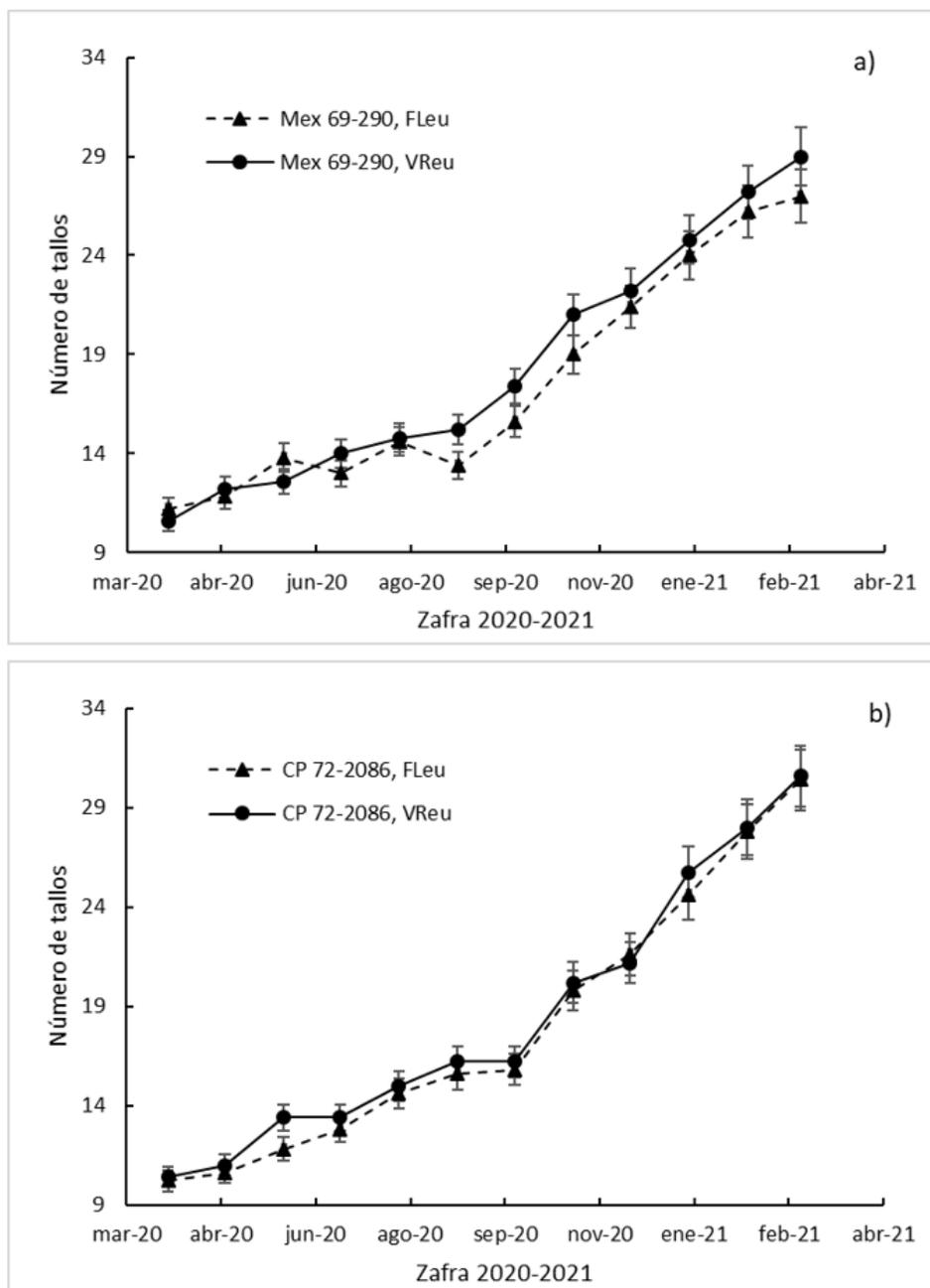


Figura 11. Número de tallos de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b) en dos metros lineales durante el crecimiento de la resoca 2 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de influencia del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Índice de área foliar (IAF)

Los resultados del ANOVA para el IAF mostraron efectos significativos para el ciclo (C) (Cuadro 7). Al final del ciclo resoca 1, la variedad CP 72-2086 presentó mayor

IAF (7.2) en suelo FLeu y la Mex 69-290 en suelo VReu (Figura 12). Ambas variedades presentaron IAF mas elevados en el ciclo resoca 1 que en el ciclo resoca 2. Resoca 1 con 6.97 (CP 72-2086, FLeu), 6.95 (Mex 69-290, VReu), 6.63 (CP 72-2086, VReu) y 6.34 (Mex 69-290, FLeu); y Resoca 2 con 4.92 (Mex 69-290, VReu; CP 72-2086, VReu), 4.68 (CP 72-2086, FLeu) y 4.60 (Mex 69-290, FLeu) (Figura 13).

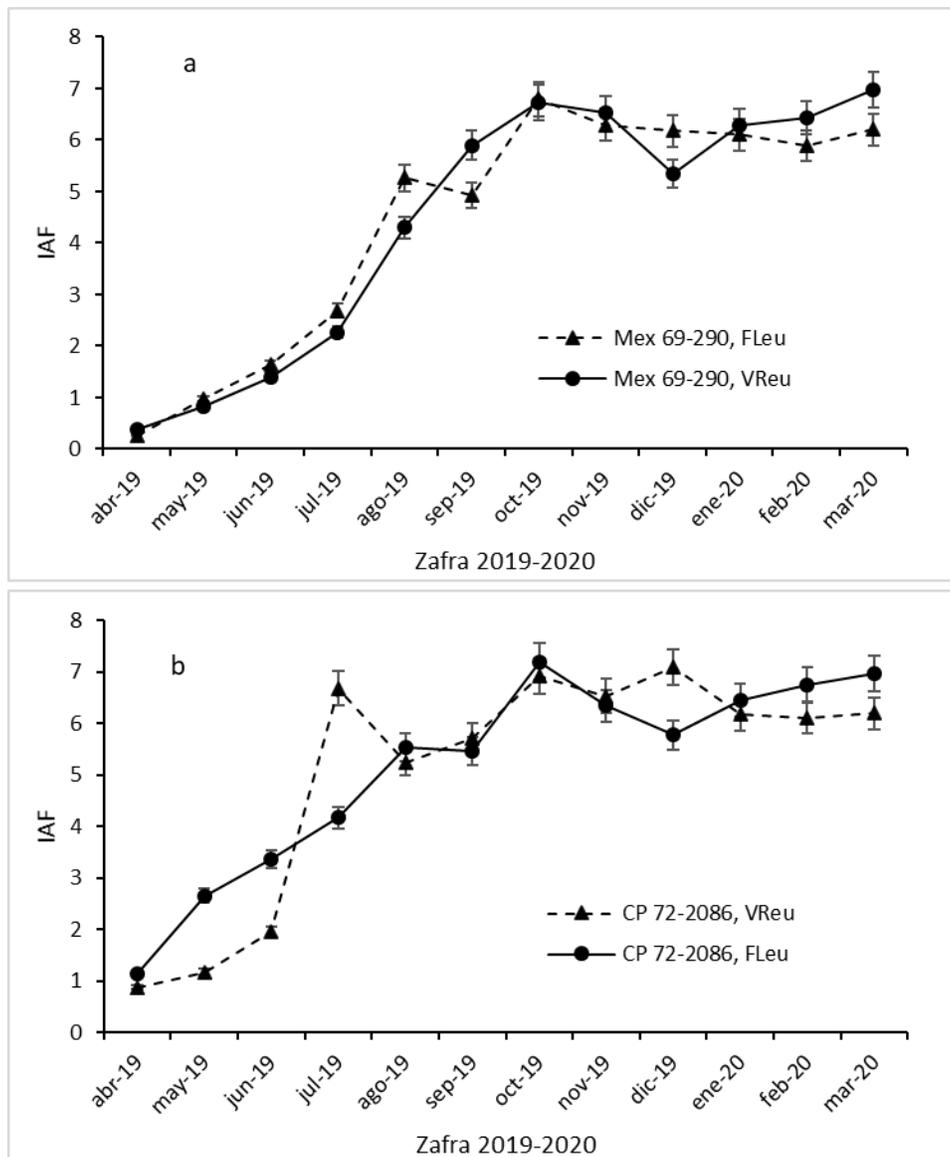


Figura 12. Dinámica del índice de área foliar (IAF) del ciclo resoca 1 de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b), cultivadas en dos subunidades de suelo del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Los valores de IAF de CP 72-2086 para resoca 1 son similares al 7.7 reportado en la India para la variedad CoLk 8102 (Radha *et al.*, 2010) y en la resoca 2 superiores 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.

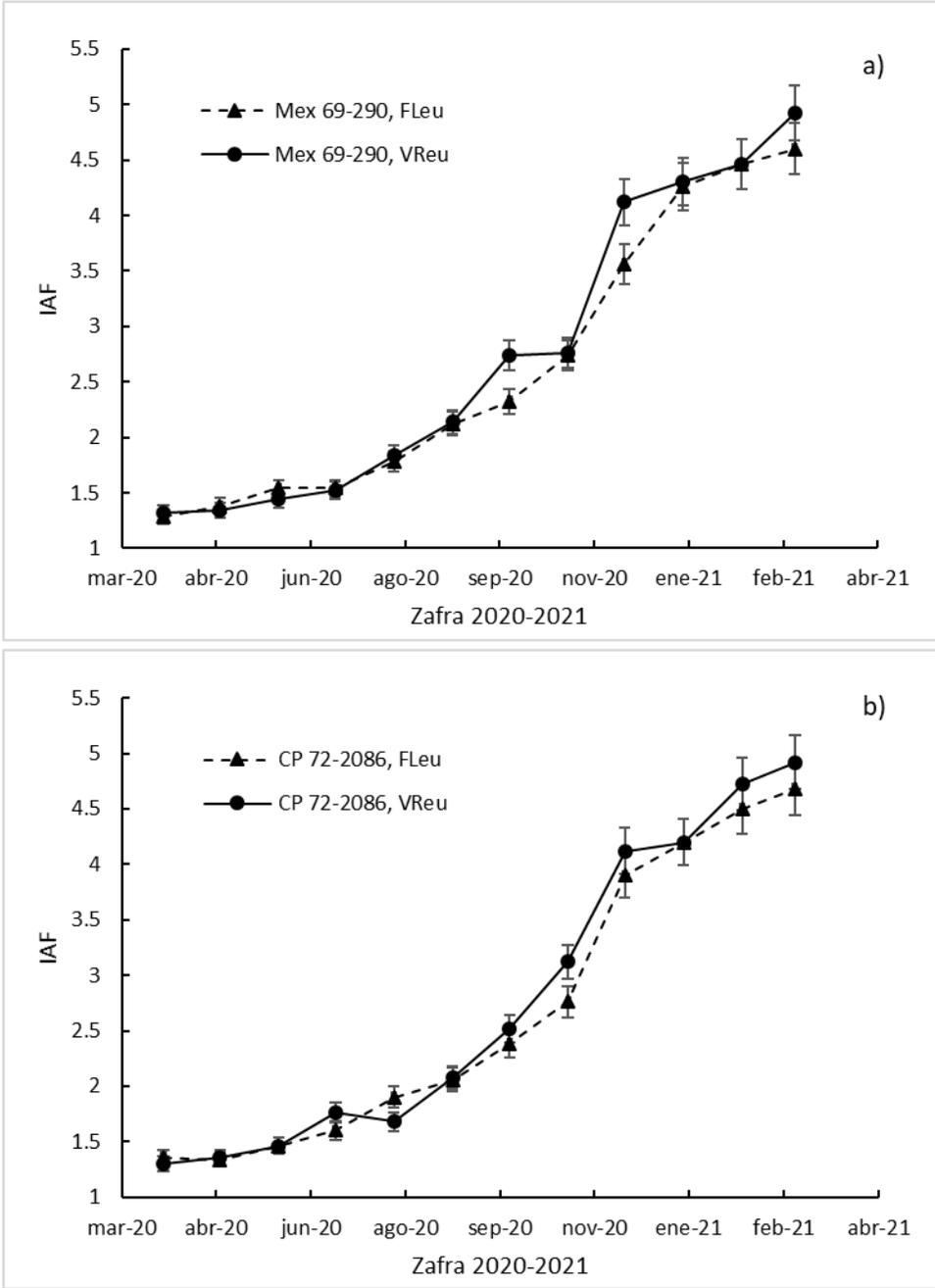


Figura 13. Dinámica del índice de área foliar (IAF) del ciclo resoca 2 de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b), cultivadas en dos subunidades de suelo del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

El mayor IAF en el ciclo resoca 1 para ambas variedades no representaría un mayor rendimiento de caña al momento de la madurez, ya que éste mayor follaje también está consumiendo fotoasimilados para su crecimiento (Pammenter y Allison, 2002), pero algunos autores han observado una asociación positiva entre mayor IAF y rendimiento de caña (Vasanthan *et al.*, 2014).

En el ciclo resoca 2, ambas variedades mantuvieron un crecimiento lineal en el IAF, indicando que el dosel de la caña de azúcar no detuvo su crecimiento, incluso durante el periodo de maduración de la caña (Figura 13). Generalmente, este índice tiende a disminuir durante la etapa de maduración, lo que solo se observó en la resoca 1 para ambas variedades, pero dependió del tipo de suelo. Mientras para Mex 69-290, el IAF disminuyó a partir del mes de octubre 2019 en suelo FLeu, para la CP 72-2086 la disminución se observó a partir de diciembre 2019 en suelo VReu.

Índice de vegetación de las diferencias normalizadas (NDVI)

El resultado del ANOVA para el NDVI no mostró efectos significativos ni para la subunidad de suelo, ni para el ciclo de cultivo, y tampoco para el efecto de la variedad anidada en el suelo (Cuadro 7). El NDVI se incrementó con el crecimiento del dosel del cultivo de caña de azúcar, y se estabilizó a los ocho meses cuando ocurre el cierre del dosel, permaneciendo así hasta la etapa final del periodo de crecimiento vegetativo en el ciclo resoca 1 (Figura 14).

En ciclo resoca 2 (Figura 15), el NDVI presentó una disminución a los tres meses de edad del cultivo para después incrementar linealmente hasta la cosecha. Este descenso en el NDVI, tal vez está asociado con el periodo de baja precipitación se observa en los meses de marzo y abril en las tres estaciones en estudio durante el año 2020, lo que pudo afectar el crecimiento vegetativo de las variedades en ambas subunidades de suelo. A los cuatro meses de edad la variedad CP 72-2086 presentó mayor NDVI que la Mex 69-290, con valores de 0.7 (FLeu) (Figura 15b). 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).

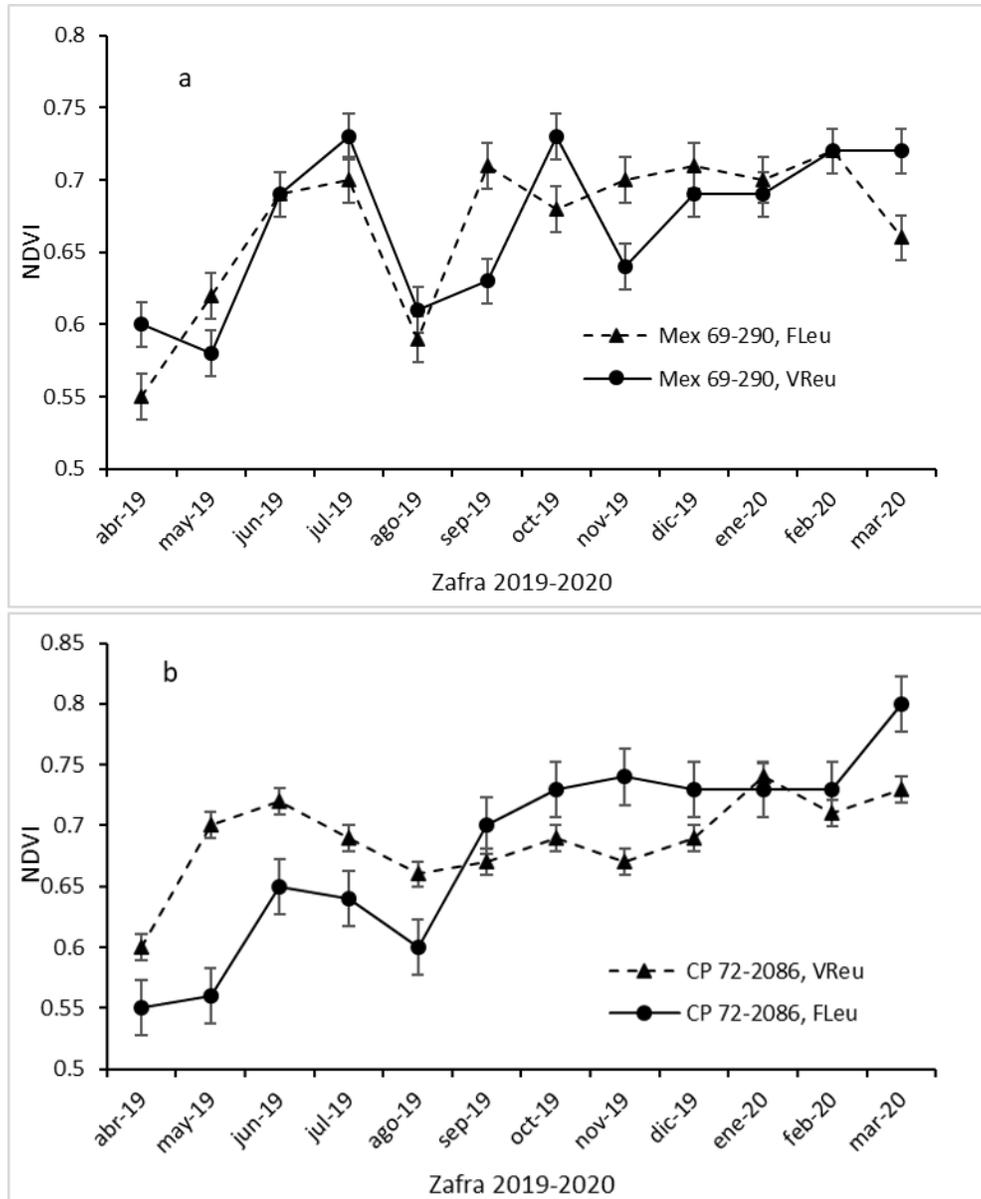


Figura 14. Desarrollo del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b) durante el ciclo resoca 1, cultivadas en las subunidades de suelo Fluvisol eútrico (FLeu) y Vertisol eútrico (VReu) del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

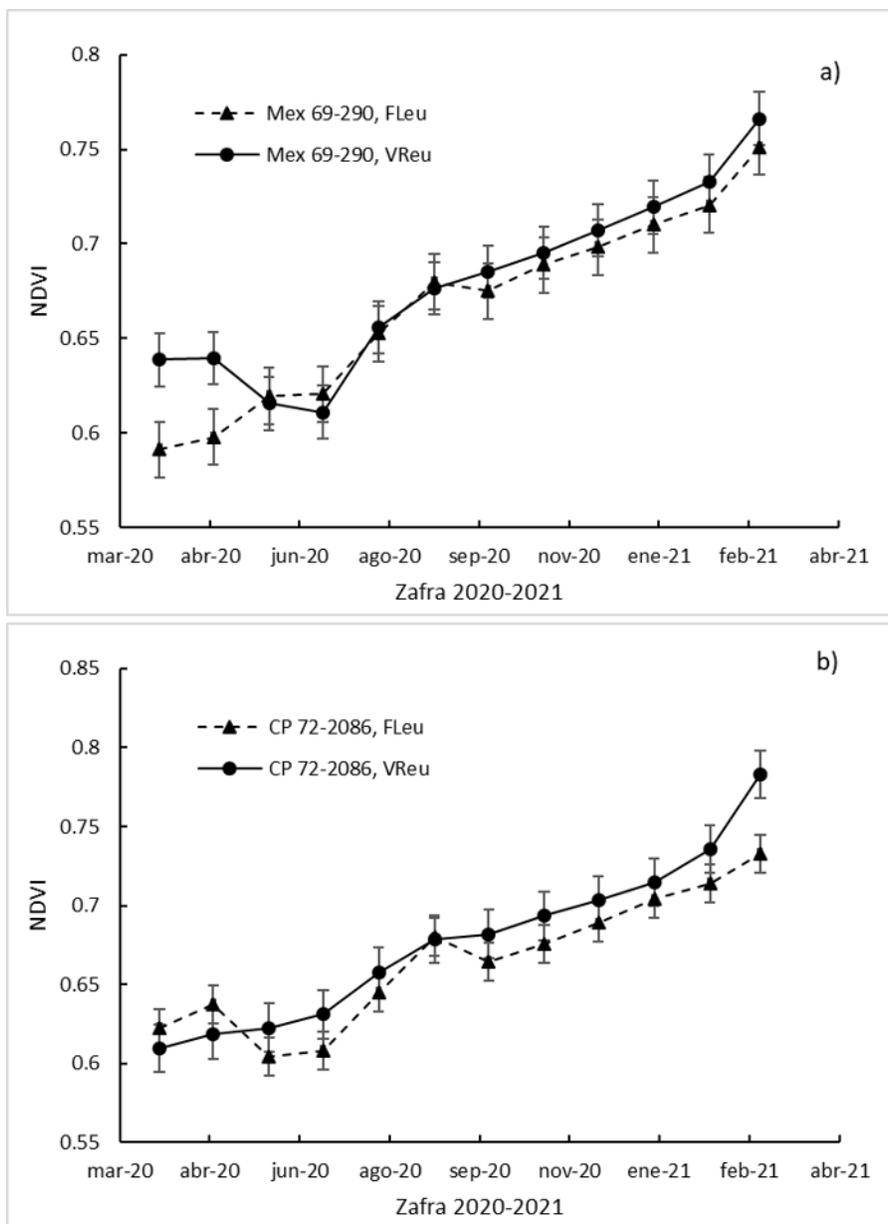


Figura 15. Desarrollo del índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b) durante el ciclo resoca 2, cultivadas en las subunidades de suelo Fluvisol eútrico (FLeu) y Vertisol eútrico (VReu) del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Biomasa de tallos, follaje y total

Los resultados del ANOVA para biomasa de tallos no mostraron efectos significativos para ciclo de cultivo (C), Subunidad de suelo (SS), el efecto anidado Variedad en la SS, pero si para las interacciones C*SS y C*V (Cuadro 8). En contraste para biomasa de hojas y total el se observaron efectos significativos para

Ciclo de cultivo, el efecto anidado SS>V y sus interacciones (Cuadro 9), con excepción de la SS.

Cuadro 8. Cuadrados medios del ANOVA de la acumulación de biomasa de las variedades Mex 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Factor de variación	GL	Cuadrado medio		
		Biomasa tallos	Biomasa hojas	Biomasa total
C	1	1071.19 NS	8248.04**	3374.38*
SS	1	827.33 NS	0.61 NS	782.97 NS
SS>V	2	918.88 NS	465.46**	2574.44*
C*SS	1	4828.08**	177.46 NS	6856.84**
C*V	1	1976.37 *	488.44*	4429.86*
Error	153	409.53	93.95	695.37
CV (%)		47.48	74.8	47.45

C= ciclo, V= variedad, SS= subunidad de suelo, SS>V= factor anidado (V dentro de SS), GL= grados de libertad, *=P<0.05, **=P<0.01, NS= no significativo.

La interacción ciclo de cultivo por subunidad de suelo (C*SS) y C*variedad para la biomasa de tallos se muestran en las Figuras 16a y b para el ciclo resoca 1 y en la Figuras 17a y b para el ciclo resoca 2.

En la resoca 1, la variedad Mex 69-290 no muestra diferencias en la acumulación de biomasa de tallos en ambas subunidades de suelo (Figura 16a), pero en la resoca 2, la acumulación de esta biomasa en tallos se vió fuertemente afectada cuando se cultivó en la subunidad FLeu. Respecto a la variedad CP 72-2086 tanto en resoca 1 como en resoca 2 acumuló mayor biomasa de tallos en la subunidad FLeu, consistente con la altura de planta (Figura 8a y b).

La biomasa del follaje siempre fue incrementa lineal mente desde el mes diciembre 2019 en la variedad Mex 69-290 en la SS VReu y en la CP 70-2086 en la SS FLeu en el ciclo resoca 1 (Figura 16 c y d). En el ciclo resoca 2, ambas variedades produjeron menor follaje en ambas subunidades de suelo en el ciclo resoca 1 (Figura 17 c y d).

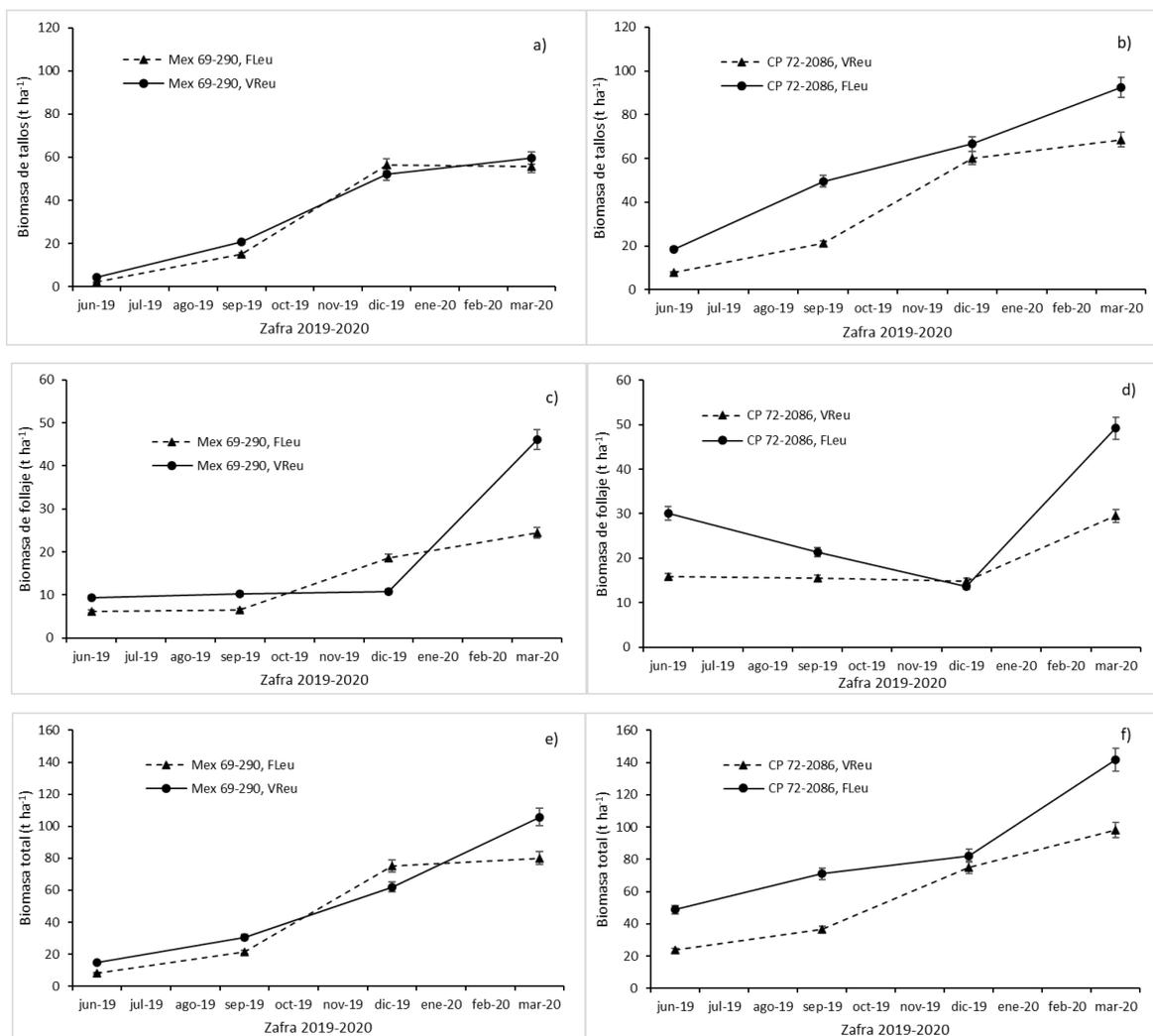


Figura 16. Biomasa de tallos de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b); biomasa follaje de las variedades Mex 69-290 (c) y CP 72-2086 (d); y biomasa total de las variedades Mex 69-290 (e) y CP 72-2086 (f) durante el ciclo de resoca 1 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. FLeu = Fluvisol eútrico, VReu = Vertisol eútrico.

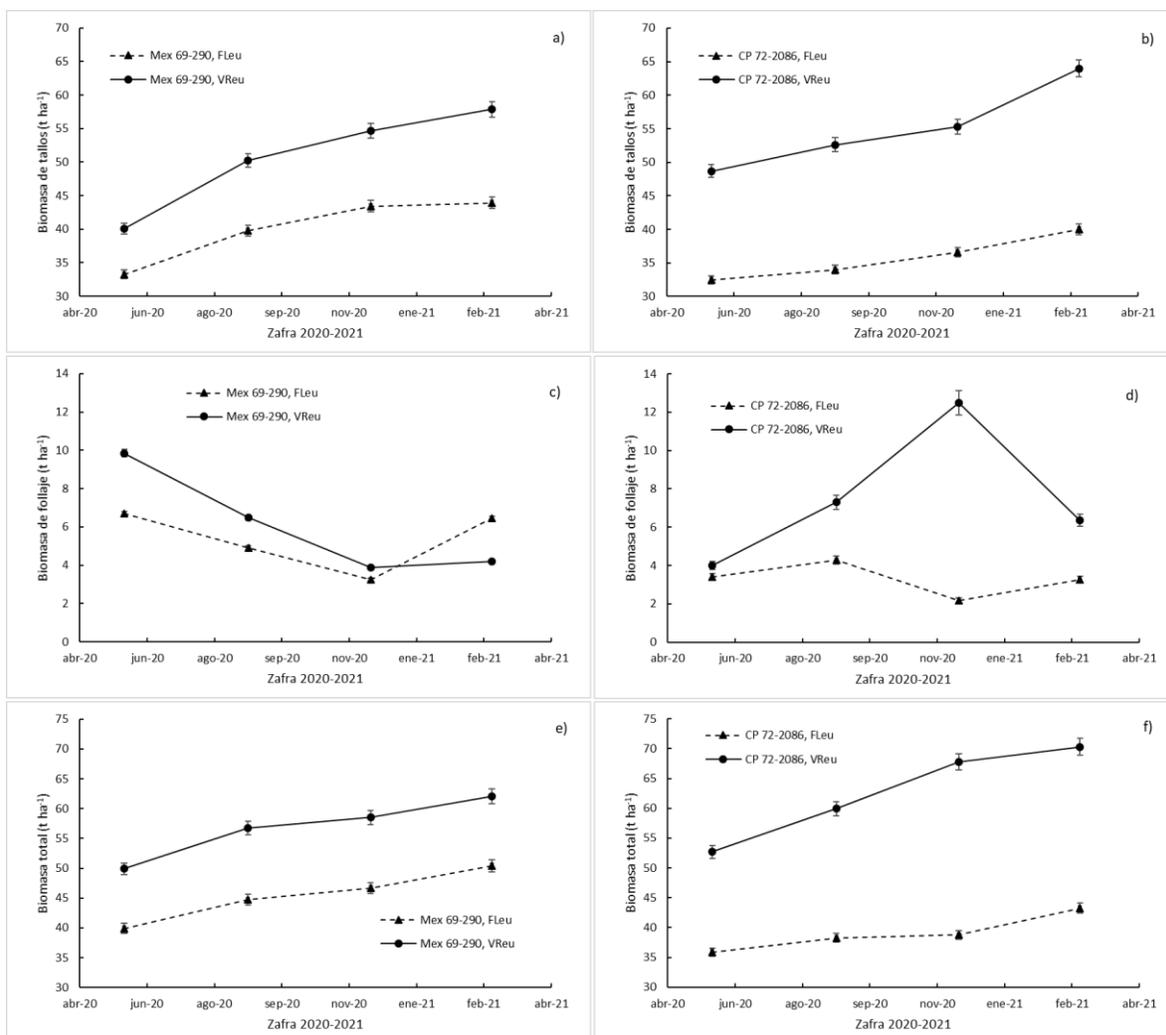


Figura 17. Biomasa de tallos de las variedades Mex 69-290 (a) y CP 72-2086 (b); biomasa follaje de las variedades Mex 69-290 (c) y CP 72-2086 (d); y biomasa total de las variedades Mex 69-290 (e) y CP 72-2086 (f) durante el ciclo resoca 2 cultivadas en dos subunidades de suelos del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. FLeu = Fluvisol eútrico, VReu = Vertisol eútrico.

En biomasa total, ambas variedades mostraron el mismo comportamiento que para la acumulación de biomasa de tallos en ambas SS y ciclos de cultivo (Figuras 17 e y f, 18 e y f).

La Figura 18a y b muestra los promedios en biomasa de tallos para ambos ciclos de cultivo y variedades. El efecto de la SS solo se observa en la resoca 2, donde en promedio las variedades alcanzaron mayor biomasa promedio de tallos en el suelo

VReu, pero al observar el efecto variedad, es la resoca 1 donde se observa la mayor acumulación de biomasa en tallos en la CP 70-2086.

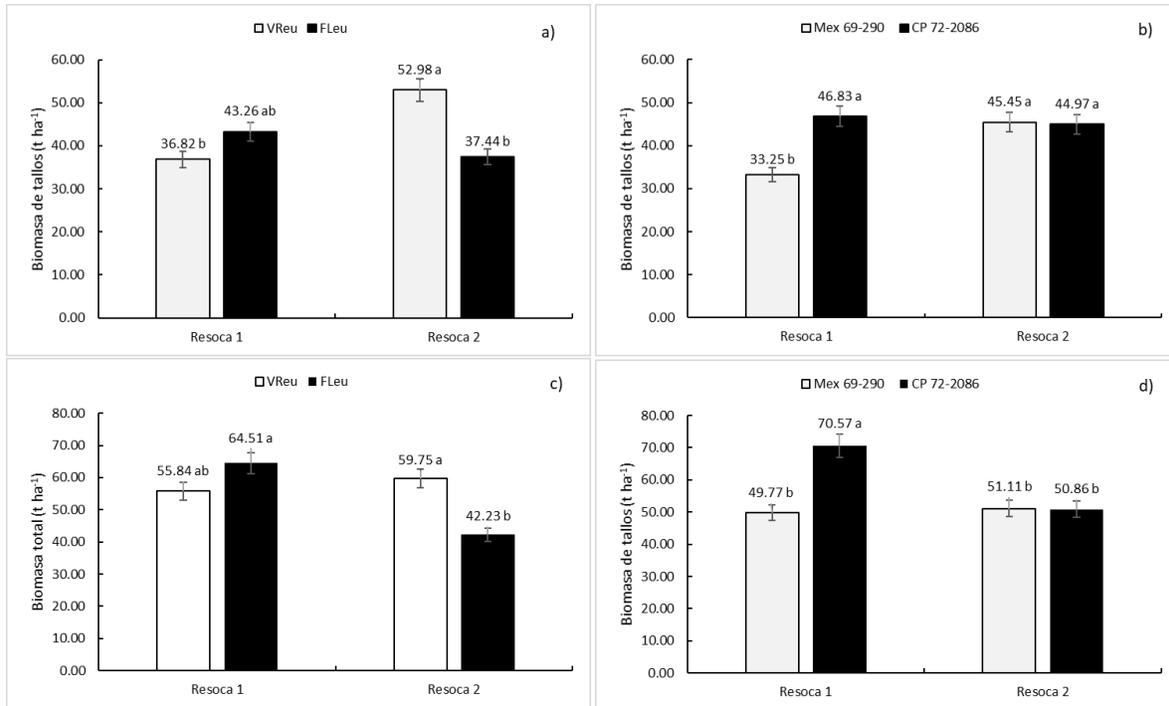


Figura 18. Promedios de biomasa de tallos por subunidad de suelo (a) y por variedad (b) y de biomasa total por subunidad de suelo (c) y por variedad (d) durante dos ciclos de resoca cultivadas en dos subunidades de suelos del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. FLeu = Fluvisol eútrico, VReu = Vertisol eútrico.

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 6, 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-García *et al.*, 2013a).

6.4. Rendimiento de caña y calidad de jugos

En el Cuadro 9 se presenta, los resultados del análisis de varianza y medias de Tukey de rendimiento de caña y de calidad de jugos de dos variedades de caña de azúcar cultivadas en dos subunidades de suelo de dos ciclos de crecimiento dentro

del área de abastecimiento del ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco. Como se observa en el ciclo Resoca 2 la variedad Mex 69-290 obtuvo sus mayores valores de °Brix en comparación del ciclo Resoca 1 en ambas subunidades de suelo y el mismo comportamiento se registro para el ciclo Resoca 2 de la variedad CP 72-2086 que en el ciclo Resoca 1 en ambas subunidades de suelo. Lo mismo sucede con el Pol (%) que en el ciclo Resoca 2 se registraron los mayores valores que en el ciclo Resoca 1 para las variedades y subunidades en estudio. El contenido de fibra (%) y la pureza (%) presentaron ligeros cambios en ambos ciclos de crecimiento, destacando que la variedad CP 72-2086 en subunidad VReu presentó sus menores valores en el ciclo Resoca 1. En relación al rendimiento de tallos, follaje y total (ton ha^{-1}), se observa claramente que el ciclo Resoca 2 presenta una disminución de los rendimientos y este comportamiento se ha reportado anteriormente (Salgado, 2019). Para el ciclo Resoca la variedad CP 72-2086 presenta su mayor rendimiento en subunidad FLeu y la variedad Mex 69-290 en la subunidad VReu. Para ciclo Resoca 2, la variedad CP 72-2086 disminuye su rendimiento en subunidad FLeu y aumenta en VReu, y la variedad Mex 69-290 mantiene su rendimiento en la subunidad VReu.

6.5. Relación entre los índices de área foliar y vegetación con parámetros de crecimiento

En el Cuadro 10 se presentan las correlaciones de Pearson entre el NDVI y IAF con las variables de crecimiento y acumulación de biomasa. Los resultados muestran una correlación altamente significativa ($P \leq 0.05$) entre el NDVI y la altura y diámetro de tallos, e IAF, con un coeficiente de correlación (R) de 0.78, 0.58 y 0.61, respectivamente. El NDVI 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).

Cuadro 9. Medias de rendimiento de caña y de calidad de jugos de dos variedades de caña de azúcar cultivadas en dos subunidades de suelo del área de abastecimiento del ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Ciclo (C)	Var (V)	Subunidad de suelo (SS)	°Brix	Pol (%)	Pureza (%)	Fibra (%)	Az. Red	Humedad (%)	Biomasa de tallos (t ha ⁻¹)	Biomasa de follaje (t ha ⁻¹)	Biomasa total (t ha ⁻¹)
Resoca 1	Mex 69-290	VReu	14.17 c	12.17 c	85.77 a	10.38 b	0.76 b	75.83 a	61.2 bc	46.3 a	107.48 b
		FLeu	15.26 bc	13.25 bc	86.73 a	12.37 a	0.69 b	73.03 bc	49.7 bc	24.57 b	74.33 c
	CP 72-2086	VReu	11.81 d	8.71 d	73.68 b	11.2 ab	1.45 a	77.6 a	70.16 b	28.78 b	98.96 b
		FLeu	16.28 bc	13.79 bc	84.17 a	12.89 a	0.67 b	71.17 bcd	106.7 a	50.37 a	157.35 a
Resoca 2	Mex 69-290	VReu	19.3 a	16.91 a	87.55 a	12.17 ab	0.81 b	70 d	57.28 bc	3.78 c	61.06 cd
		FLeu	19.02 a	16.9 a	88.8 a	12.52 a	0.33 b	69.5 d	39 c	5.74 c	44.78 d
	CP 72-2086	VReu	17.38 ab	15.48 ab	89.07 a	12.68 a	0.40 b	70.57 cd	59.6 bc	4.05 c	63.67 cd
		FLeu	15.85 bc	13.54 bc	85.49 a	11.89 ab	0.68 b	73.13 b	41.36 c	4.18 c	45.54 d
D.M.S			2.29	2.31	5.52	1.97	0.54	2.55	24.64	11.75	23.74
Media			16.14	13.84	85.22	12.01	0.73	72.6	60.7	20.9	81.64
C.V. (%)			5.02	5.9	2.29	5.82	26.2	1.25	14.3	19.8	10.3
Prob. F.											
C			<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.0494	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*
SS			0.0127	0.0063*	<0.001*	0.0118	<0.001*	<0.001*	0.44 NS	0.77 NS	0.51 NS
SS>V			<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.27 NS	0.23 NS	0.04	<0.001*	<0.001*	<0.001*
C*SS			0.0116	0.18 NS	<0.001*	0.21 NS	0.045	0.01	<0.001*	0.17 NS	<0.001*
C*V			<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	0.07 NS	<0.001*	<0.001*	0.74 NS	<0.001*
C*V*SS			0.0031*	<0.001*	<0.001*	0.47 NS	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*	<0.001*

Letras iguales entre columnas no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

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. Jurecka *et al.* (2016) encontraron correlaciones de 0.61 y 0.72 con el rendimiento, utilizando el sensor de cultivo GreenSeeker® para medir el NDVI en caña de azúcar. Por su parte, Salgado (2019), encontraron resultados similares en el ciclo soca sobre las mismas condiciones de crecimiento para las mismas variedades en estudio, donde la correlación entre NDVI y altura y biomasa de tallos fue de 0.78 y 0.86. En los ciclos resocas de estudio no se reportaron correlaciones significativas entre NDVI y la acumulación de biomasa.

Cuadro 10. Correlaciones de Pearson entre el NDVI y el IAF con parámetros de crecimiento y acumulación de biomasa de las variedades Mex 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de abastecimiento del Ingenio Santa Rosalía, Cárdenas, Tabasco.

Parámetros	R	P-value		R	P-value
Altura tallos	0.78	<0.0001*	Altura tallos	0.63	<0.0001*
Diámetro tallos	0.58	<0.0001*	Diámetro tallos	0.43	<0.0001*
IAF	0.61	<0.0001*	NDVI	0.61	<0.0001*
NDVI Número Tallos	0.29	<0.0001*	IAF Número Tallos	0.55	<0.0001*
BT	0.46	0.01	BT	0.55	<0.0001*
BF	0.29	0.10	BF	0.57	<0.0001*
BTOT	0.47	0.10	BTOT	0.66	<0.0001*

N. Tallos= número de tallos, BT= biomasa de tallos, BF= biomasa de follaje, BTOT= biomasa total, *= significancia al $P \leq 0.05$.

El IAF mostró correlaciones positivas y significativas con parámetros de crecimiento y acumulación de biomasa, siendo el coeficiente de correlación (R) de 0.63, 0.55, 0.57 y 0.66, entre IAF y altura y biomasa de tallos, biomasa de follaje y biomasa total, respectivamente. El IAF es un parámetro biofísico que contribuye al estimar la productividad de los cultivos. Pocos estudios en caña de azúcar han mostrado la relación entre IAF y rendimiento de caña. Abu-Ellail *et al.* (2020) mostraron, al estudiar cinco genotipos de caña de azúcar, que aquellos genotipos con el IAF mas alto fueron también los que mostraron mayor rendimiento de tallos.

6.6. Relación entre variables climáticas, índices de vegetación y parámetros fisiológicos en caña de azúcar

En el Cuadro 11 se presentan las correlaciones entre variables climáticas con las de crecimiento y acumulación de biomasa. La temperatura media mostró correlaciones negativas y significativas ($p \leq 0.05$) con altura de tallos (-0.69), IAF (-0.54), NDVI (-0.53) y biomasa de tallos (-0.65) y biomasa total (-0.59). Asimismo, la temperatura máxima mostró correlaciones significativas y negativas ($p \leq 0.05$) con altura de tallos, IAF, NDVI y biomasa de tallos y total con un R de -0.75, -0.59, -0.59, -0.54 y -0.57, respectivamente. Es decir, a mayor temperatura menor altura, biomasa de tallos y total, IAF y NDVI. La temperatura mínima no mostró correlaciones significativas con ninguna variable de crecimiento y de acumulación de biomasa. La precipitación solo mostró correlación altamente significativa con la altura de planta, pero el valor de la correlación fue bajo, solo 0.37. Las correlaciones entre la humedad relativa y la altura y diámetro de tallos, NDVI y biomasa de tallos fueron positivas y significativas con un R de 0.68, 0.60, 0.53, 0.61, respectivamente. Es decir, que a mayor humedad relativa mayor crecimiento y acumulación de biomasa de tallos. Estas correlaciones confirman el efecto de las variables climatológicas en el crecimiento de la caña de azúcar, mostrando un efecto negativo las temperaturas altas y un efecto positivo la humedad relativa.

Cuadro 11. Correlaciones de Pearson (R) entre variables climáticas, índices de área foliar y de vegetación y parámetros de crecimiento de las variedades Mex 69-290 y CP 72-2086 cultivadas en dos subunidades de suelo del área de abastecimiento 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	-0.69	0.001*	-0.75	0.001*	-0.27	0.01	0.37	<0.0001*	0.68	<0.0001*
Diámetro	-0.45	<0.0001*	-0.52	0.001*	-0.06	0.54	0.27	0.01	0.60	<0.0001*
IAF	-0.54	<0.0001*	-0.59	0.001*	-0.22	0.03	0.28	0.01	0.45	<0.0001*
NDVI	-0.53	<0.0001*	-0.59	<0.0001*	-0.20	0.06	0.26	0.01	0.53	<0.0001*
N. Tallos	-0.10	0.33	-0.17	0.15	0.01	0.95	0.11	0.30	0.01	0.89
BT	-0.65	<0.0001*	-0.54	<0.0001*	-0.38	0.03	0.03	0.89	0.61	<0.0001*
BF	0.25	0.17	0.39	0.06	-0.01	0.96	-0.02	0.96	0.14	0.44
BTOT	-0.59	<0.0001*	-0.57	<0.0001*	-0.29	0.10	0.02	0.95	0.52	<0.0001*

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

V. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se concluye que el crecimiento y desarrollo de la primera y segunda resoca 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) Las variables de estudio fueron afectadas por el ciclo de cultivo y el efecto anidado de la variedad dentro del suelo.
- b) Para el efecto del ciclo de cultivo, la altura y diámetro de tallos, IAF y número de tallos disminuyeron con el ciclo de cultivo. Las cañas de azúcar en estudio presentaron mayores crecimientos, IAF y número de tallos en el resoca 1 en comparación con el ciclo resoca 2.
- c) Respecto al efecto de interacción variedad x ciclo de cultivo, la variedad CP 72-2086 presentó mayor biomasa de tallos y total en el ciclo resoca 1 y la variedad Mex 69-290 en el ciclo resoca 2. En general, en suelo FLeu y en el ciclo resoca 1 se observó un efecto positivo para la acumulación de biomasa de tallos y total, mientras que, en el ciclo resoca 2, este efecto se observó en el suelo VReu.
- d) Respecto al efecto anidado de la variedad dentro del suelo, en la subunidad de suelo VReu se presentó un mejor desarrollo fenológico de la variedad Mex 69-290 y en la subunidad de suelo FLeu se desarrolla mejor la variedad CP 72-2086, aunque los rendimientos de tallo fueron en resoca 1, 106.7 t ha^{-1} para CP 72-2086 en FLeu y 75.8 t ha^{-1} para Mex 69-290 en suelo VReu; en resoca 2, 59.6 t ha^{-1} para CP 72-2086 en suelo VReu y 57.2 t ha^{-1} para Mex 69-290 en suelo FLeu.
- e) Las correlaciones entre NDVI con las variables de altura, diámetro de tallos e IAF fueron altas y positivas. El IAF presentó correlaciones altas y positivas con altura de planta, biomasa del tallo, del follaje y total. Las variables climáticas de temperatura media y máximas, precipitación y humedad relativa mostraron correlaciones significativas y negativas con los parámetros de crecimiento (altura), IAF, NDVI y acumulación de biomasa en tallos y total.

VI. LITERATURA CITADA

- Abu-Ellail, F.F.B., Gadallah A.F.I., El-Gamal I.S.H. 2020. Genetic variance and performance of five sugarcane varieties for physiological, yield and quality traits influenced by various harvest age. *Journal of Plant Production* 11(5):4 29 – 438.
- 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.
- 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.
- 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.

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. 2021. Estadísticas por ingenio. Unión Nacional de Cañeros, A.C: <http://www.caneros.org.mx/> (2021).

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 Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia). 1990. Analítico: 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. Handbook 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.
- 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>
- FAOSTAT. 2021. Datos sobre alimentación y agricultura. Cultivos y productos de ganadería. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- 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
- 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.
- Francisco, M.A.D. y Fernández, B.J. 2021. 8° Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar y reporte final de producción de caña y azúcar de al zafra 2020/21. <https://atamexico.com.mx/noticia-de-interes/8-informe-estadistico-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-y-reporte-final-de-produccion-de-cana-y-azucar-de-la-zafra-2020-21/>). Consultado el 08 de abril de 2022.
- 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
- Gómez-Merino, F.C., Trejo-Téllez L.I. y Aguilar-Rivera N. 2021. Agregación de valor y diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar en México: opciones y desafíos. <https://atamexico.com.mx/noticia-de-interes/agregacion-de-valor-y-diversificacion-de-la-agroindustria-de-la-cana-de-azucar-en-mexico-opciones-y-desafios/>
- 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.

- Humbert, R.P. 1974. El cultivo de la caña de azúcar. Ed. Continental. México, D.F.
- 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.
- 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.
- Inman-Bamber, N.G. and Smith D.M. 2005. Water relations in sugarcane and response to waters 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.
- 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 RepublicPhd 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.
- 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.
- Matsuoka, S. and Stolf, R. 2012. Chapter 5. Sugarcane tillering and ratooning: key factors for a profitable cropping. In: *Sugarcane: Production, Cultivation and Uses* Editors: João F. Goncalves and Kauê D. Correia. Nova Science Publishers, Inc. ISBN: 978-1-61942-213-1.
- 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.
- 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.
- Molijn, R.A., Iannini, L., Vieira Rocha, J. and Hanssen, R.F. 2018. Data Descriptor: Ground reference data for sugarcane biomass estimation in São Paulo state, Brazil, *Scientific data* 5: 180150. DOI: 10.1038/sdata.2018.150
- Naranjo de la F. J., Salgado G. S., Lagunes-Espinoza L.C., Carrillo Avila E. and 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.

Ochoa, N.M.G., Reyes, G.M. y Manríquez, N.J.A. 2010. La producción sostenible de caña de azúcar en México. FIRA Boletín Informativo Nueva Época. Número 11. México.

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.

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.

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.
- 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.
- Rudorff y Batista, 1990
- Rudorff, B. F. T., & Batista, G. T. 1990. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. Remote sensing of Environment, 33(3), 183-192.
- 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, V.S. 2019. Dinámica de crecimiento de variedades de caña de azúcar en diferentes condiciones edáficas en la Chontalpa, Tabasco. Tesis de Maestría en ciencias. Posgrado en Producción Agroalimentaria en el Trópico. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México. 103 p.
- Salgado-García, 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-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.
- 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 Juárez' 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., 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., Ortiz-García C.F., Castelán-Estrada M., Guerrero-Peña A., Aranda-Ibáñez 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-Velázquez, S., Salgado-García S., Rincón-Ramírez J.A., Rodrigues Jr. F.A., Palma-López D.J., Córdova-Sánchez S. and López-Castañeda A. 2020. Spatial Variability of Soil Physicochemical Properties in Agricultural Fields Cultivated with Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in Southeastern Mexico. *Sugar Tech* 22: 65–75
- 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. 2004. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. *Scientia Agricola* 61(5): 486-491.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. 2021. Caña de azúcar un cultivo de importancia para México. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cana-de-azucar-un-cultivo-de-importancia-para-mexico>). Consultado el 08 de abril de 2022.
- SIAP, 2020. Servicio de información agroalimentaria y pesquera. Producción agrícola. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>.
- 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., Vieira R.J. and Camargo L.R.A.. 2005b. Growth indices and productivity in sugarcane. *Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.)*. 62(1): 23-30.
- 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.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of the Environment* 8:127-150.

- Unión Nacional de Cañeros, 2021. Estadísticas actuales.
<http://caneros.org.mx/estadistica-actual/>
- Valdez 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.
- 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.
- 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>