

Diagnóstico de rendimientos de caña de azúcar utilizando factores climatológicos múltiples

Enrique Sebastián Arias Flores

Zamorano, Honduras

Diciembre, 2008

ZAMORANO
CARRERA DE ADMINISTRACIÓN DE AGRONEGOCIOS

Diagnóstico de rendimientos de caña de azúcar utilizando factores climatológicos múltiples

Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Administración de Agronegocios en el Grado
Académico de Licenciatura

Presentado por

Enrique Sebastián Arias Flores

Zamorano, Honduras

Diciembre, 2008

Diagnóstico de rendimientos de caña de azúcar utilizando factores climatológicos múltiples

Presentado por:

Enrique Sebastián Arias Flores

Aprobado:

Norman Flores, B.Sc.
Asesor Principal

Adolfo Fonseca, M.A.E.
Director Interino de la Carrera de
Administración de Agronegocios

Oscar Zelaya, Ph.D.
Asesor

Raúl Espinal, Ph.D.
Decano Académico

Fredi Arias, Ph.D.
Asesor

Kenneth L. Hoadley, D.B.A.
Rector

Guillermo Berlioz, B.Sc.
Coordinador de Tesis

RESUMEN

Arias, S. 2008. Diagnóstico de rendimientos de caña de azúcar utilizando factores climatológicos múltiples. Proyecto de graduación del programa de Ingeniería en Administración de Agronegocios, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 22 p.

El presente estudio busca desarrollar un modelo de diagnóstico de rendimientos de caña de azúcar por medio del análisis estadístico a través de regresiones múltiples de factores climáticos como temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y humedad relativa con datos de 1999 hasta el año 2007. Se han desarrollado dos escenarios de regresión múltiple considerando el periodo de crecimiento vegetativo de la caña de azúcar de febrero a septiembre, el primero toma en cuenta la variable dependiente como logaritmo natural obteniendo un $r^2 = 0.33$ con un valor $p < 0.05$. Considerando en el segundo escenario la variable dependiente como estimado acumulado de rendimiento, se ajusta el modelo a un $r^2 = 0.49$, con un valor de $p < 0.05$, determinando que la temperatura máxima, temperatura mínima y radiación solar afectan positivamente el rendimiento de caña de azúcar con coeficientes de 1.7680, 11.7420 y 0.0803 respectivamente, mientras que la precipitación por su parte tiene un efecto negativo en el rendimiento cañero (-0.0200). Los resultados muestran que ninguno de los análisis brinda un coeficiente de determinación confiable para la implementación del modelo; a través del análisis de Mallows se descarta la significancia estadística de la temperatura máxima y radiación solar, siendo la temperatura mínima y precipitación, con un valor de $r^2 = 0.48$ y un valor $C-p = 2.10$, las variables de mejor ajuste para el modelo. Resultados similares fueron obtenidos por Clements, H. (1980), que consideró, a parte de los factores mencionados, datos de humedad relativa y velocidad del viento como variables independientes obteniendo un $r^2 = 0.53$

Palabras clave: Estadística, Mallows, precipitación, regresión múltiple, temperatura.

CONTENIDO

Portadilla.....	i
Página de firmas.....	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de cuadros y figuras.....	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
5. CONCLUSIONES	19
6. RECOMENDACIONES	20
7. BIBLIOGRAFÍA	21

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadro	Página
Cuadro 1. Distribución de estimados de rendimiento mensual, expresado en t/ha.....	10
Cuadro 2. Análisis de regresión múltiple considerando Y como \ln , coeficientes, error estándar los coeficientes (S_e Coef), valores t y p	155
<small>155_Toc210441352</small>	
Cuadro 3. ANDEVA. Escenario N°1.....	155
Cuadro 4. Análisis de regresión múltiple considerando Y como rendimiento acumulado, coeficientes, error estándar de los coeficientes (S_e Coef), valores t y p	166
<small>166_Toc210441355</small>	
Cuadro 5. ANDEVA. Escenario N°2.....	166
Cuadro 6. Análisis de Mallows (C-p). Escenario N°2.....	177
Figura	
Figura 1. Área de producción de caña de azúcar. El Progreso, Honduras.....	3
Figura 2. Distribución mensual de precipitación. El Progreso, Honduras.....	6
Figura 3. Comportamiento mensual de temperatura máxima y mínima. El Progreso, Honduras.....	6
Figura 4. Distribución mensual de radiación solar. El Progreso, Honduras.....	7
Figura 5. Curva de crecimiento porcentual de caña de azúcar para ocho meses.....	10

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día tenemos la oportunidad de evaluar la utilidad que un registro climatológico puede prestar a la explotación racional y económicamente favorable de un cultivo en especial, sin embargo, a nivel latinoamericano son pocas las herramientas y estudios que se han desarrollado en este sentido.

Los sistemas agrícolas de producción son caracterizados por la interacción entre elementos climáticos, tipos de suelo, operaciones administrativas y características varietales. Es difícil analizar el rendimiento en términos de limitantes de producción o el diseño óptimo de un sistema de administración. (Lisson *et al.* 2000).

La agricultura es altamente vulnerable a las variaciones climáticas. Una razón por la cual los efectos son tan devastadores es que no tenemos conocimiento de las condiciones de la siguiente temporada de cultivo. Cambios meteorológicos impredecibles llevan a la planeación de estrategias conservadoras que sacrifican la productividad y por lo cual el rendimiento difiere de un lugar del mundo a otro. La disponibilidad de mejores herramientas ayudaría a tomar mejores decisiones y así reducir impactos negativos, tomando ventaja de dichas variaciones. (Jones F.W. 2000).

Es importante considerar que aún cuando una cierta especie vegetal sea capaz de desarrollarse sobre una gran diversidad de climas, los efectos fisiológicos que la planta experimenta no son los mismos en cada uno de ellos. Considerando así la caña de azúcar, cuya explotación comercial se reduce a una banda tropical que va desde los 36.7°N y 31.0°S de latitud y desde el nivel del mar hasta los 1000 m. o más de altitud, requiere condiciones especiales de radiación solar, temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y diversos factores que afectan su rendimiento. (Martínez, 1972).

De acuerdo a datos presentados por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2005, el área total de producción de caña de azúcar a nivel mundial es de, aproximadamente, 19.24 millones de hectáreas distribuidas en Asia 42.5%, América 47.7%, África 7.4% y Oceanía con un 2.4%. Con una producción mundial de 1,267 millones de toneladas, siendo el principal productor Brasil con un 34 % de la producción mundial, India 18 %, China 7 %, Pakistán 4 %, México 4 %, Tailandia 3%, Colombia 3% y otros países representan el 27%.

En Honduras la historia del cultivo de la caña de azúcar comienza a mediados de 1920, cuando se inician operaciones en dos ingenios de la Costa Norte del país: el Ingenio Sugar Co., en las cercanías de La Lima, y el Ingenio Montecristo cerca de La Ceiba.

La industria azucarera hondureña fue fundando empresas como: Azucarera del Norte, S.A. (1974), Azucarera Yojoa, S.A., Azucarera Cantarranas, S.A., (actualmente Compañía Azucarera Tres Valles, S.A.), y Azucarera Central, S.A., (en la actualidad Azucarera La Grecia, S.A.), fundadas estas últimas en 1976.

Después del devastador huracán Fifi en 1977, la compañía Azucarera del Norte S.A., lugar en donde se llevó a cabo el presente estudio, inicia con la siembra de 572 ha, las que en un principio se utilizaron como semillero para lograr ampliar el área de cultivo y obtener las mejores variedades para la producción.

Fue hasta el año de 1979 que, Azucarera del Norte S.A., inicia con la molienda propia; dos décadas más tarde el huracán Mitch causó innumerables daños a nivel productivo y humano en toda Honduras y a nivel empresarial surge la necesidad de implementar tecnologías y herramientas que ayuden a mitigar o prever este tipo de catástrofes, que sin duda alguna llevará a la consecución de mejores prácticas agrícolas, administrativas y de desarrollo socio-económico. Actualmente la compañía cultiva alrededor de 5,826 ha con una productividad de 108.74 t/ha; esta empresa representa el 2.3% de la industria azucarera de Centroamérica.

A nivel centroamericano no existen estudios que permitan estimar o diagnosticar objetivamente el rendimiento cañero, mucho menos modelos probados y validados que se puedan replicar en sectores con similares características agronómicas y/o climáticas.

Los diferentes factores climáticos que actúan sobre un lugar determinado condicionan en gran medida las fases del ciclo productivo de la caña y los resultados finales de esta. A cada lugar corresponde un rendimiento máximo dependiente de las condiciones climáticas del año. A la media de esas condiciones climáticas corresponde una media de rendimiento máximo, o rendimiento potencial específico. (Fauconnier, R. 1975).

Por todos estos factores y las características del entorno, este estudio adopta un acercamiento empírico pero que incorpora implícitamente variables climáticas y tiene por objetivo el diseño de un modelo de diagnóstico de rendimientos de caña de azúcar, además medir el impacto de cada factor en el rendimiento y la eliminación de variables no significativas en el modelo, sentando las bases científicas para posteriores estudios en la industria azucarera centroamericana en general.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Honduras se encuentra en la zona climática tropical, que presenta condiciones térmicas similares durante todo el año. Debido a su posición en la franja costera del océano Atlántico y su carácter montañoso, podemos encuadrar su condición en el clima monzónico y de los vientos alisios en el litoral. Por su posición, Honduras recibe el impacto frecuente de los huracanes que se generan en el Atlántico y las sequías provocadas por el fenómeno de El Niño proveniente del océano Pacífico.

La caña de azúcar es mayormente cultivada en la región Suroeste del departamento de Yoro, a escasos kilómetros de la ciudad de El Progreso ubicada a $15^{\circ} 15'N$, $87^{\circ} 53'O$ (Figura.1).



Figura 1. Área de producción de caña de azúcar. El Progreso, Honduras.

El clima hondureño es tropical con tendencia al monzón. Las temperaturas son elevadas todo el año, y es mucho más húmedo en la vertiente antillana que en la pacífica. En la

costa norte las temperaturas son muy altas, no obstante las brisas marinas y las constantes lluvias de la zona moderan el calor.

Existen dos estaciones bien marcadas: la seca y la húmeda. La estación seca abarca de noviembre a abril, mientras que la húmeda se extiende de mayo a octubre.

Podemos dividir Honduras en seis zonas climáticas, siendo la de nuestro interés por su ubicación y cercanía al área de estudio la siguiente:

Zona litoral del Atlántico

La zona litoral del Atlántico abarca la costa del Caribe hasta la Mosquitia. Caen aproximadamente 2.600 mm de lluvia anuales, con más de 167 días de lluvia al año. La temporada lluviosa comienza en junio con un incremento gradual hasta septiembre, con un promedio de 400 mm cada mes. Los meses menos lluviosos son abril y mayo (80 mm). El promedio anual de humedad relativa es del 82%, la temperatura media anual es de 27 °C, con 10 grados de amplitud térmica. Los meses más cálidos son mayo y junio, y los más frescos diciembre y enero. (La Guía 2000. 2007).

Factores climáticos en el rendimiento de caña de azúcar

La caña de azúcar es un cultivo que requiere de un estudio preciso de los recursos climáticos y de las condiciones meteorológicas. Está demostrado que las limitaciones fundamentales para el crecimiento y desarrollo de esta planta se deben al componente clima, que generalmente se comporta de forma homogénea. (Valdés, M. 2001).

La lluvia es uno de los factores del clima que con mayor frecuencia se vuelve una limitante para el desarrollo del cultivo, debido a que su distribución en el transcurso del año es desigual, teniendo marcadas épocas de exceso y escasez, mientras que la temperatura y la duración del día varían muy poco y raras veces representa una limitante para el desarrollo del cultivo, sin embargo es prescindible su análisis.

Para que la caña de azúcar complete satisfactoriamente las distintas fases: germinación, crecimiento y maduración, debe contar con condiciones climáticas favorables. (Subiros, F. 1995).

Los principales factores que interfieren son:

Temperatura

La temperatura junto con la humedad son dos de los factores que más relevancia tienen en el proceso de la germinación y desarrollo. La temperatura óptima para la germinación de las yemas y el desarrollo del cultivo se ubica entre los 27 y 33°C. A valores de 20°C el

crecimiento disminuye notoriamente y si la temperatura disminuye más, el crecimiento prácticamente se paraliza. Cuando la temperatura es mayor a los 35°C, aumenta la respiración y disminuye la tasa fotosintética, lo que ocasiona una reducción en el crecimiento, y por lo tanto, una menor acumulación de materia seca.

Las variaciones de temperatura nocturna y diurna influyen en el macollamiento. Cuando estas variaciones se presentan y el valor promedio es de 26°C, se favorece ésta característica; sin embargo, se reduce cuando los valores medios son menores a 21°C. La temperatura también afecta otros procesos, como el de floración, por ejemplo.

Precipitación

El suministro de agua, ya sea en forma natural o mediante riego, es necesario durante todo el período de crecimiento. En promedio, se requieren de 1200 a 1500 mm anuales, distribuidos de la mejor manera posible durante el periodo vegetativo. La demanda aumenta conforme al crecimiento de la planta, debido a que la transpiración aumenta. Cuando la temperatura es elevada, la demanda de agua es mucho mayor.

Radiación Solar

La radiación es la principal fuente de energía de las plantas. La caña de azúcar pertenece al grupo de plantas que posee un sistema fotosintético C₄, que es capaz de fijar de forma más eficiente la radiación solar.

La asimilación clorofílica es proporcional a la intensidad y a la duración de las radiaciones luminosas, además la absorción de agua, transpiración y absorción de nutrientes es sensiblemente afectada por la cantidad de radiación solar. (Fauconnier, R. 1975).

Crecimiento de la caña de azúcar

El período de crecimiento se considera como la época agroclimática óptima para el crecimiento de las plantas, por lo que es de utilidad práctica su conocimiento en regiones agrícolas. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2005.

En la localidad de El Progreso, Honduras, la siembra se lleva a cabo entre los meses de febrero a marzo, aprovechando cierta cantidad de lluvia, temperaturas máximas y mínimas favorables para su normal desarrollo, así como también la radiación solar presente. Se pueden visualizar las distribuciones anuales de los factores mencionados. Figuras. 2, 3 y 4.

La edad de corte de la caña de azúcar generalmente es de 12 meses, empezando el período de cosecha a finales del mes de diciembre y extendiéndose hasta mediados de junio, aprovechando el período seco del año.

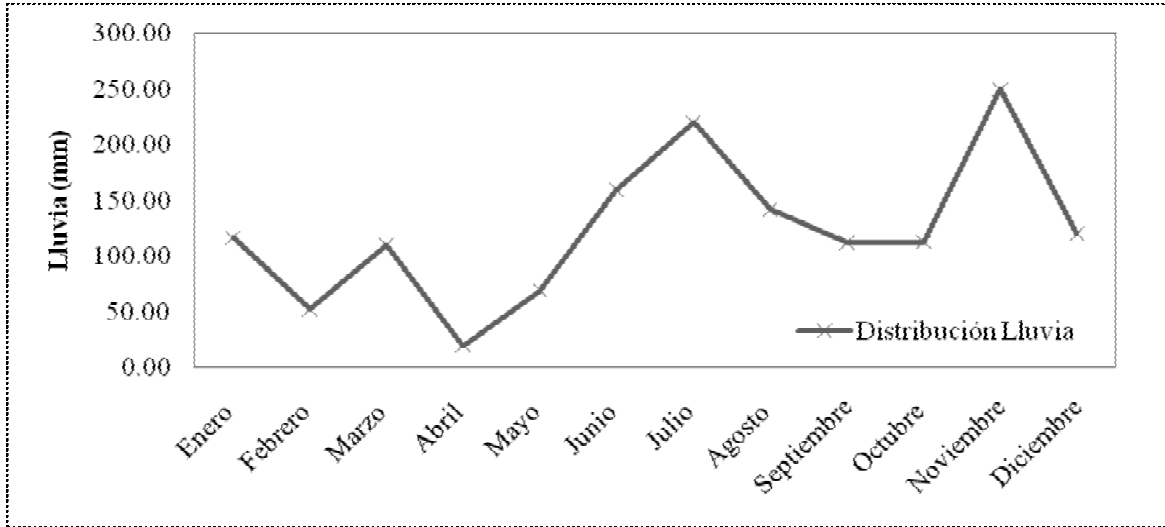


Figura 2. Distribución mensual de precipitación. El Progreso, Honduras

FUENTE: Azucarera del Norte S.A.

El área bajo estudio presenta su época de mayor sequía en los meses de enero a mayo, con picos de precipitación en julio y noviembre. En general, se presenta una mala distribución de lluvias durante la época lluviosa.

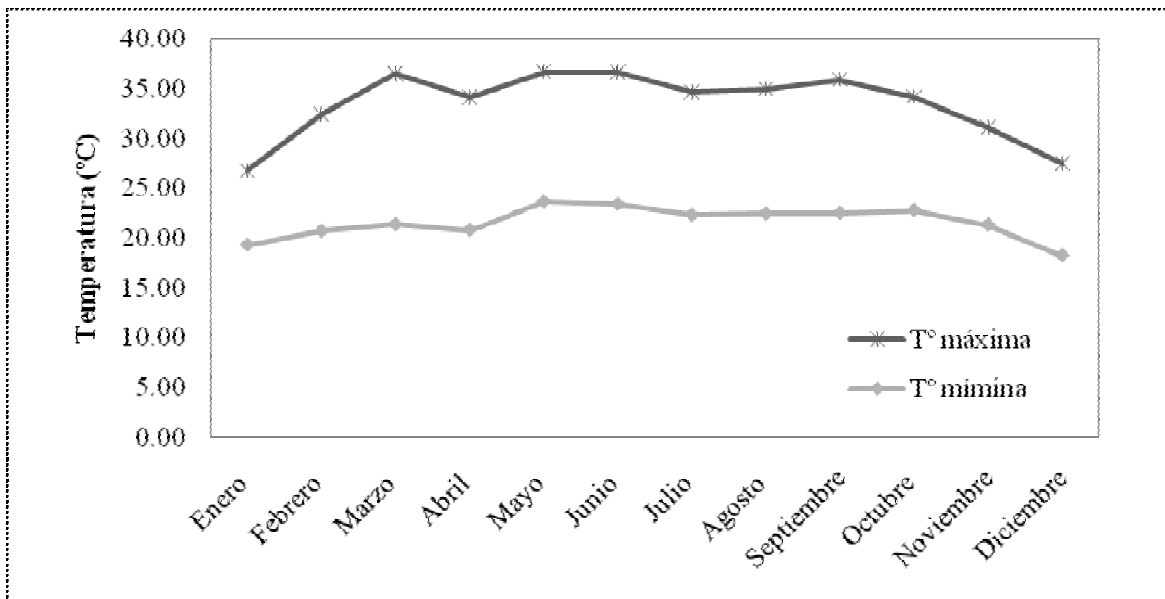


Figura 3. Comportamiento mensual de temperatura máxima y mínima. El Progreso, Honduras.

FUENTE: Azucarera del Norte S.A.

La temperatura máxima promedio anual es de 34.1°C, mientras que el promedio anual de la temperatura mínima es de 22.2°C. Por lo tanto la amplitud térmica ronda los 12°C.

Temperaturas por debajo de los 20°C detienen el crecimiento de la caña de azúcar, mientras que temperaturas superiores a los 35°C afectan drásticamente la evapotranspiración de la misma, por ende el rendimiento cañero disminuye.

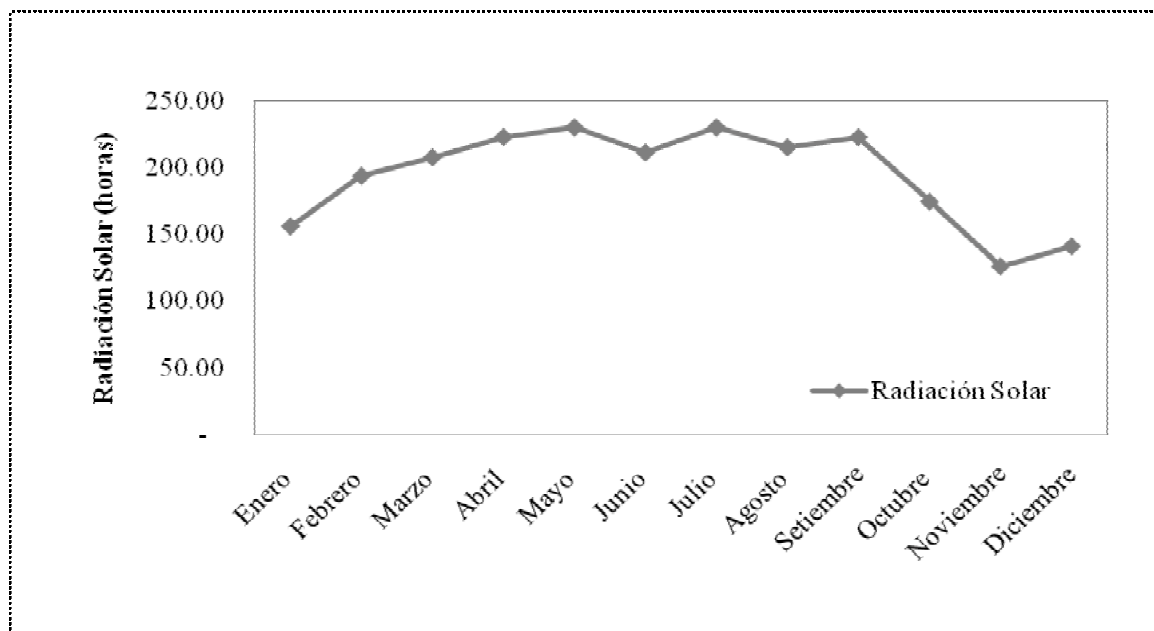


Figura 4. Distribución mensual de radiación solar. El Progreso, Honduras.

FUENTE: Azucarera del Norte S.A.

La radiación solar no presenta variación durante el año excepto en la época lluviosa en donde el promedio oscila entre 150 – 165 horas luz.

Implicaciones económicas y administrativas

Ahora que conocemos el comportamiento de cada uno de los factores climatológicos en el rendimiento, es necesario centrarse en el aspecto económico-productivo y el beneficio que presta un modelo para el diagnóstico de rendimientos.

De acuerdo a Everingham, et al. (2002), la industria azucarera está comprendida por una cadena de valor integrada por producción, cosecha, transporte, molienda y su mercado, tomando en cuenta el impacto climático alrededor de cada uno de estos sectores.

El sistema o modelo de diagnóstico de rendimientos dependerá de las estrategias, objetivos y decisiones que cada empresa en particular persigue. La integración de estos

modelos conjuntamente con estrategias de administración tiene un claro potencial para el beneficio de la industria azucarera en muchas áreas, en particular en:

1. Aumento de utilidades por un mejor uso de sus recursos, eficiencia, altos índices de rendimiento y pequeños impactos y consecuencias ambientales.
2. Desarrollo de planes y estrategias para la cosecha, transporte y extracción por medio de mejores programas de operación y uso de recursos.
3. Mejorar la competitividad de la empresa a través de la efectiva aplicación de los conocimientos y mejora en la eficiencia, como también mejor planeación entre el campo y la planta de procesamiento industrial.

Podemos considerar tres aspectos del impacto climático en el sistema de producción cañera. En primer lugar, el clima determina directamente el proceso de crecimiento y la cantidad de azúcar producida. Segundo, las condiciones climáticas influyen en el desarrollo de enfermedades y plagas en el cultivo que restringen su desarrollo. Tercero, el clima, en particular la lluvia, determina el exceso o escasez, como también el movimiento de nutrientes y pesticidas.

Según Cifuentes, H.M. (1997) si un modelo de diagnóstico de rendimiento es aplicado e integrado en la empresa, éste brindará la oportunidad de mejoras administrativas y productivas, desde siembra, producción en campo, aplicación de fertilizantes, herbicidas y pesticidas, lo cual ayuda a la sostenibilidad ecológica y económica.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio aplica el método de análisis estadístico de regresión múltiple que consiste en la relación de varias variables independientes, también conocidas como predictoras o explicativas, respecto a una variable dependiente conocida también como criterio, explicada o respuesta. Recibe el nombre de múltiple debido a las múltiples influencias que las variables independientes puedan tener sobre la variable dependiente. Gujarati, D. (2006).

A través de este análisis de variables climatológicas independientes, se pretende obtener un modelo de diagnóstico de estimación de rendimiento cañero, el mismo que se pueda implementar en la industria azucarera, mejorando así las funciones operativas y administrativas de la misma.

La información climatológica a analizar proviene del Servicio Meteorológico Nacional, así como también de la estación meteorológica del Ingenio Azucarera del Norte S.A.; ambos ubicados en el departamento de Yoro, Honduras. Esta información corresponde desde 1999 hasta el año 2007, se ha tomado como referencia este periodo ya que la información existente hasta 1998 se perdió a causa del huracán Mitch.

Las variables independientes a analizar son temperatura ambiente máxima, temperatura ambiente mínima, precipitación y radiación solar ya que estos figuran entre los principales agentes climatológicos que afectan y determinan la producción cañera, tal como lo describe Subiros, F. (1995).

Como factor dependiente tenemos datos estimados de rendimiento, expresados en toneladas de caña por hectárea, la cual es presentada anualmente y para fines estadísticos ha sido dividida en ocho meses, considerada desde el mes de febrero hasta septiembre, época que representa el mayor crecimiento del cultivo, en especial a los 180 días después de su siembra o cosecha. Cuadro 1.

Posterior a la cosecha, realizada a finales del mes de diciembre y luego de la aplicación de inhibidores de floración en el mes de agosto, el crecimiento no representa mayores cambios a nivel de rendimiento sino más bien a nivel de concentración de sacarosa. Al tercer y cuarto mes se observa la máxima expresión en crecimiento. Figura 5.

Cuadro 1: Distribución de estimados de rendimiento mensual, expresado en t/ha.

MES	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
FEBRERO	8.64	11.92	9.32	9.81	7.99	9.01	8.49	8.47	8.94
MARZO	12.42	17.12	13.39	14.09	11.48	12.95	12.20	12.17	12.84
ABRIL	14.31	19.74	15.44	16.24	13.23	14.93	14.06	14.03	14.80
MAYO	14.31	19.73	15.43	16.24	13.23	14.93	14.06	14.03	14.80
JUNIO	12.78	17.62	13.78	14.50	11.81	13.33	12.55	12.52	13.21
JULIO	12.01	16.56	12.95	13.63	11.10	12.53	11.80	11.77	12.42
AGOSTO	11.69	16.12	12.61	13.27	10.81	12.20	11.49	11.46	12.09
SEPTIEMBRE	11.76	16.21	12.68	13.34	10.87	12.26	11.55	11.52	12.16
TOTAL	97.91	135.03	105.60	111.11	90.50	102.14	96.20	95.97	101.27

FUENTE: Azucarera del Norte S.A.¹

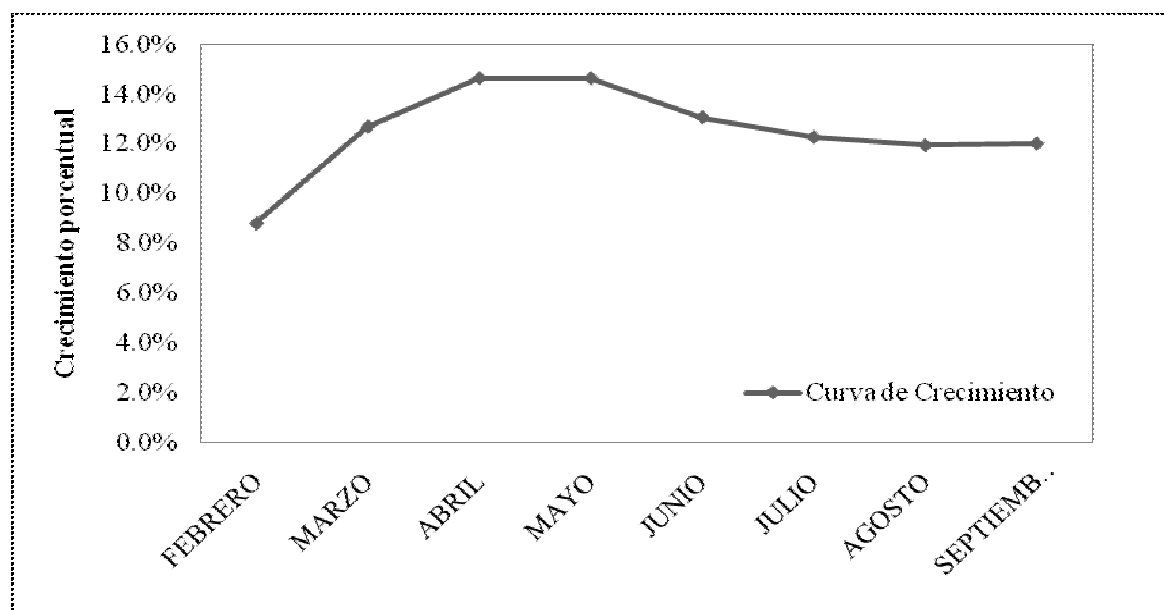


Figura 5. Curva de crecimiento porcentual de caña de azúcar para ocho meses.

FUENTE: Azucarera del Norte S.A.

¹ Los datos se han obtenido de un análisis estadístico previo, del crecimiento de ocho variedades de caña de azúcar en el Ingenio Azucarera del Norte S.A., éstos representan el promedio de rendimiento mensual.

Modelos utilizados

El estudio evalúa la variable dependiente en dos escenarios, siendo el primero la conversión de los datos de rendimiento a logaritmos naturales (Ln), con el propósito de generar un modelo a partir de estimados de producción vs. factores climáticos. El segundo escenario toma en cuenta el rendimiento mensual acumulado vs. factores climáticos, los rendimientos mensuales acumulados van desde el mes de febrero hasta septiembre.

Descripción del modelo estadístico

Los datos fueron evaluados por medio del software estadístico Minitab 14, el mismo que servirá para determinar el modelo de diagnóstico a partir de regresiones múltiples en un proceso que implica cuatro pasos:

1. Descripción de la ecuación de regresión múltiple

$$\hat{Y} = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + e$$

Donde:

\hat{Y} = Valor estimado de rendimiento, variable dependiente (t/ha).

a = Constante de la función que define el efecto de otros factores no presentes en la ecuación.

b_1, b_2, b_3 y b_4 = Constantes técnicas asociadas con x_1, x_2, x_3 y x_4 respectivamente

x_1 = Valores promedios de temperatura máxima (°C)

x_2 = Valores promedios de temperatura mínima (°C)

x_3 = Valores promedios de precipitación (mm)

x_4 = Valores promedios de radiación solar (horas)

e = Variación aleatoria. Su promedio es igual a cero

2. Evaluación del error estándar de regresión múltiple y estimación

El error estándar de estimación es una medida de dispersión que relaciona las variables con respecto al plano de regresión múltiple. El denominador de esta ecuación indica que en la regresión múltiple con k variables independientes, el error estándar tiene n-k-1 grados de libertad.

Para calcular S_e , observamos los errores individuales $(Y - \hat{Y})$ en el plano de regresión ajustado, lo elevamos al cuadrado, calculamos su media (dividiendo entre n-k-1) y tomamos la raíz cuadrada del resultado. Debido a su forma de calcularse también se le conoce como raíz del error cuadrático medio (mean square error).

$$S_e = \sqrt{\frac{(\sum Y - \bar{Y})^2}{n - k - 1}}$$

Donde:

Y = Valores muestrales de la variable dependiente

\hat{Y} = Valores correspondientes estimados con la ecuación de regresión.

n = Número de observaciones de la muestra.

k = Número de variables independientes.

3. Validación de la ecuación de regresión múltiple

Coefficiente de determinación múltiple

Este coeficiente es la fracción que representa la porción de la variación total de Y que explica el plano de regresión, en otras palabras, indica la proporción que la variación total de la variable dependiente se explica con las variables independientes. Medimos la fuerza de la relación entre las variables independientes con respecto al plano de regresión múltiple.

Este coeficiente es generalmente representado por r^2 . Es importante conocer esta magnitud y su fuerza de relación así como la significancia de la regresión.

Coefficiente de regresión estandarizado

Según Cole, et al. (1993). Los coeficientes estandarizados o coeficientes beta se calculan multiplicando el coeficiente por la desviación estándar de la variable de interés y dividiendo entre la desviación estándar de la variable dependiente. Los coeficientes estandarizados indican el peso relativo de cada variable, sin importar la unidad de medida en que se encuentren expresadas.

$$t = \frac{b_i - B_{io}}{S_{b_i}}$$

Donde:

b_i = Pendiente de la regresión ajustada

B_{io} = Pendiente real hipotética para la población

S_{b_i} = Error estándar del coeficiente de estimación

4. Significancia de las variables

De acuerdo a Levin, R., Rubin, D. et al. (2004). Para definir si una variable es o no significativa recurrimos al resultado del valor de p . Probar la significancia de una variable explicativa es, siempre, una prueba de dos colas.

Prueba F

Debido a que r^2 puede explicar el modelo por un simple hecho casual, es necesaria la aplicación de la prueba F, la misma que explica si el conjunto de variables explican significativamente la variabilidad observada de Y.

Al analizar dicha variación nos enfocamos en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{array}{ll} \text{SCT= Suma de cuadrados total} & : \sum(Y - \bar{Y})^2 \quad n-1 \text{ grados de libertad} \\ \text{SCR= Suma de cuadrados de la regresión} & : \sum(\hat{Y} - \bar{Y})^2 \quad k \text{ grados de libertad} \\ \text{SCE= Suma de cuadrados del error} & : \sum(Y - \hat{Y})^2 \quad n-k-1 \text{ grados de libertad} \end{array}$$

De donde: $SCT = SCR + SCE$

$$F = \frac{SCR/k}{SCE/(n - k - 1)}$$

Relación con estudios similares

De acuerdo con Greenland, D. (2005), en su estudio titulado Climate variability and sugarcane yield in Louisiana, analizó en un principio 74 factores climáticos, posteriormente se redujeron a 13 y al final se obtuvieron cuatro variables debido a su significancia estadística, éstas se denominaron Variables Climáticas Críticas (CCV), por sus siglas en inglés; entre estas variables figuran:

- Temperaturas máximas de agosto.
- Temperaturas mínimas de febrero.
- Agua disponible en el suelo entre abril y septiembre.
- La ocurrencia de huracanes en la temporada de otoño.

Además, variables similares fueron utilizadas por Clements, H. (1980), en su libro titulado Sugarcane crop logging and crop control, en donde desarrolló un total de tres ecuaciones de estimación, siendo la que mejores resultados mostró con un coeficiente de correlación de 0.862, aquella que consideró los siguientes factores:

- Radiación solar
- Humedad de la vaina
- Edad del cultivo
- Temperatura máxima (T° Max)
- Temperatura mínima (T° Min)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ESCENARIO N°1

Cuadro 2: Análisis de regresión múltiple considerando Y como Ln, coeficientes, error estándar de los coeficientes (S_e Coef), valores t y p.

Parámetro	Coef	S_e Coef	t	p
Constant (a)	0.7638	0.37670	2.03	0.047
T° Max	0.0123	0.01097	1.12	0.268
T° Min	0.0636	0.01339	4.75	0.000
Precipitación	-0.0011	0.00031	-3.61	0.001
Rad. Solar	0.0003	0.00067	0.44	0.660

$S_e = 0.155471$ $r^2 = 0.33$ $r^2(\text{adj}) = 0.30$

Considerando la influencia de datos climáticos el análisis del Cuadro 2 muestra un grado moderado de determinación ($r^2 = 0.33$), sin embargo no es lo suficientemente alto para propósitos de diagnóstico y/o predicción.

Las variables T° Min y Precipitación presentan alta significancia estadística; a partir de la tabla de distribución t, con 67 grados de libertad y un $\alpha = 1.99$ observamos que T°Min y Precipitación se encuentran en el área de aceptación, los valores p corroboran esta apreciación al ser éstos < 0.05 .

Ecuación N° 1:

$$\text{Ln}(Y) = 0.764 + 0.0122 (\text{T}^\circ \text{Max}) + 0.0636 (\text{T}^\circ \text{Min}) - 0.00112 (\text{Precipitación}) + 0.000299 (\text{Rad. Solar})$$

(1.12)
(4.75)
(-3.61)
(0.44)

Cuadro 3: ANDEVA. Escenario N°1.

Fuente	DF	SC	MC	F	P
Modelo	4	0.82901	0.20725	8.57	0.000
Residuo	67	1.61946	0.02417		
Total	71	2.44848			

Tanto las variables de T° Max, T°Min y Radiación Solar afectan positivamente el rendimiento de caña de azúcar, aunque éste último en menor proporción (0.0003). La Precipitación por su parte tiene un efecto negativo en el rendimiento cañero (-0.0011). Se presume que la precipitación tiene un efecto negativo en el rendimiento ya que la zona bajo análisis presenta mala distribución de lluvias a lo largo del ciclo productivo, además el tipo de suelo presenta las condiciones propicias de anegamiento, lo que afecta significativamente el normal crecimiento de la planta durante todo su ciclo vegetativo.

El Valor F y p muestran que la regresión como un todo es altamente significativa, obteniendo así un valor $p < 0.05$.

Resultados similares fueron obtenidos por Clements, H. (1980), obteniendo éste una correlación de 0.538 en su análisis, que consideró, además de las variables expuestas en este estudio, la humedad relativa y la velocidad del viento.

ESCENARIO N°2

Cuadro 4: Análisis de regresión múltiple considerando Y como rendimiento acumulados, coeficientes, error estándar los coeficientes (S_e Coef), valores t y p .

Parámetro	Coef	SE Coef	t	p
Constant (a)	-266.6600	57.91000	-4.6	0.000
T° Max	1.7680	1.68700	1.05	0.298
T° Min	11.7420	2.05900	5.7	0.000
Precipitación	0.0803	0.04747	1.69	0.095
Rad. Solar	-0.0200	0.10390	0.19	0.846

$S_e = 23.8999$ $r^2 = 0.49$ r^2 (adj) = 0.46

Ecuación N° 2:

$$Y = -267 + 1.77 (T^\circ \text{Max}) + 11.7 (T^\circ \text{Min}) + 0.0803 (\text{Precipitación}) - 0.020 (\text{Rad. Solar})$$

(1.05)
(5.7)
(1.69)
(0.19)

Cuadro 5: ANDEVA. Escenario N°2.

Fuente	DF	SC	MC	F	P
Modelo	4	36741.4	9185.4	16.08	0.000
Residuo	67	38270.6	571.2		
Total	71	75012			

Al considerar la variable dependiente como un factor acumulativo obtenemos un coeficiente de determinación mayor al del primer análisis ($r^2 = 0.49$), sin embargo no presenta las características de poder brindar un modelo de diagnóstico confiable ya que se esperaría que por lo menos presentase un coeficiente de determinación superior al 0.85.

En este caso, únicamente la temperatura mínima presenta significancia estadística $t > 1.99$.

El Valor F y p muestran que la regresión como un todo es altamente significativa, obteniendo así un valor de $F=16.08$ y $p < 0.05$.

Con los resultados logrados podemos determinar que ninguno de los dos casos tiene la significancia estadística para poder desarrollar un modelo de diagnóstico de producción, se deberán considerar otras variables representativas como es el caso de la humedad de la vaina y edad del cultivo considerados por Clements, H. (1980), lo que significó aumentar el coeficiente de determinación (r^2), de 0.538 a 0.862, posteriormente aplicó dicho modelo con resultados sobresalientes.

Análisis de Mallows

Cuadro 6: Análisis de Mallows (C-p). Escenario N°2.

Variables	r^2	r^2 (adj)	Mallows (C-p)	T° Max	T° Min	Prec.	Rad. Solar
1	45.50	44.80	3.50		x		
1	17.80	16.60	39.90			x	
2	48.10	46.60	2.10		x	x	
2	46.60	45.00	4.10	x	x		
3	49.00	46.70	3.00	x	x	x	
3	48.10	45.90	4.10		x	x	x
4	49.00	45.90	5.00	x	x	x	x

El análisis de Mallows (Cuadro 6), que consiste en la combinación óptima de los coeficientes de determinación de cada una de las variables, nos muestra el mejor ajuste que de acuerdo a este análisis, se puede obtener considerando la variable de T° Min y Precipitación, con un valor de $r^2 = 0.48$ y un valor $C-p = 2.10$. Mientras más cercano el valor de C-p a 1, el modelo tendrá un mejor ajuste de acuerdo a los valores p de las variables consideradas.

Para consideraciones del estudio se tomará en cuenta el modelo a partir del escenario N°2, ya que fue el que mayor coeficiente de determinación mostró ($r^2 = 0.49$).

Justificación de resultados y área bajo estudio

El área estudiada presenta una irregular distribución de lluvias, temperaturas elevadas mayores a 32°C predominan durante una buena época del año, la temperatura mínima con un valor promedio de 22°C es favorable para el normal desarrollo de la planta. La radiación solar por su parte tiene efectos directos en la transpiración de la planta debido también a una alta humedad relativa de la zona.

Con el análisis de un mayor número de variables se podrá llegar a desarrollar un modelo de diagnóstico de rendimiento de caña de azúcar de mayor confiabilidad, sin embargo Azucarera del Norte S.A. no cuenta con los datos suficientes que permitan la implementación de una herramienta para la mejor toma de decisiones administrativas referentes a movilización de maquinaria o labores culturales, por ejemplo.

A nivel centroamericano no todos los ingenios azucareros cuentan con estaciones meteorológicas de tecnología avanzada, lo que impide la obtención de información y el aprovechamiento de la misma. Hasta el presente año el Ingenio Azucarera del Norte S.A. ha implementado una estación meteorológica que permite recoger con mayor precisión y continuidad datos de precipitación, temperatura, dirección del viento, radiación solar, temperatura del suelo, entre otros, los mismos que estarán disponibles para estudios futuros.

5. CONCLUSIONES

- No se obtuvo el modelo de diagnóstico de rendimiento, debido a que los resultados obtenidos fueron espurios.
- Los modelos obtenidos por medio del análisis estadístico no presentan un coeficiente de determinación confiable para su establecimiento, es necesaria la implementación de otras variables como la humedad de la vaina y edad del cultivo para análisis posteriores.
- Tanto las variables de T° Max, T°Min y Precipitación afectan positivamente el rendimiento de caña de azúcar, mientras que la Radiación Solar por su parte tiene un efecto negativo en el rendimiento cañero.
- La variable Precipitación presenta un efecto reducido en el rendimiento debido a que, al ser ésta una zona de altas precipitaciones mal distribuidas y las condiciones arcillosas del terreno, favorecen a un mal desarrollo de raíces.
- El mejor modelo, para aplicaciones y estudios posteriores, es aquel que considera como variables la T°Min y Precipitación, descartando por lo tanto la T°Max y Radiación Solar.

6. RECOMENDACIONES

- Implementar un estudio posterior con un número mayor de observaciones y/o variables de tal manera que se pueda validar estadísticamente los factores considerados en el modelo. Entre las variables que se pueden considerar posteriormente están la humedad de la vaina y edad de cultivo.
- La industria azucarera hondureña desarrolle e implemente mejores tecnologías de toma de datos climatológicos que permitan el desarrollo y utilización de modelos de diagnóstico de rendimiento.
- Si se considera desarrollar un estudio posterior del tema es necesaria la inclusión de todas las variables climáticas consideradas en el presente estudio, inclusive aquellas que no mostraron significancia estadística a través del análisis de Mallows.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Cifuentes, H.M., 1997. El Niño and its catastrophic consequences in the sugar industry of Ecuador, South America. *Sugar Journal* (December) 16–20.
- Clements, H. 1980. Sugarcane crop logging and crop control. Pitman Publishing. Hawaii. P.157-190
- Cole, D. A. *et al.* (1993). Multivariate group comparisons of variable systems: MANOVA and structural equation modeling. *Psychological Bulletin*, 114, 174-184.
- Everingham, Y.L. 2002. Enhanced risk management and decision-making capability across the sugarcane industry value chain based on seasonal climate forecasts. *Agricultural Systems* 74 (2002): 459-477.
- Fauconnier, R; Bassereau, D. 1975. La caña de azúcar. Técnicas agrícolas y producciones tropicales. Editorial Blume. Barcelona, España. 405 p.
- Gujarati, D. 2006. Principios de Econometría. The McGraw-Hill Companies, Inc. Tercera Edición. Madrid, España. 457p.
- Greenland, D. 2005. Climate variability sugarcane yield in Louisiana. *American Meteorological Society*. LSU, Agricultural Center. Baton Rouge 44: 1655-1666.
- Jones, J.W. *et al.* 2000. Potencial benefits of climate forecasting to agriculture. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 82 (2000): 169-184
- La Guía 2000. 2007. Honduras: Clima y Vegetación. Consultado en línea el 8 de septiembre del 2008. Disponible en: <http://geografia.laguia2000.com>
- Levin, R. *et al.* 2004. Estadística para administración y economía. Pearson educación. Séptima Edición. México. 928 p.

- Lisson, S.N. *et al.* 2000. Modelling sugarcane production systems. II: Analysis of system performance and methodology issues. *Field crop research* 68 (2000): 31-48
- Martínez, A. 1972. Diseños y análisis de experimentos con caña de azúcar. Editorial SAG. Chapingo, México. 204 p.
- Organización para la Alimentación y Agricultura (FAO), 2005. Principales productores de alimentos y productos agrícolas. Consultado en línea el 16 de mayo del 2008. Disponible en : <http://www.fao.org/>
- Subiros, F. 1995. El cultivo de Caña de Azúcar. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. 441 p.
- Valdés, M. 2004. Determinación del periodo de crecimiento en el cultivo de la caña de azúcar (*Sacharum officinarum*) en el CAI Jose Martí. 2 (6): 1562-3297.