

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS  
ESCUELA DE ECONOMÍA AGRÍCOLA Y AGRONEGOCIOS

PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
LICENCIATURA EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

**Evaluación del impacto del cambio climático en la producción de caña  
de azúcar: el caso del Ingenio Atirro en Turrialba, Costa Rica**

JOSÉ ROBERTO LUTZ PORRAS  
CARNÉ: A53168

**San José, Costa Rica  
Enero, 2017**

## HOJA DE APROBACIÓN

---

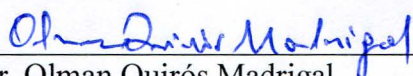
Este trabajo final de graduación fue aceptado por el comité asesor de la Escuela de Economía Agrícola y Agronegocios de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar al grado académico de Licenciado en Economía Agrícola con énfasis en Agroambiente.



---

M.G.A. Enrique Montenegro Hidalgo)

Director de la Escuela



---

Dr. Olman Quirós Madrigal

Director de trabajo final de graduación



---

M.Sc. Javier Paniagua Molina

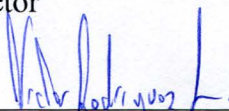
Lector



---

M.Sc. Marco Chaves Solera

Lector



---

M.Sc. Víctor Rodríguez Lizano

Lector



---

José Roberto Lutz Porras

Sustentante

## DEDICATORIA

---

*Este proyecto está dedicado a todas las personas que de alguna manera me apoyaron y confiaron en que saldría adelante.*

*También a quienes dudaron e hicieron más difícil este camino, ya que eso me fortaleció y me permite nuevamente demostrarles que con trabajo y esfuerzo todo es posible.*

## AGRADECIMIENTOS

---

*A las personas que formaron parte del comité evaluador por su disponibilidad, sus recomendaciones y aportes al proyecto.*

*Al personal de Agroatirro R.L., por su colaboración en aspectos técnicos y proporcionar información clave para la descripción y elaboración del proyecto.*

*Y, por último, a cada una de las personas, ya fueran familiares o amigos, que de alguna manera contribuyeron con mi proyecto y me incentivaron a culminarlo.*

# ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
3. JUSTIFICACIÓN .....	7
4. OBJETIVOS .....	10
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	10
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
5. MARCO DE REFERENCIA.....	11
5.1. MARCO DE ANTECEDENTES .....	11
5.2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....	23
5.2.1. FENÓMENO DEL CAMBIO CLIMÁTICO .....	23
5.2.2. CONTRIBUCIÓN DEL SECTOR AGROPECUARIO COMO EMISOR DE GASES DE EFECTO INVERNADERO .....	29
5.2.3. PRINCIPALES AFECCIONES AL SECTOR AGROPRODUCTIVO.....	38
5.2.3. CAÑA DE AZÚCAR .....	46
5.2.4. ECONOMETRÍA .....	47
5.3. MARCO GEOGRÁFICO .....	50
5.3.1. GENERALIDADES DE LA PROVINCIA DE CARTAGO .....	50
5.3.2. GENERALIDADES DEL CANTÓN DE TURRIALBA .....	51
6. DISEÑO METODOLÓGICO.....	53
7. RESULTADOS .....	57
7.1. ANÁLISIS DE LAS ESTRATEGIAS DEL SECTOR AGROPECUARIO ANTE EL FENÓMENO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN COSTA RICA .....	57

7.1.2. GESTIÓN EN EL SECTOR AGROPECUARIO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN COSTA RICA .....	57
7.1.2.1. ACCIONES PARA ABORDAR LA MITIGACIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO .....	60
7.1.2.2. ACCIONES PARA ABORDAR LA ADAPTACIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO .....	67
7.2. CONDICIONES GENERALES DEL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR....	76
7.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO.....	79
7.2.1.1. TAXONOMÍA DEL CULTIVO .....	79
7.2.1.2. MORFOLOGÍA DE LA PLANTA .....	81
7.2.1.3. FLORACIÓN EN LA CAÑA DE AZÚCAR.....	82
7.2.1.4. CICLO VEGETATIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR .....	83
7.2.1.5. REQUERIMIENTOS FISIOEDÁFICOS.....	85
7.2.2. REQUERIMIENTOS CLIMÁTICOS .....	92
7.2.2.1. RADIACIÓN SOLAR .....	92
7.2.2.2. TEMPERATURA.....	93
7.2.2.3. PRECIPITACIÓN .....	94
7.2.2.4. HUMEDAD .....	95
7.3. MODELO ECONOMETRICO PROPUESTO.....	97
7.3.1 MODELOS DE SIMULACIÓN PARA ANALIZAR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR.....	97
7.3.1.1 EFECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMATOLÓGICA SOBRE EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR.....	102
7.3.2. VARIABLES INCLUIDAS EN EL MODELO .....	103

7.3.2.1. TEMPERATURA .....	104
7.3.2.2. PRECIPITACIÓN .....	107
7.3.2.3. RADIACIÓN SOLAR .....	109
7.3.2.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN .....	112
7.3.2.5. PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR .....	114
7.3.3. MODELO ECONÓMICO PROPUESTO.....	121
7.3.3.1. DEFINICIÓN DEL MODELO PROPUESTO.....	125
7.3.3.2. PRUEBAS AL MODELO PROPUESTO .....	137
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	143
8.1. CONCLUSIONES .....	143
8.2. RECOMENDACIONES.....	145
BIBLIOGRAFÍA .....	149
APÉNDICES .....	168

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 5. 1 Características de los principales gases de efecto invernadero (GEI). .....	25
Cuadro 5. 2 Costa Rica: Porcentaje de emisiones del sector agropecuario por año, según tipo de gas de efecto invernadero, 2000 y 2005.....	32
Cuadro 5. 3 Costa Rica: Emisiones del sector energía para la actividad agropecuaria según gas de efecto invernadero, 2000 y 2005.....	35
Cuadro 5. 4 América Central: Pérdidas del sector agropecuario por evento climático extremo, según país.....	42
Cuadro 5. 5 América Latina y el Caribe: Afecciones del cambio climático por actividad agropecuaria, según país.....	43
Cuadro 7. 1 Marco institucional de Costa Rica por institución, nombre de la política y medida de mitigación y adaptación, según año .....	76
Cuadro 7. 2 Clasificación taxonómica de la caña azúcar .....	79
Cuadro 7. 3 Descripción del género Saccharum por origen y características, según especie .....	80
Cuadro 7. 4 Descripción del cultivo de caña de azúcar por etapa de desarrollo, según duración del ciclo.....	85
Cuadro 7. 5 Clasificación de los suelos por índices fisioedáficos, según sus características .....	88
Cuadro 7. 6 Costa Rica: Descripción de los suelos cultivados con caña de azúcar por características principales, según tipo de suelo .....	89
Cuadro 7. 7 Costa Rica: Clasificación de los suelos cultivados con caña de azúcar por tipo de suelo según región.....	91
Cuadro 7. 8 Descripción del cultivo de la caña de azúcar, por periodo del ciclo vegetativo, según requerimientos climáticos.....	96



Cuadro 7. 9 Descripción de los modelos utilizados para estimar el impacto del cambio climático en la agricultura, por características y sus limitantes, según tipo de modelo .....	100
Cuadro 7. 10 Características del modelo 1 de regresión.....	126
Cuadro 7. 11 Descripción del modelo 1 de regresión.....	126
Cuadro 7. 12 Características del modelo 2 de regresión.....	127
Cuadro 7. 13 Descripción del modelo 2 de regresión.....	127
Cuadro 7. 14 Características del modelo 3 de regresión.....	128
Cuadro 7. 15 Descripción del modelo 3 de regresión.....	128
Cuadro 7. 16 Características del modelo 4 de regresión.....	129
Cuadro 7. 17 Descripción del modelo 4 de regresión.....	129
Cuadro 7. 18 Características del modelo 5 de regresión.....	130
Cuadro 7. 19 Descripción del modelo 5 de regresión.....	130
Cuadro 7. 20 Características del modelo 6 de regresión.....	131
Cuadro 7. 21 Descripción del modelo 6 de regresión.....	131
Cuadro 7. 22 Tratamiento de los datos e indicadores .....	132
Cuadro 7. 23 Características del modelo de regresión propuesto .....	133
Cuadro 7. 24 Descripción del modelo de regresión propuesto .....	134
Cuadro 7. 25 Matriz de correlación para las variables regresoras del modelo propuesto ..	140

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5. 1 Concentración mundial de gases de efecto invernadero en la atmósfera según tipo de gas, 0-2005 .....	26
Figura 7. 1 Etapas fenológicas del cultivo de la caña de azúcar.....	83
Figura 7. 2 Histograma de la distribución normal de los residuos del modelo propuesto.....	138
Figura 7. 3 Gráfico de probabilidad normal del modelo propuesto.....	138

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 5. 1 Emisiones globales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por sector económico, 2010. ....	29
Gráfico 5. 2 América Latina: Distribución porcentual de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por sector económico, 2001-2010. ....	30
Gráfico 5. 3 Costa Rica: Distribución porcentual de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por sector económico, 2005. ....	31
Gráfico 5. 4 Costa Rica: Distribución porcentual de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el sector agropecuario,1961-2012. ....	33
Gráfico 7. 1 Turrialba: Temperatura mínima, promedio y anual según año, 1958-2014. ...	106
Gráfico 7. 2 Turrialba: Precipitación total según año, 1958-2014.....	109
Gráfico 7. 3 Turrialba: Radiación solar promedio según año, 1968-2014. ....	111
Gráfico 7. 4 Turrialba: Producción de caña de azúcar del ingenio Atirro según año zafra, 1981-1985 a 2015-2016. ....	116
Gráfico 7. 5 Turrialba: Producción de caña de azúcar de la zona según año zafra, para el periodo 1981-1982 a 2015-2016.....	117
Gráfico 7. 6 Rendimiento de azúcar real y calculado de la zona del ingenio Atirro según año zafra, para el periodo 1981-1982 a 2015-2016.....	136

## **RESUMEN**

Lutz, Roberto (2017). Evaluación del impacto del cambio climático en la producción de caña de azúcar: el caso del Ingenio Atirro en Turrialba, Costa Rica. Trabajo Final de Graduación para optar por el Grado Académico de Licenciatura en Economía Agrícola y Agronegocios con énfasis en Agroambiente, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Director: Dr. Olman Quirós Madrigal

Palabras clave: Cambio climático, caña de azúcar, modelos econométricos, mitigación, adaptación, políticas, modelo de Nerlove, Ingenio Agroatirro

Uno de los mayores retos que se está presentando a nivel mundial es sopesar el crecimiento poblacional y económico con las presiones que estas realizan al ambiente y como, a su vez, de manera bidireccional el medio reacciona a la sobre explotación de sus recursos. Debido a esta problemática, surge la necesidad de evaluar los efectos del cambio climático antropogénico en las actividades humanas, que afectan sectores como la salud, la producción agrícola, entre muchos otros; los cuales actualmente se presentan como una realidad marcada.

Las políticas realizadas por el país responden, en gran medida, a la necesidad de mitigar los gases de efecto invernadero producidos por las actividades económicas y, a la vez, adaptarse a la variabilidad producida por el cambio climático, donde el éxito de estas está en la adecuada transferencia a las personas y empresas encargadas de la producción agrícola, de la mano con el financiamiento y capacitación adecuada para su puesta en práctica.

Es por lo cual que se evaluó el efecto del cambio climático en el cultivo de la caña de azúcar, el cual se destaca por ser sensible a diversos factores climáticos como las temperaturas máximas y mínimas, variaciones en los patrones de precipitación, humedad y radiación solar; así como el paquete tecnológico utilizado, la inversión en tecnología agrícola, los costos de

producción y el mercado, los cuales determinan primeramente la cantidad de área sembrada y posteriormente, el rendimiento agroindustrial de la industria azucarera.

Debido a lo anterior, se procedió a realizar el análisis econométrico con los rendimientos industriales del cultivo de la caña de azúcar, para el ingenio Atirro, ubicado en la zona cañera de Turrialba, mediante series de tiempo y sustentado en el modelo de ajustes parciales propuesto por Nerlove.

Dicho modelo, con las variables regresoras logaritmo natural del rendimiento industrial de la zafra anterior, precipitación lineal y cuadrática, describe el rendimiento de azúcar de la zafra actual en 41,44%, donde todos los estadísticos t son significativos y posee una probabilidad  $\alpha = 10\%$ . Dichos resultados podrían mejorar al incluir otras variables como el precio del azúcar y aumentar la serie de datos, lo cual le proporcionaría mayor robustez al análisis propuesto.

Adicionalmente, este modelo mide la elasticidad de la variable explicada en términos de las variables regresoras; para este caso, determina el rendimiento de azúcar, según las variaciones porcentuales de la precipitación y el rendimiento industrial de la zafra anterior.

Cabe destacar que, el valor real del modelo propuesto, es el establecimiento de la metodología de análisis, el cual adquiere mayor relevancia al ser validado en otras regiones cañeras e inclusive en otras actividades agrícolas, teniendo en cuenta las características fisioedáficas de cada cultivo y las zonas agroecológicas donde se encuentren. Dicho modelo debe contemplar otras variables que logren explicar el proceso de producción y agroindustria del azúcar, el cual es multifactorial y se realiza en regiones y condiciones heterogéneas.

# 1. INTRODUCCIÓN

---

En el mundo se están presentando diversos panoramas que impactan fuertemente las economías, como lo son las crisis financieras, la inseguridad alimentaria y la distribución de alimentos; además de una incertidumbre climática.

El sector agrícola nacional históricamente ha tenido que superar grandes retos, como lo han sido la volatilidad en los precios internacionales, la continua fluctuación en los precios del petróleo, las barreras al comercio (arancelarias y no arancelarias), cambios en los usos de la tierra y los programas de ajuste estructural; los cuales estimulan o desestimulan ciertos sectores dentro de este.

En el sector agropecuario, las variaciones en la temperatura de la Tierra, inducidas por el cambio climático, pueden reducir los rendimientos de los cultivos, provocar la proliferación de malezas, plagas y enfermedades, afectar los ciclos de polinización y alterar las precipitaciones; todo lo cual constituye una amenaza para la seguridad alimentaria mundial.

Se estima que los principales efectos directos derivados de las variaciones en la temperatura y precipitación, principalmente, serían la duración de los ciclos de cultivo, alteraciones fisiológicas por exposición a temperaturas fuera del umbral permitido, deficiencias hídricas y respuesta a nuevas concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico (Watson 1997, citado por Villalobos y Retana 1999).

Además de la temperatura y la precipitación, el otro elemento de cambio importante a evaluar es el contenido de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Experimentos con presencia de altos contenidos de CO<sub>2</sub> indican que el comportamiento estomático producido, podría generar una economía del agua consumida por las plantas, así como un efecto fertilizante en el caso de las leguminosas (FAO, citado por Villalobos y Retana 1999). Además, un incremento en la concentración del CO<sub>2</sub>, aumentaría directamente la tasa de fotosíntesis y la producción de

biomasa de las plantas C<sub>3</sub>, con cambios poco significativos en las plantas C<sub>4</sub>, como el maíz, sorgo y caña de azúcar (Salinger, citado por Villalobos y Retana 1999).

Por otra parte, cabe resaltar que el sector agroalimentario, no solo es receptor de los impactos del cambio climático; sino que se sitúa como uno de los mayores contaminantes con gases de efecto invernadero alrededor de toda la cadena productiva. Según Altomonte (citado por CEPAL 2010a), en comparación con otras regiones, América Latina y el Caribe no es un gran emisor de gases de efecto invernadero (GEI), particularmente el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En el 2004 las emisiones de este contaminante superaron en un 75% las registradas en 1980; lo cual representa una tasa de crecimiento sostenido del orden del 2,4% anual.

Esta situación es ambientalmente insostenible, no obstante, los modelos económicos y las presiones del mercado marcan una tendencia hacia el uso exacerbado de los recursos naturales, priorizando la producción antes que el desarrollo sostenible.

Sin embargo, el sector agropecuario también presenta diversas oportunidades para la mitigación y una gran versatilidad para la adaptación a los efectos directos e indirectos del cambio climático. Es, por lo tanto, una necesidad y responsabilidad el direccionar la producción hacia un modelo que permita la sostenibilidad, sin sacrificar la productividad, promoviendo un sector dinámico e innovador, que procure la equidad entre la población y se encuentre, a su vez, comprometido con el medio ambiente.

Asimismo, se han realizado esfuerzos en el país para generar estudios sobre las variaciones en el clima y sus efectos en las principales actividades productivas, de modo que puedan aplicarse las medidas necesarias para garantizar las condiciones adecuadas para la producción agrícola y pecuaria. En el caso de la caña de azúcar, debido a sus características edáficas y fisiológicas, se presentan oportunidades de mitigación y adaptativas ante el cambio climático, por lo cual resulta necesario analizar los factores climatológicos que influyen en su producción.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

---

Las sociedades a nivel mundial presentan diversas oportunidades y amenazas, demarcadas por un mundo globalizado en donde el comercio y el crecimiento económico han venido marcando la pauta sobre los modelos de desarrollo que prevalecen hoy en día. Uno de esos nuevos retos es sopesar el crecimiento poblacional y económico con las presiones que estos realizan al ambiente y como, a su vez, de manera bidireccional, el medio reacciona a la sobreexplotación de sus recursos. Debido a esta problemática, surge la necesidad de evaluar los efectos del cambio climático antropogénico en las actividades humanas, que afectan sectores como la salud y la producción agrícola, entre muchos otros; los cuales actualmente se presentan como una realidad marcada.

El cambio climático se expresa, fundamentalmente, en el aumento de la temperatura media, la modificación de los patrones de precipitación, el alza del nivel del mar, la reducción de la superficie cubierta por nieves y glaciares, y la modificación de los patrones de los eventos extremos (IPCC 2007). Como declara Cifuentes (2010), Mesoamérica aparece como la zona más vulnerable ante el cambio climático en la región tropical, debido a la magnitud de los cambios y la limitada capacidad de respuesta; por lo cual, se hace necesario la proliferación de esfuerzos conjuntos que permitan identificar los impactos que se pudieran generar, y a su vez cuantificarlos para establecer medidas adaptativas antes sus posibles efectos.

En el caso particular de Costa Rica, se están gestando procesos de análisis sobre los impactos directos en diversas actividades agropecuarias, enfocados mayormente en las sinergias que puedan generarse entre el sector público y el privado. Lo anterior se ha realizado fundamentalmente por iniciativa de las empresas del sector agroalimentario, las cuales han contado con el apoyo técnico de los profesionales encargados de identificar y estimar dichos impactos y las posibles oportunidades o inconvenientes que podrían



presentarse en las actividades productivas; así como los efectos que estos puedan tener en la economía del país.

Por otra parte, haciendo énfasis en las diferencias entre los sectores productivos del país, se visualiza la ausencia de metodologías que acuerpen la toma de decisiones, con la finalidad de minimizar los efectos causados por la vulnerabilidad al cambio climático. Debido a lo anterior, se demarca la necesidad de generar estrategias que permitan determinar métodos para cuantificar las posibles pérdidas económicas, por motivo de la variación en la producción; y, con ello, proveer acciones que permitan la correcta adaptabilidad de los sectores de la economía.

En el caso del sector agropecuario, es palpable la carencia de un instrumento que se utilice en áreas y cultivos específicos, tomando en cuenta las diferentes necesidades y características de cada actividad agroproductiva.

La caña de azúcar (*Saccharum spp L.*) es uno de los cultivos más antiguos del mundo y de importancia agroindustrial en las zonas tropicales y subtropicales (Hernández 2012); sin embargo, también es una planta sensible a los efectos del clima.

La producción de este cultivo en América Central, en el año 2014 fue de 616 706 hectáreas, teniendo un rendimiento promedio de 78,93 t/ha de caña; donde Costa Rica lidera este rubro (FAOSTAT 2014, Chaves y Bermúdez 2015).

En el país se cultiva en un piso altitudinal que va desde el nivel del mar hasta aproximadamente 1550 msnm (Chaves 2005), siendo la región de Guanacaste la que más área sembrada posee, con un 55,59%, seguida de la Norte con el 13,81% y el Pacífico Central, con un 9,20%. Por lo cual, es posible afirmar que la zona que se encuentra en el piso altitudinal entre los 0 y los 400 msnm, correspondiente al Pacífico Norte o Seco (Guanacaste y Puntarenas), representa el 64,79% de la totalidad de área sembrada en el país, lo cual equivale 41 898 Ha. El Valle Central contiene el 6,80% del área sembrada, mientras que en

Turrialba y la Región Sur, se encuentra el 7,58% y el 7,02%, respectivamente (Chaves, Bermúdez y Méndez, 2015).

Además de la gran extensión del cultivo y las diversas zonas en las que se encuentra, cabe resaltar el papel de la agroindustria de la caña, la cual constituye una de las principales actividades económicas y productivas en el país. Esta ha representado un rubro fundamental de exportación que permitió ampliar y diversificar la canasta de bienes agropecuarios exportables en los últimos 30 años y es uno de los productos agropecuarios de consumo nacional de más importancia, pues genera trabajo, recursos financieros al país y ha eliminado la importación del azúcar (Chávez, citado por Acuña 2004).

Según la regionalización agropecuaria del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), la región Central Oriental está representada por la provincia de Cartago y se constituye como una de las de mayor importancia histórica en el país en cuanto al cultivo de la caña de azúcar.

Los principales cantones productores de la provincia son Turrialba, Jiménez (Juan Viñas), Paraíso y Cartago (Chaves *et al.* 2008). Según el estudio realizado por Chaves y Chavarría (2013), el cantón de Turrialba posee la mayor área sembrada de la región, con un total de 2.360,72 Ha; este, junto con el cantón de Jiménez, representa un 95,64% de la totalidad de área sembrada. No obstante, según datos del VI Censo Nacional Agropecuario (INEC, 2014), el cantón de Turrialba posee 391 fincas, las cuales representan 2.467,64 Ha de área sembrada y 2.405,29 Ha de área en edad de producción.

La caña de azúcar producida en el cantón de Turrialba, es procesada en los ingenios Agroatirro y Juan Viñas (Chaves *et al.* 2008). Para las cuatro zafras comprendidas entre los años 2010 y 2014, Atirro se ha ubicado entre los cinco ingenios con mayor rendimiento industrial de azúcar<sup>1</sup> y en la décima posición según la caña procesada, de los trece existentes en el país. No obstante, para la zafra del 2014-2015, se posicionó como el octavo de acuerdo

---

<sup>1</sup> Obtenido a 96° de polarización, es decir, azúcar que contiene el noventa y seis por ciento (96%) de su peso en sacarosa (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica 1998).

al rendimiento industrial, presentando la mayor variación absoluta; es decir, la mayor reducción neta de concentración de sacarosa, la cual corresponde a  $-14,60 \text{ kg/TMC}$ , equivalente a un  $-12,37\%$  con respecto a lo obtenido en la zafra 2013-2014. Por otra parte, en cuanto a la cantidad de caña procesada, para la zafra del 2014-2015, se ubicó en la undécima posición, lo cual representa una disminución de  $10.003,00 \text{ TM}$ , es decir, una variación de  $-13,57\%$  con respecto a lo obtenido en la zafra 2013-2014.

Cabe resaltar que, la variación obtenida con respecto al rendimiento industrial de la caña de azúcar, se ve influenciado por diversos factores que inciden sobre la concentración de sacarosa en los tallos, como los son la variedad sembrada, el paquete tecnológico del cultivo, la cantidad y distribución de la precipitación, la temperatura máxima y mínima, la duración e intensidad de la luz, la velocidad del viento, el porcentaje de humedad relativa y el contenido de humedad y fertilidad del suelo; lo cual afecta directamente la rentabilidad final del producto.

Es por lo cual que resulta relevante analizar la relación entre las variables climatológicas y la producción del cultivo de la caña de azúcar, pues como aduce Chaves y otros investigadores (2008), los problemas de baja producción de azúcar en la región centroamericana, México, Panamá y algunos países del Caribe, han sido atribuidos, en años anteriores, a factores de carácter climático como lluvias intensas y persistentes que provocaron inclusive inundaciones, alta humedad, deficiencias de luminosidad en las plantaciones, fuertes vientos y la presencia de plagas de roedores.

Debido a lo anteriormente expuesto, se evidenció la necesidad de desarrollar e implementar una herramienta metodológica que pueda ser utilizada para analizar la incidencia que presenta el cambio climático en la producción agropecuaria en Costa Rica, considerando sus efectos en el cultivo de la caña de azúcar, dada su importancia para el sector productivo del país.

### 3. JUSTIFICACIÓN

---

El análisis económico del cambio climático en América Latina resulta fundamental, no solo para identificar la magnitud de los efectos climáticos y las mejores formas de adaptación a las nuevas condiciones climáticas; sino también para formular una estrategia de desarrollo sostenible a largo plazo, con bajas emisiones de carbono y con inclusión social (CEPAL 2010a).

En términos fiscales, constituye un pasivo público contingente que afectará las finanzas públicas de los gobiernos por varias generaciones. Se estima que para el año 2030 Centroamérica aún producirá menos de 0,5% de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) del planeta, pero al mismo tiempo será una de las regiones más vulnerables ante los embates del cambio climático (CEPAL 2010b). Por lo anterior, se hace relevante el análisis situacional de Costa Rica, el cual considere las políticas y esfuerzos públicos, con las sinergias con el sector privado que permitan generar soporte legal, técnico y político para enfrentar y generar medidas de mitigación y adaptativas frente a los efectos adversos del cambio climático.

La caña de azúcar es una planta sensible a los efectos del clima, por lo cual se torna indispensable estudiar los efectos del cambio climático sobre su producción; y con esto generar un estudio que permita a las instituciones respectivas la creación de políticas y toma de decisiones para fomentar las medidas adaptativas ante el cambio climático, por medio de la identificación y cuantificación de los impactos a la producción.

Debido a la importancia económica de la actividad agrícola, específicamente del sector productivo e industrial de la caña de azúcar, además de contar con una base de datos climáticos y de productividad del cultivo, requeridos para establecer el análisis, se delimitó el estudio en la zona de Turrialba en Cartago.

Para argumentar la elección de dicha investigación, cabe recalcar el vacío sobre estudios del tema a nivel nacional, del cual no se encuentran trabajos recientes, ni que sean específicamente de dicho contenido, aunque se está iniciando un proceso de creación y fortalecimiento de sinergias, además de un gran interés por esta temática.

Se estima que los principales efectos directos derivados de las variaciones en la temperatura y precipitación, principalmente, serían la duración de los ciclos de cultivo, alteraciones fisiológicas por exposición a temperaturas fuera del umbral permitido, deficiencias hídricas y respuesta a nuevas concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico (Watson, citado por Villalobos y Retana 1999). Además, como aduce Montenegro, a condiciones de mayor temperatura, también incrementa la energía consumida por la planta y en consecuencia se reduce la producción (Montenegro 2010). Algunos efectos indirectos de los cambios esperados se producirían en las poblaciones de parásitos, plagas y enfermedades, disponibilidad de nutrientes en el suelo y planificación agrícola (Porter y Watson, citados por Villalobos y Retana 1999).

El análisis de los modelos climáticos, conjuntamente con las limitaciones de las observaciones, permite ofrecer, por primera vez, un margen de probabilidad evaluado de la sensibilidad del clima y aumenta la confianza en el conocimiento de la respuesta del sistema climático al forzamiento radiactivo (IPCC 2007); además de facilitar la obtención de estimaciones más exactas sobre los efectos de la variabilidad climática en la producción agrícola.

Debido a lo anterior resalta la importancia de este estudio, en el cual se utilizaron variables cuantitativas, representadas por historiales climáticos y productivos del Ingenio Atirro, tomadas de fuentes confiables como son la estación meteorológica del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), lo cual permitió tener certeza de la calidad de los datos.

A partir del modelo econométrico propuesto, se podrá establecer una metodología que sirva como base para fomentar nuevos estudios en diferentes zonas y cultivos, con lo cual se puedan generar políticas a nivel sectorial que permitan forjar estrategias de mitigación y adaptación para minimizar los impactos negativos y aprovechar las oportunidades, además de las ventajas comparativas y competitivas que posee el sector agroalimentario costarricense en vías de un desarrollo sustentable.

## **4. OBJETIVOS**

---

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el impacto del cambio climático en la producción de la caña de azúcar en Turrialba, Cartago.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Efectuar un análisis de las estrategias y políticas vigentes sobre cambio climático en Costa Rica.
2. Describir el cultivo de la caña de azúcar y los principales componentes climáticos y fisioedáficos que influyen en su crecimiento y desarrollo.
3. Evaluar el impacto del cambio climático sobre la producción del cultivo de caña de azúcar en la zona de Turrialba, mediante el diseño de un modelo econométrico, con base en datos del Ingenio Atirro.

## 5. MARCO DE REFERENCIA

---

### 5.1 MARCO DE ANTECEDENTES

Según diversos autores, (Adams *et al.*, Rosenzweig y Parry; citados por Aggarwal y Mall 2002) se han llevado a cabo diferentes estudios con la finalidad de desarrollar una evaluación integrada del impacto del cambio climático, sobre la oferta y demanda alimentaria, tanto regional como global.

Debido a lo anterior, así como a la existencia de estudios en otros cultivos que evidencian que el cambio climático podría tener un efecto significativo sobre el rendimiento de estos, se procedió a utilizar cultivos de la familia de las gramíneas, a la cual pertenece el cultivo de caña de azúcar, con la finalidad de evidenciar la relación existente entre el clima y la productividad agrícola.

En cuanto el cultivo del arroz, se han realizado diferentes investigaciones con el objetivo de definir métodos experimentales adecuados, para determinar las repercusiones del cambio climático y los gases de efecto invernadero en la calidad y la productividad de las cosechas.

Para tal efecto, el Instituto de Investigación del Arroz (IRRI, por sus siglas en inglés) ha realizado diversos estudios para determinar el impacto del incremento en las concentraciones de dióxido de carbono y la temperatura en la productividad del cultivo de arroz inundado, en la localidad de Laguna, Filipinas, mediante cámaras de techo abierto (OTC, por sus siglas en inglés) (Moya *et al.* 1997).

Sin embargo, en la investigación realizada por Moya y otros investigadores (1997), se determinó que existe una gran influencia de las OTC en el crecimiento y desarrollo del cultivo, debido a que se generaron cambios en las condiciones del microambiente de las cámaras, principalmente en la transmisión de luz y en el incremento de la temperatura nocturna. Dichos cambios, a su vez, originaron una reducción del 12% del rendimiento



vegetativo y reproductivo del cultivo en las OTC, en comparación con el arroz cultivado en el campo.

Por otra parte, en el estudio realizado por Olzyk y otros investigadores (1999), se generó un análisis comparativo de los valores de producción del grano, la biomasa y las emisiones de metano, obtenidos en los experimentos realizados por el Instituto de Investigación del Arroz (IRRI, por sus siglas en inglés) en la localidad de Los Baños, ubicada en Filipinas, con las potenciales respuestas ante el cambio climático del cultivo, basados en simulaciones del modelo ORYZA1 y los datos climatológicos de dichos experimentos.

El modelo ORYZA1<sup>2</sup> se utilizó para simular las respuestas del cultivo ante concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> y/o altas temperaturas, para la época seca y la época inundada. Sin embargo, se determinó que las simulaciones y los resultados experimentales, diferían de los obtenidos mediante los escenarios climáticos, en determinadas épocas de crecimiento del grano. Por lo tanto, se evidenció la necesidad de mejoras en el modelo, con la finalidad de tomar en cuenta los efectos del cambio climático global, especialmente en términos del rendimiento del grano y la biomasa radicular, y así, obtener estimaciones más exactas de las emisiones de metano procedentes de los campos de arroz (Olzyk *et al.* 1999).

Por otro lado, Aggarwal y Mall (2002) han realizado estudios para determinar el efecto directo del cambio climático en los sembradíos de arroz inundado con un adecuado suministro de nitrógeno, en diferentes regiones agroclimatológicas de la India. Para tal efecto, el análisis de la respuesta del arroz se hizo bajo condiciones climáticas controladas y aumentos graduales de dióxido de carbono y temperatura.

---

<sup>2</sup> ORYZA1 es un modelo ecofisiológico para la producción de arroz inundado, que es utilizado para la estimación del rendimiento potencial del cultivo en un entorno determinado; utilizando como variables la fecha de siembra, la latitud, la radiación, la temperatura y la variedad del cultivo (Kropff *et al.* 1995, citado por Olzyk *et al.* 1999).

Los resultados del impacto del cambio climático en el rendimiento del arroz, fueron obtenidos mediante dos modelos de simulación, Ceres-Rice<sup>3</sup> y ORYZA1, con diferentes suministros de nitrógeno. El estudio mostró que, independientemente de las diversas incertidumbres, el efecto directo del cambio climático en los cultivos de arroz, en las diferentes regiones agroclimáticas de la India, será siempre positivo (Aggarwal y Mall 2002).

Se determinó además que el rendimiento del arroz aumentó entre 1,0 a 16,8% en un escenario pesimista<sup>4</sup>, dependiendo de la cantidad de nitrógeno empleada. Por otro lado, en un escenario optimista<sup>5</sup>, el rendimiento aumentó entre 3,5 y 33,8% (Aggarwal y Mall 2002).

En las regiones este y oeste del país, se obtuvo que estas son más propensas a mostrar mayor sensibilidad en el rendimiento del cultivo, bajo los efectos del cambio climático, tanto en las condiciones actuales de fertilización con nitrógeno, como en las mejoradas. La magnitud de dicho impacto puede estar sesgada hasta un 32%, dependiendo de la incertidumbre en el escenario de cambio climático, el suministro de nitrógeno y el modelo utilizado. Lo anterior, es altamente dependiente de la sensibilidad de la fenología y la fotosíntesis de esta gramínea, ante los cambios de temperatura utilizados en ambos modelos (Aggarwal y Mall 2002).

Desde otra perspectiva, en el caso del maíz, Bancy Marti (2000) realizó un estudio titulado “La influencia del cambio climático en la producción de maíz en las regiones semi-húmedas y semi-áridas de Kenia” (original en inglés); en el cual utilizó dos Modelos de Circulación General de la Atmósfera<sup>6</sup> (GCM, por sus siglas en inglés), correspondientes al Centro

---

<sup>3</sup> CERES-Rice es un modelo que utiliza variables como el mínimo de agua fácilmente disponible, el suelo, la variedad y factores genéticos específicos para simular el crecimiento del cultivo del arroz, su desarrollo y los rendimientos potenciales; así como el balance hídrico del suelo y el balance del nitrógeno, asociados con el crecimiento del cultivo (Singh *et al.*, citados por Aggarwal y Mall 2002).

<sup>4</sup> Según Aggarwal y Mall (2002), un escenario pesimista es aquel que posee un alto incremento de temperatura y un bajo incremento en la concentración de CO<sub>2</sub>.

<sup>5</sup> Un escenario optimista, por su parte, se define como aquel que posee un bajo incremento de temperatura y un alto incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> (Aggarwal y Mall 2002).

<sup>6</sup> Los GCM son algoritmos matemáticos para simular condiciones del sistema climático actual y de cambio climático, a escala mundial, considerando como variables la temperatura, la precipitación y la radiación solar. El objetivo de los modelos es representar en condiciones experimentales una duplicación del CO<sub>2</sub>, utilizando una graduación en los cambios de temperatura y presión de acuerdo al área geográfica, para un intervalo de tiempo mayor (Villers y Trejo 1998).

Canadiense para la Modelación del Clima, y al Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos<sup>7</sup> (CGCM y GFDL, respectivamente, por sus siglas en inglés), así como el Modelo Ceres-Maize<sup>8</sup>.

Para evaluar la influencia del cambio climático en el rendimiento del cultivo del maíz, se utilizó información meteorológica correspondiente a un periodo de 35 años (1960-1994) de las regiones este, oeste y central de Kenia, para la aplicación de los GCM. Para ello, se incluyeron datos de precipitación diaria, temperatura diaria máxima y mínima y la radiación solar diaria promedio. El modelo Ceres-Maize, por su parte, se utilizó para simular las respuestas del cultivo a cambios en el clima, el suelo, el manejo y las diferentes concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> (Marti 2000).

Los resultados del estudio indicaron un incremento en la temperatura de 2,29 ° C y 2,89 ° C, según el CCCM y el GDFL respectivamente, así como una disminución en la precipitación. Por otro lado, se pronostica una disminución en la producción en las regiones de la zona III<sup>9</sup> y un incremento en las correspondientes a la zona IV<sup>10</sup> (Marti 2000). Sin embargo, dichos cambios son bajos, ya que todos se sitúan por debajo de los 500 kg por hectárea, exceptuando el caso de Homa Bay. Además, dependiendo de la época de siembra, ambos modelos GCM pronosticaron un incremento en la producción del grano para el año 2030 (Marti 2000).

Por otra parte, en cuanto al cultivo del trigo, G.M. Ritcher y M.A. Semenov (2005) desarrollaron la investigación titulada “Modelación de los impactos del cambio climático en

---

<sup>7</sup> El CCCM y el GFDL-R30 son modelos que se basan fundamentalmente en variables atmosféricas. El GFDL predice altos incrementos positivos en la temperatura y las precipitaciones; mientras que el CCCM predice incrementos moderados de temperatura, pero, en general, decrementos en precipitación (Magaña *et al.*, citado por Villers y Trejo 1998).

<sup>8</sup> CERES-Maize es un modelo diseñado para simular el crecimiento de maíz, de acuerdo a variables como el suelo, el agua, la temperatura y el nitrógeno disponible en un campo en una temporada de cultivo (Semenov y Barrow, citados por Semenov 2007).

<sup>9</sup> La zona III posee una precipitación anual entre 800-1400 mm, un potencial de evaporación entre 50-65%, una temperatura media anual entre 12-14 °C y una altitud entre 8000-9000 ft (Sombroek *et al.*, citado por Marti 2000).

<sup>10</sup> La zona IV posee una precipitación anual entre 600-1100 mm, un potencial de evaporación entre 40-50%, una temperatura media anual entre 14-16 °C y una altitud entre 7000-8000 ft (Sombroek *et al.*, citado por Marti 2000).

los rendimientos de trigo en Inglaterra y Gales: la evaluación de los riesgos de sequía”; la cual posee como objetivo principal determinar el impacto del cambio climático en el déficit máximo de humedad de suelo (SMDmax), y la reducción del rendimiento potencial relacionado con la sequía (YRdr), mediante el modelo Sirius<sup>11</sup>.

Con la finalidad de evaluar el impacto del cambio climático en los rendimientos de trigo en el futuro, así como analizar el riesgo de sequía, se utilizó información meteorológica correspondiente a tres estaciones ubicadas en las regiones mayoritarias de Inglaterra y Gales. Se seleccionaron los parámetros de media estadística y desviación estándar de la temperatura, la precipitación y la radiación, para un periodo de 30 años (1960–1990). Por otra parte, se utilizaron los datos de temperatura diaria máxima y mínima, precipitación y radiación global, para la simulación (Ritcher y Semenov 2005).

Los escenarios climáticos se basaron en los resultados obtenidos mediante el Modelo del Centro Climático (HadCM2)<sup>12</sup> y se construyeron mediante el uso de un generador de clima estocástico (LARS-WG)<sup>13</sup>.

Se generaron escenarios<sup>14</sup> para los periodos del 2020 y el 2050 en lugares representativos del Reino Unido (Ritcher y Semenov 2005). Las distribuciones de probabilidad se derivaron de simulaciones múltiples utilizando valores representativos de clima, tipos de suelo y fechas de siembra. El SMDmax es probable que aumente en el futuro, especialmente en suelos poco

---

<sup>11</sup> Sirius es un modelo de simulación que calcula la biomasa de trigo, basado en la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y el crecimiento del grano, en una gran cantidad de condiciones y ante el cambio climático (Jamieson *et al.* 1998a, citado por Ritcher y Semenov 2005)

<sup>12</sup> El HADCM2 produce los mayores cambios en las precipitaciones; mientras que el CGCM1 produce la segunda variación más grande. El CGCM1 y HADCM2 son los dos únicos modelos que producen temperaturas diarias mínimas y máximas (Hoover Institute Press 2003).

<sup>13</sup> El LARS WG es un modelo estadístico que permite simular datos de variables meteorológicas basados en las características estadísticas de datos observados en un sitio. Este modelo puede generar extensas series de tiempo de variables meteorológicas-como precipitación, temperaturas máximas, mínimas y radiación solar-para la evaluación del riesgo por amenazas climáticas (Semenov y Barrow 2002, citados por Semenov 2007).

<sup>14</sup> Se utilizaron dos tipos de escenarios: aquellos que incluyen únicamente los cambios en la media de las variables climáticas y aquellos que incluyen tanto las variaciones en la media como en la varianza (Ritcher y Semenov 2005).

profundos, mientras que la probabilidad de YRdr superior al 25% se incrementará en un 10% hasta la década de 2050 (Ritcher y Semenov 2005).

Sin embargo, los rendimientos medios del trigo es probable que aumenten en un 1,2 a 2 t/ha (15-23%) en la década de 2050 debido a un aumento de CO<sub>2</sub> relacionadas con la eficiencia en el uso de radiación (RUE). Los rendimientos de grano es probable que sean menos variables, pero con la probabilidad de que el coeficiente anual de variación (CV) inferior o igual a 15% siga siendo el mismo (Ritcher y Semenov 2005).

Los cambios en la varianza de las variables de tiempo tienen poco efecto sobre los rendimientos de grano. Haciendo caso omiso de la mejora genética de las variedades, se prevé que los rendimientos aumenten hasta la década de 2020 más que en los siguientes 30 años. Un análisis de sensibilidad para los parámetros de crecimiento de los cultivos sugiere que los mayores aumentos de rendimiento (1 t/ha) son posibles con nuevas variedades que aumentan el período de llenado del grano (Ritcher y Semenov 2005).

Desde otra perspectiva, en el estudio titulado “El impacto potencial del cambio climático en el rendimiento del trigo en el Sur de Australia” (original en inglés), Luo y otros investigadores (2005) utilizan diversos escenarios climáticos, mediante estudios probabilísticos, con la finalidad de cuantificar los posibles impactos del cambio climático en el sur de Australia. Para ello, se utilizó información meteorológica correspondiente a ocho zonas del Sur de Australia, que son representativas de cada una de las regiones agrícolas de la nación. Se utilizaron como variables climáticas la temperatura máxima y mínima, así como la radiación solar y la precipitación, correspondientes al periodo comprendido entre 1900–1999.

Para simular el efecto del cambio climático en el rendimiento potencial del cultivo, se usó el Módulo APSIM-Trigo<sup>15</sup>, así como información proveniente del Reporte Especial del IPCC Escenarios de Emisiones (SRES) y nueve modelos climáticos para el año 2080. Por otro lado, para el cálculo del rendimiento potencial se crearon 80 escenarios de cambio climático, basados en diversos cambios en los niveles de la temperatura regional, la precipitación y la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> (Luo *et al.* 2005).

Los resultados de la investigación elaborada por Luo y otros investigadores (2005), demuestran que la variación en la precipitación es el factor que ejerce mayor influencia en las zonas de media a baja precipitación. El incremento en la temperatura muestra un impacto menor que la precipitación, mientras que el cambio en la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> posee el menor impacto de las tres variables climáticas. Se proyecta que el rendimiento del cultivo decrecerá en todas las zonas desde un 13,5% hasta un 32% bajo los escenarios climáticos más probables.

La creciente importancia económica de la producción de caña de azúcar, ha motivado el desarrollo de diversos modelos para estimar el rendimiento del cultivo en regiones específicas (Cuadra *et al.*, citado por Black *et al* 2012), así como la evaluación de la relación existente entre el rendimiento, la rentabilidad, el riego, los recursos hídricos y los medios de subsistencia de la población local (Black *et al* 2012).

Se han generado así, diversos modelos que simulan la partición de biomasa a los diferentes órganos de la planta durante su crecimiento, tales como el CANEGRO, el APSIM-Caña de Azúcar y el QCANE (Inman-Bamber, Keating *et al.*, Liu y Bull; citados por Black *et al* 2012).

---

<sup>15</sup> El Módulo APSIM-Trigo simula el crecimiento y desarrollo del cultivo de trigo, diariamente, en un área base y como función del clima (temperatura, precipitación y radiación), el suelo (humedad del suelo y contenido de nitrógeno), los coeficientes genéticos y el manejo del cultivo (Luo *et al.* 2005).

El modelo de simulación de caña de azúcar denominado CANEGRO simula el crecimiento de los cultivos de caña de azúcar, a partir de datos meteorológicos diarios, variedades de la planta, propiedades del suelo e información del manejo del cultivo (Singels *et al.* 2008).

Por otro lado, el modelo APSIM-Caña de Azúcar posee la capacidad de simular diferentes concentraciones de sacarosa para una gama de cultivos, mientras que el modelo de simulación QCANE busca principalmente estudiar la acumulación de sacarosa y la forma de maximizarla, mediante el análisis de la fotosíntesis y la respiración de la planta (O’Leary, citado por Knox *et al.* 2010).

A pesar de que los modelos climáticos favorecen la planificación de la irrigación, la predicción del rendimiento de sacarosa y el impacto del cultivo de la caña en las emisiones (Singels y Smith, Lisson *et al.*, Thorburn *et al.*; citados por Black *et al.* 2012), se ha comprobado que existen pocas investigaciones detalladas sobre el impacto del cambio climático en la producción de caña de azúcar (Gawander, citado por Black *et al.* 2012).

Debido a la carencia de estudios anteriormente mencionada, y a la importancia económica de la caña de azúcar, se han realizado diversas investigaciones sobre el impacto del cambio climático sobre dicho cultivo, como es el caso de Ribeiro y otros investigadores (2009), quienes utilizaron un modelo agrometeorológico (AZM)<sup>16</sup>, para estimar el rendimiento de la caña de azúcar en la región sureste de Brasil, basado en el escenario A1B del IPCC. Dicho rendimiento se evaluó para los años 2020, 2050 y 2080, tomando en consideración los posibles impactos causados por los cambios en temperatura, precipitación, radiación solar, concentración de dióxido de carbono en la atmósfera y avances tecnológicos.

Para la producción potencial, se determinó que esta incrementará debido a las altas temperaturas, lo cual afecta positivamente la eficiencia fotosintética de las plantas C4. De

---

<sup>16</sup> El modelo AZM estima el rendimiento máximo de un cultivo, basado en información correspondiente a la disponibilidad de agua y los requerimientos nutricionales, así como las características genéticas de los cultivos y las condiciones ambientales, como lo son la radiación solar, el fotoperiodo y la temperatura del aire (Ribeiro *et al.* 2009).

acuerdo a las condiciones actuales, la productividad potencial aumentará 15% en el año 2020, 33% en el 2050 y 47% en el año 2080. Se estima que la productividad real aumentará un 12% en el año 2020, 32% en el 2050 y 47% en el año 2080 (Ribeiro *et al.* 2009).

Por otra parte, Marin y otros investigadores (2011), llevaron a cabo un estudio con la finalidad de determinar el impacto de diversos escenarios climáticos en el rendimiento de la caña de azúcar en Sao Paulo, Brasil. Emplearon el modelo CANEGRO, el cual simula nueve estados fenológicos de la caña de azúcar y para su aplicación, se utilizó información meteorológica de 62 estaciones para un periodo de ocho años.

Los resultados de dicho estudio para los cuatro escenarios climáticos basados en el IPCC, muestran que, en las áreas con rendimientos superiores a las 95 toneladas por hectárea, este reducirá en relación con las condiciones actuales, considerando un incremento de 4° C. Para los demás escenarios el efecto del cambio climático en el rendimiento de la caña será leve; no obstante, en general, el rendimiento promedio del estado de Sao Paulo decrecerá (Marín *et al.* 2011).

Por otra parte, varios investigadores (Black *et al* 2012) desarrollaron el estudio llamado “El cultivo de plantas C4 ante el cambio climático: el caso de la caña de azúcar en Ghana” (original en inglés), en el cual se aplicó un modelo de cultivo de caña de azúcar en Ghana, y la región de Sao Paulo en Brasil. Dicho modelo se utilizó para calcular las necesidades de riego del cultivo, tanto en las condiciones actuales del clima como en un escenario idealizado, en el cual se eleva la temperatura 4°C y se duplica la concentración de dióxido de carbono.

Es importante mencionar, además que, ya que la caña no está siendo cultivada en Ghana en la actualidad, dicho modelo se evaluó en cuatro regiones del estado de Sao Paulo, incluyendo datos de rendimiento anual comprendidos entre el año 1990 y el 2011. Por otro parte, se



utilizó el modelo JULES-SC<sup>17</sup>, para simular el crecimiento de la caña de azúcar, utilizando las fórmulas de partición de carbono pertenecientes a CANEGRO (Black *et al* 2012).

Los resultados del estudio muestran que, con una irrigación adecuada, es posible obtener el 75% de rendimiento que se obtiene en la región de Sao Paulo sin irrigación alguna, considerando que el crecimiento de la planta no se vea limitado debido al contenido de nutrientes del suelo. Además, el modelo muestra que el estrés hídrico en la caña en Ghana provocaría un alto incremento del desdoblamiento de la sacarosa (Singels *et al*, van Heerden *et al*; citados por Black *et al* 2012).

Desde otra perspectiva, en Nigeria se han empleado correlaciones y análisis de regresión para estimar el efecto del cambio climático en el crecimiento y el rendimiento de la caña (Binbol *et al*. 2006). Para tal efecto, se utilizaron registros diarios de precipitación, humedad relativa, temperatura máxima y mínima, evaporación, velocidad del viento y horas luz para el periodo comprendido entre el año 1981 y el año 2000. Se utilizó, además, un modelo empírico para determinar la relación existente entre el clima y la agricultura, utilizando los estados fenológicos como intervalos de tiempo para procesar la influencia del cambio climático en la producción del cultivo, tal y como lo sugieren Olaniran y Babatolu (citados por Binbol *et al*. 2006).

Los resultados del análisis de correlaciones demuestran que diversos factores climáticos influyen en el crecimiento y rendimiento de la caña de azúcar. El análisis de regresión, por su parte, evidencia que los dos factores que afectan significativamente el rendimiento del cultivo son la evapotranspiración en la fase de máximo desarrollo en la caña de azúcar y la temperatura mínima en la germinación. La evapotranspiración se relaciona positivamente con el rendimiento, provocando una variación del 59,8% en el rendimiento, mientras que la

---

<sup>17</sup> El modelo JULES-SC simula los flujos de agua, calor y humedad entre la superficie de la tierra y la atmósfera; así como los flujos de carbono, y otros gases como el metano y el ozono (Clark *et al.*, citado por Best *et al.*, citado por Black *et al*. 2012).

temperatura mínima influye negativamente, provocando una variación de 9,4% (Binbol *et al.* 2006).

En cuanto a la caña de azúcar, es importante destacar que la carencia de investigaciones para cuantificar el impacto del cambio climático en el cultivo se debe, en gran medida, a la dificultad de obtener datos consistentes y para un largo plazo de los rendimientos, así como a la gran variedad de factores no climáticos que influye en dicho rendimiento<sup>18</sup> (Greenland 2005).

Investigando sobre otros enfoques de modelación, se encuentra como en diversos estudios se aplica el modelo teórico de Nerlove o el modelo de ajuste parcial, el cual propone que la variable dependiente rezagada ( $Y_{t-1}$ ) es una variable que explica el comportamiento de  $Y$ , donde, como ejemplos prácticos en la agricultura, se propone que el precio de un cultivo se ve determinado por el precio de la cosecha anterior, ya que este valor estimula a las personas a producir este bien si el precio es alto y desestimula si el precio es bajo. La misma lógica se muestra con la oferta de productos agropecuarios, donde la producción actual es influenciada directamente por la oferta de la cosecha anterior.

Dentro de los estudios prácticos se encontraron aplicaciones del modelo de expectativas adaptativas para los cultivos de girasol, remolacha azucarera y caña de azúcar. Para esto se analizan los estudios: *El modelo de expectativas adaptativas como mejor método para estimar la variable precio del grano en el modelo de equilibrio* (Calvo 2005), *Análisis de las variables que inciden en la oferta de productos agrícolas: una aplicación al cultivo de la remolacha azucarera* (Alonso y Rodríguez 1982), *Respuesta de la oferta de la caña de azúcar en la India: resultados a nivel país y estatal* (original en inglés) (Kumawat y Prasad 2012) y *Respuesta de la oferta de caña de azúcar en Indonesia* (original en inglés) (Soestrisno 1984).

---

<sup>18</sup> Incluye enfermedades en las plantas, plagas e insectos, malezas, la variabilidad del suelo, los mecanismos de cosecha y problemas de drenaje (Greenland 2005).

Para el caso del estudio sobre el girasol, se buscó identificar el indicador apropiado para la variable precio del grano, ecuación que es parte del modelo de equilibrio parcial para girasol, donde no se encontró que para dicha variable fuera un buen estimador.

Analizando el trabajo sobre el cultivo de remolacha azucarera, se destaca que la forma más usual de estimar la oferta de algún producto agrícola es mediante las series históricas, donde destaca el modelo dinámico de Nerlove. Dicha metodología se aplica para la producción de este cultivo en secano y bajo riego, donde se obtiene como principales resultados que para la primera condición, el precio del año anterior y del bien sustituto (girasol) determinan en un 84% la oferta planeada para ese cultivo; en el caso de la producción en regadío, el 85,5% de la oferta planeada la determinan el precio del maíz y el trigo (bienes sustitutos), además del precio de regulación de la campaña actual.

Con respecto a los análisis en el cultivo de caña de azúcar, para el caso de Indonesia, se analizó la respuesta de las personas productoras de caña de azúcar, las cuales en una parte importante demostraron ser sensible a los precios, mientras que los ingenios azucareros no mostraron resultados significativos sobre la oferta de azúcar (Soetrisno 1984).

Por otra parte, los resultados en India muestran que el área sembrada se ve afectada mayormente por los precios del azúcar y la producción por la precipitación. Aunado a lo anterior, se aduce que la variable de precios rezagados mejora los estadísticos de manera significativa, teniendo una influencia directa en la determinación de la producción, ya que su fluctuación puede incidir en la inversión en el uso de insumos en el cultivo y por ende en la calidad del azúcar. Se debe considerar que debido a las características de la caña, el precio recibido por las personas productoras incide en la cantidad y forma de producir, sino que también se debe considerar el precio del azúcar como una variable para analizar, ya que la mayor parte del producto se destina a la industria azucarera.

Otros de los factores que influyen directamente sobre la producción son el manejo agronómico de las plantaciones, destacando las prácticas de conservación de suelo, uso de

fertilizantes y riego. Por otra parte, la investigación y desarrollo de los cultivos son preponderantes para desarrollar nuevas variedades que permiten que el agronegocio sea más rentable y resiliente a las variaciones climáticas. Lo anterior adquiere mayor preponderancia, cuando se realiza una correcta transferencia de estas tecnologías con el debido acompañamiento a las personas productoras.

## **5.2 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

### **5.2.1 FENÓMENO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones observadas en el estado medio y otros datos estadísticos del clima, como lo son las desviaciones típicas y la ocurrencia de fenómenos extremos, tanta en la escala temporal como espacial; siendo estas más amplias que la escala de un fenómeno meteorológico en particular (IPCC 2007).

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), se define el cambio climático como una “variación significativa, desde el punto de vista estadístico, en el estado medio del clima o en su variabilidad; durante un período extendido. Dicha variación puede ser ocasionada por cambios naturales internos o antropogénicos; tanto en la composición de la atmósfera como en el uso de suelos” (2007).

Por otra parte, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC, citado por IPCC 2007) define el cambio climático como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables no menor de diez años”.

El cambio en el sistema climático se ha acelerado debido a las actividades antropogénicas desarrolladas a partir de la Revolución Industrial, fundamentalmente, por el alto consumo de combustibles fósiles en procesos industriales y la movilización vehicular, la deforestación, cambios en el uso del suelo y quemadas en la actividad agrícola, entre otros. Según Cifuentes

(2010), los científicos han determinado que el desarrollo de dichas actividades humanas, han contribuido considerablemente en el aumento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI).

Se denomina gases de efecto invernadero a aquellos gases constituyentes de la atmósfera, tanto de origen natural como antropogénico, que absorben y emiten radiación en longitudes de onda correspondientes a la radiación infrarroja, la cual es emitida por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes (IPCC 2007).

De esta forma, los gases de efecto invernadero retienen el calor dentro del sistema de la troposfera terrestre, la cual constituye la parte interior de la atmósfera desde la superficie a 10 km de longitud en latitudes medias. Entre los principales gases de efecto invernadero se encuentran el vapor de agua ( $H_2O$ ), el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el óxido nitroso ( $N_2O$ ), el metano ( $CH_4$ ), y el ozono ( $O_3$ ); mientras que en los gases totalmente producidos por el hombre destacan los halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro y bromo, de las que se ocupa el Protocolo de Montreal (IPCC 2007, FAO 2013b).

Las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (379 ppm) y metano (1774 ppm) en 2005, exceden el intervalo natural de valores de los últimos 650 000 años, donde el aumento del  $CO_2$  se debe principalmente a la utilización de combustibles de origen fósil y, en una parte apreciable pero menor, a los cambios de uso de la tierra.

Es muy probable que el aumento observado de la concentración de  $CH_4$  se deba, predominantemente, a la agricultura y a la utilización de hidrocarburos, siendo este menos rápido desde comienzos de los años 90, en concordancia con las emisiones totales (como suma de fuentes antropogénicas y naturales), que han sido casi constantes durante ese período. Por otra parte, el incremento en la concentración de óxido nitroso ( $N_2O$ ) procede principalmente de la agricultura (IPCC 2007). En el Cuadro 5.1 se detalla la descripción y el potencial de calentamiento global del dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el metano ( $CH_4$ ) y el óxido nitroso ( $N_2O$ ).

Cuadro 5. 1

**Características de los principales gases de efecto invernadero (GEI)**

<b>Gas de efecto invernadero</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Descripción</b>	<b>Potencial de calentamiento global <sup>1/</sup></b>
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	Se produce de forma natural y como subproducto de la combustión de hidrocarburos y biomasa, cambios en el uso del suelo y procesos industriales. Es el principal gas de efecto invernadero antropogénico.	1
Metano	CH <sub>4</sub>	Se produce por la descomposición anaeróbica, o en ausencia de oxígeno, de residuos de vertederos y descomposición de residuos animales, digestión animal, producción y distribución de gas natural y petróleo, producción de carbón, y combustión incompleta de hidrocarburos.	21
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	Es emitido, principalmente, con los usos de fertilizantes orgánicos y comerciales en los cultivos, la combustión de hidrocarburos y biomasa, además de en la producción de ácido nítrico.	310

1/ A un horizonte de 100 años (IMN 2014a)

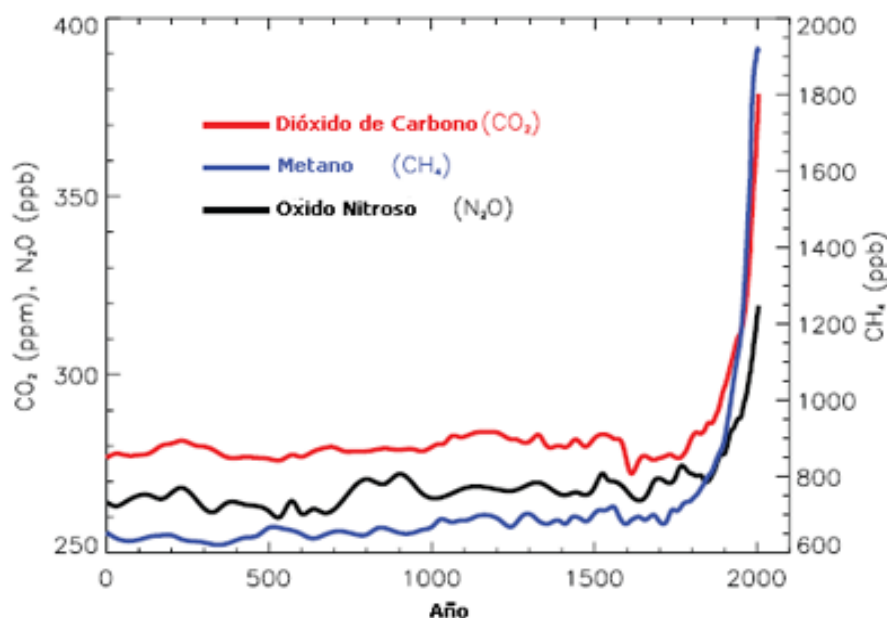
Fuente: Elaborado a partir de información de IPCC (2007) e IMN (2014a).

La presencia de dichos gases en la atmósfera, se ha convertido en un forzamiento externo dominante<sup>19</sup> sobre el clima; siendo estos responsables de la mayor parte del calentamiento observado en los últimos cincuenta años (Cifuentes 2010). Este aumento observado de la temperatura ocurre, fundamentalmente, a partir de 1970, y los diez años más calurosos se presentan a partir de 1990 (Stern, citado por CEPAL 2010a), distribuido de manera distinta en intensidad y manifestaciones en las diferentes latitudes.

La figura 5.1, evidencia la estrecha relación entre las emisiones de GEI y el cambio climático a escala global.

Figura 5. 1

**Concentración mundial de gases de efecto invernadero en la atmósfera según tipo de gas, 0-2005**



Fuente: IPCC (2007)

<sup>19</sup>Por ejemplo, erupciones volcánicas, variaciones solares y forzamientos inducidos por el hombre tales como la composición cambiante de la atmósfera y el cambio en el uso de las tierras (IPCC 2007).

Cabe destacar además que, de permanecer constantes en las próximas dos décadas las concentraciones de GEI, en los niveles del año 2000, habría un calentamiento adicional de 0,1°C por decenio. Sin embargo, de prevalecer el comportamiento actual de emisiones, dicho calentamiento sería de 0,2 °C por década para el mismo periodo (Aguilar 2011).

El cambio climático muestra además un impacto significativo sobre los patrones meteorológicos, las precipitaciones y el ciclo hidrológico, lo cual influye en la disponibilidad de las aguas superficiales, así como en la humedad del suelo y en la recarga de las aguas subterráneas (Cárdenas y Cárdenas 2009); por lo cual será un factor condicionante esencial en las características y opciones del desarrollo económico de este siglo, en particular en América Latina y el Caribe, donde las condiciones geográficas y climáticas, y la vulnerabilidad a los eventos extremos y los factores económicos, sociales e incluso institucionales, acentúan e intensifican estos impactos climáticos (CEPAL 2010a).

En la región centroamericana, los mayores impactos han provenido de una mayor frecuencia, intensidad o duración, o del cambio en el comportamiento de la variabilidad y eventos extremos, lo cual ha provocado cuantiosas pérdidas y daños socioeconómicos y ambientales. De acuerdo a las proyecciones climáticas futuras y a los acuerdos internacionales, la mayoría no vinculantes, se estaría acrecentando la magnitud del cambio climático, lo cual se estima sería a un mayor ritmo y, por ende, los efectos adversos podrían incrementarse dificultando la adaptación, particularmente para las especies, sectores socioeconómicos, y poblaciones más vulnerables (Aguilar 2011).

Asimismo, algunos eventos meteorológicos extremos han alterado su frecuencia e intensidad en los últimos cincuenta años, como es el caso de las precipitaciones, las elevaciones extremas del nivel del mar presentadas desde 1975, así como el incremento en la actividad ciclónica tropical desde 1970 en el Atlántico Norte, tal y como lo enuncia Aguilar (2011), en la investigación denominada *Impactos del cambio climático en la agricultura de América Central y en las familias productoras de granos básicos*.



Cabe destacar además que, el 76% de la variabilidad anual observada de las temperaturas de la Tierra, entre 1880 y 2007, se encuentra estrechamente relacionada con las variaciones en la temperatura superficial oceánica, como es el caso del Niño Oscilación del Sur (ENOS), el cual representa una manifestación de la variabilidad térmica del Océano Pacífico, ejerciendo una influencia en la temperatura global en el corto plazo, así como otros fenómenos de variabilidad natural.

Lo anterior ha quedado evidenciado por autores como Foster y Rahmstorf y Lean y Rind (citados por IMN 2014b), quienes demostraron que, al menos, entre 1889 y 2010, el 2,3% del calentamiento global fue ocasionado por el ENOS, el cual es la forma de la variabilidad climática estacional e interanual con mayor preponderancia para Costa Rica y las zonas tropicales y se compone de tres fases: El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría), los cuales representan los extremos opuestos de esta oscilación, y su fase Neutra (IMN 2014b).

Como indican Rasmusson y Carpenter (citados por IMN 2014b), El Niño y La Niña tienen una recurrencia de tres a cinco años en promedio, sin embargo, en el registro histórico este intervalo ha variado de dos a siete años, donde normalmente el primero, tiene una duración de nueve a doce meses.

No obstante, hay casos muy excepcionales en que se ha prolongado por cuatro años, por ejemplo, en el periodo de 1991 a 1994; mientras que, para el caso de La Niña, esta suele prolongarse de uno hasta tres años, con magnitudes de menor intensidad que las del Niño en las últimas dos décadas (Aguilar 2011, IMN 2014b). A pesar de dichas variaciones, ambos fenómenos tienden a originarse entre marzo y junio, y alcanzan un máximo de intensidad entre noviembre y febrero.

Los costos de las manifestaciones del ENOS para las naciones son cuantiosas, por ejemplo, en el caso de El Niño de 1997 a 1998 han sido estimados en \$33 mil millones para todo el planeta (BID y OMM, citado por Bonilla *et al.* 2003) y para el caso de América Latina y el

Caribe se cita que los costos directos de este episodio llegan a \$8,5 mil millones (WMO, citado por Bonilla *et al.* 2003).

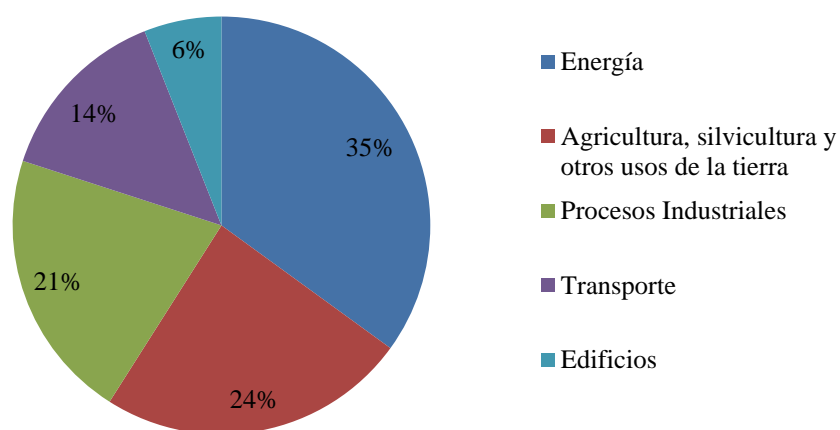
Para el caso de Costa Rica se ha identificado que las sequías más severas se desarrollan principalmente durante los eventos de El Niño (Lyon, Coehlo y Goddard, citados por IMN 2014b), demostrando efectivamente que estos coincidieron con una sequía en la Vertiente del Pacífico (IMN, citado por IMN 2014b); por el contrario, en la Vertiente del Caribe dichos eventos reflejaron cerca del 90% de las lluvias extremas, evidenciando las diversas manifestaciones del ENOS en el territorio costarricense.

### **5.2.2 CONTRIBUCIÓN DEL SECTOR AGROPECUARIO COMO EMISOR DE GASES DE EFECTO INVERNADERO**

El sector Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés) es el segundo en aporte de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial, tan solo superado por el sector de generación de energía.

Gráfico 5. 1

#### **Emisiones globales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por sector económico, 2010**

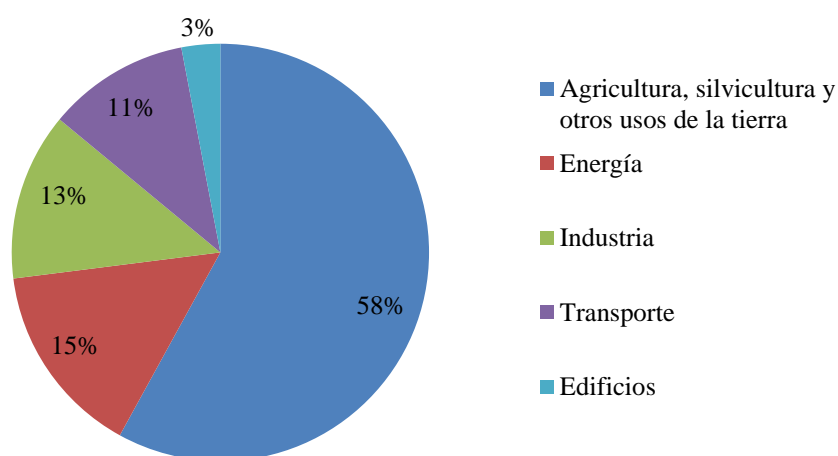


Fuente: Elaborado a partir de datos del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014a).

Tanto a niveles globales como regionales, el aporte del sector agropecuario aunado al papel que juegan la silvicultura y otros usos de la tierra, es determinante en el porcentaje de emisiones de gases de efecto invernadero. Según datos del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014) y de la plataforma de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), el sector AFOLU ocupa a nivel mundial un 24% y en América Latina un 58% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (FAO 2014), tal y como lo indican los Gráficos 5.2 y 5.3.

Gráfico 5. 2

**América Latina: Distribución porcentual de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por sector económico, 2001-2010**



Fuente: Elaborado a partir de datos del Quinto Informe de Evaluación del IPCC (2014a) y FAO (2014a)

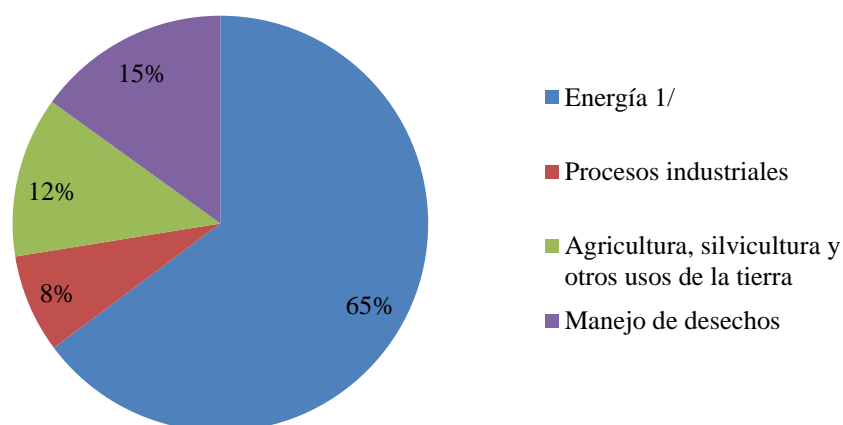
Para el caso concreto de Costa Rica, basado en el Inventario Nacional de Emisión de Gases con Efecto Invernadero y de Absorción de Carbono en Costa Rica en el 2000 y 2005; además de datos provenientes de la Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (IMN 2009b, IMN 2009c), los comportamientos de los sectores son muy similares a los globales, en donde el energético representa un 65% de las emisiones del país y el AFOLU un 12%. Cabe destacar que, para el caso del sector

AFOLU, también se contabiliza su aporte como mitigador de GEI, ya que existe un efecto compensatorio de -3 506,7 Gigagramos para los Otros usos de la tierra y la silvicultura, contraponiéndose a las 4 603,9 Gigagramos de CO<sub>2</sub> equivalente que emite el sector agropecuario.

Gráfico 5. 3

**Costa Rica: Distribución porcentual de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por sector económico, 2005**

(como porcentaje del total de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, expresado en Gigagramos)



1/ En el sector energía, se subdivide en dos categorías: las actividades de combustión de hidrocarburos, dentro de las cuales se encuentra el sector transporte, y las emisiones fugitivas provenientes de la extracción y manipulación de combustibles. (IMN 2009c)

Fuente: Elaborado a partir de datos de IMN (2009b).

Se puede destacar que el metano es el GEI que genera el mayor aporte dentro de este sector, emitido principalmente por el sector ganadero, el cual para el 2000 representaba el 91,20% y para el 2005 el 91,60%. En contraparte, el óxido nitroso presentó emisiones porcentuales de 0,03% y 0,02% para los mismos años.

Cuadro 5. 2

**Costa Rica: Porcentaje de emisiones del sector agropecuario por año, según tipo de gas de efecto invernadero, 2000 y 2005**

Gas de Efecto Invernadero (GEI)	Año		
	2000	2005	2012 1/
CH <sub>4</sub>	91,20%	91,60%	97,07%
CO <sub>2</sub>	1,30%	1,00%	2,18%
CO	-	-	0,05%
N <sub>2</sub> O	0,03%	0,02%	0,65%
NO <sub>x</sub>	7,40%	7,40%	0,05%

1/ La metodología utilizada para la elaboración del inventario de este año, es la proporcionada por el IPCC denominada “Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero”; mientras que para los inventarios del año 2000 y 2005, se utilizaron las directrices del año 1996.

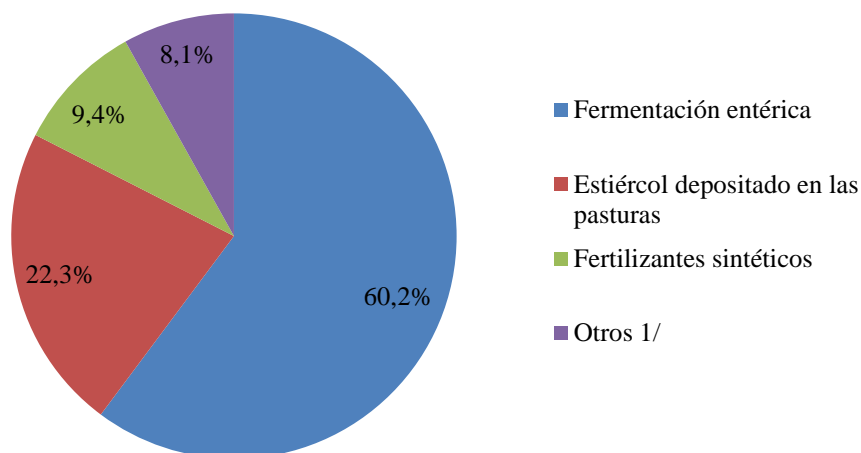
Fuente: Elaborado a partir de datos de IMN (2009b y 2009c).

Según la metodología de cálculo utilizada para efectuar el Inventario y las Comunicaciones Nacionales, así como los Reportes Bienales de Actualización (BUR por sus siglas en inglés), en el sector agropecuario las emisiones de gases con efecto invernadero se producen de la fermentación entérica en el ganado, el cultivo de arroz anegado, la quema de pasturas y la de residuos agrícolas en el campo y las emisiones en suelos agrícolas, las cuales contemplan cultivos y pastos. Cabe destacar que la fermentación entérica constituye el 60,42% de las emisiones de GEI, representado mayormente por la producción de ganado bovino.

Por otra parte, la utilización de fertilizantes sintéticos, entre ellos los nitrogenados, simbolizan el 9,32% de dichas emisiones a nivel nacional, tal y como se aprecia en el Gráfico 5. 4.

Gráfico 5. 4

**Costa Rica: Distribución porcentual de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el sector agropecuario, 1961-2012**



1/ La categoría Otros contempla: cultivo del arroz, cultivo de suelos orgánicos, estiércol aplicado a los suelos, gestión del estiércol, residuos agrícolas, quemado de residuos agrícolas y quemado de sabana.

Fuente: Elaborado a partir de datos de FAO (2014a)

Durante el año 2000, el CH<sub>4</sub> fue mayoritariamente generado por el hato bovino (86%) y en menor grado por el arroz anegado (14%); además se determinaron valores mínimos en la quema de residuos agrícolas y en la quema de pasturas. Para el 2005, los valores estimados tuvieron un comportamiento similar, donde el 89% de los GEI del sector fueron producidos por la ganadería vacuna, mientras que el arroz anegado generó el 11%.

El N<sub>2</sub>O en su gran mayoría durante el 2000 se emitió en los suelos dedicados a cultivos agrícolas y pasturas, siendo estos últimos los responsables de la mayor proporción de la emisión. La quema de los residuos agrícolas en el campo y la quema de pasturas generaron una cantidad mínima de este gas, en comparación con las otras actividades agrícolas.

Durante la quema de residuos, se originan diversos gases de efecto invernadero, sin embargo, debido a que el dióxido de carbono es fijado por el proceso de fotosíntesis de las plantas durante el crecimiento, este no se considera para ser reportado en el Inventario, donde solo se incluyen el metano y el óxido nitroso, ya que estos no pueden ser absorbidos por la planta durante su crecimiento, por lo que se considera su emisión neta. Dicha estimación se realizó solamente para el cultivo de caña de azúcar.

Para el caso de los pastos, el crecimiento de la biomasa es controlado por la alternancia de la estación seca y húmeda, donde durante la primera es que ocasionalmente se producen incendios naturales propios de las condiciones de la época. Para el inventario del 2000, se estimó un total de 18 072 hectáreas quemadas, las cuales contrastan con las 9.640 ha mostradas en el 2005, lo cual resulta una disminución significativa por motivo de la implementación de la Estrategia Nacional del Manejo del Fuego y la presencia de una estación seca menos severa. En general, las emisiones del sector agrícola cambiaron de 4 608,6 a 4 603,9 Gigagramos de CO<sub>2</sub> equivalente (IMN 2009b).

En el caso de la silvicultura y los cambios de uso de la tierra es importante destacar que en el país para el 2000 y 2005, la absorción de CO<sub>2</sub> en este sector supera los tres millones de toneladas (IMN 2009b), lo cual hace que esta cantidad pueda ser utilizada para compensar las emisiones de los otros sectores.

Por otra parte, según datos del Inventario (IMN 2009b), además de las emisiones del sector primario, el sector agropecuario aporta un 2,83% del CO<sub>2</sub> y un 0,41% de CH<sub>4</sub> al sector energía para el 2005, lo cual equivale en Gigagramos a 155,3 y 0,02, respectivamente. Lo anterior se da por la utilización de equipo agrícola estacionario, utilizados principalmente para la generación de fuerza motriz, calor y enfriamiento. Para la industria azucarera, las emisiones mencionadas provienen de equipos utilizados en la producción de caña, extracción y fabricación de azúcar; entre los cuales destacan los evaporadores, cristalizadores y centrífugas, entre otros.

Cuadro 5. 3

**Costa Rica: Emisiones del sector energía para la actividad agropecuaria según gas de efecto invernadero, 2000 y 2005**

Gas de Efecto Invernadero (GEI)	Año	
	2000	2005
CO <sub>2</sub>	394,600	155,300
CH <sub>4</sub>	0,050	0,020
N <sub>2</sub> O	0,003	0,001
CO	0,110	0,040
NO <sub>x</sub>	0,540	0,200
NMVOC	0,030	0,010
SO <sub>2</sub>	0,210	0,050

1/ Otros hidrocarburos volátiles diferentes del metano

Fuente: Elaborado a partir de datos de IMN (2009b).

Según lo descrito en el Inventario (IMN 2009b) para los años 2000 y 2005, la producción de caña de azúcar es responsable del 1,04% y el 0,96% del de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) del país, respectivamente; mientras que para el 2012 representó el 0,76% de dichas emisiones.

Para realizar este cálculo, se consideraron las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados, la incorporación de materia orgánica y la fijación biológica del nitrógeno. Además, los factores de emisión utilizados se derivan del estudio realizado por Montenegro y Abarca (2001) situado en una finca azucarera ubicada en Turrialba, el cual evaluó el efecto con fertilizante nitrogenado, así como el empleo de la formula completa 9-14-25. Dicho estudio se realizó en una finca con suelo tipo inceptisol, en la cual la temperatura promedio anual es de 22°C, la precipitación es de 2800 mm y la humedad relativa de 85%. Cabe destacar además que el control de malezas se realizó mediante corte manual, se utilizó la aporca mecanizada o



tracción animal, según la topografía del terreno, y no se aplicaron plaguicidas para el control de plagas y enfermedades.

Sin embargo, para analizar dicho aporte del cultivo a las emisiones nacionales, se debe tener presente que la fertilización difiere según la región cañera, debido al manejo agronómico empleado y a las condiciones propias de la zona, ya que no toda el área sembrada es fertilizada ni se aplican las mismas dosis.

El Inventario Nacional de Emisión de Gases de Efecto Invernadero y de Absorción de Carbono en Costa Rica (MINAET, citado por PNUD 2012) estima que las emisiones de GEI asociadas a la caña de azúcar, tomando como referencia las estadísticas oficiales del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y la Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA), se asocian a dos fuentes responsables: suelos agrícolas y quema en el campo de residuos agrícolas. Sin embargo, las consultas a expertos (Chaves, citado por PNUD 2012) indican que la segunda fuente no impacta de forma significativa en los cañaverales costarricenses, aun cuando el Inventario así lo señale; para ello, se fundamenta en las investigaciones realizadas en otros países sobre el tema.

Respecto los datos del Inventario del año 2005, el cultivo de caña de azúcar emitió aproximadamente el 3,34% del óxido nitroso generado por el sector agropecuario y aproximadamente 138 470 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente del sector agrícola (sin incluir al sector ganadero), lo cual representa alrededor del 21%; además, según datos del IMN (2014a), este cultivo posee un factor de emisión de 5,41 kg N<sub>2</sub>O/ha/año.

De acuerdo con un estudio realizado por Kempkes (1998), se determinó que la quema se practicaba en un rango que iba desde el 47% en el Valle Central, hasta alrededor del 99% en el Pacífico Central y Guanacaste; siendo la misma de muy baja ejecución en las zonas cañeras Norte y Sur. Actualmente es en la Región Sur donde porcentualmente se queman más plantaciones de caña, sin embargo, es en Guanacaste la que más área quemada incorpora, ya que representa el 55% (34 514 ha) del total sembrado en el país, estimado para el 2012 en 63

316 ha (Chaves, Bermúdez y Chaves, citado por Montenegro y Chaves 2013). Sin embargo, el sector cañero ha logrado minimizar el uso de esta práctica en los últimos años, donde aún se carece de incentivos reales para seguir bajo esta premisa, que compensen de manera significativa los costos incurridos por los productores y las productoras nacionales.

Cabe destacar que la quema controlada es una práctica agrícola utilizada mayormente en la actividad cañera, la cual es determinada para un área específica y se cuentan con tecnología y procesos establecidos, que minimizan el riesgo hacia las personas y hacia el ambiente. Dicha práctica, está regulada por medio de Decreto Ejecutivo N° 23850-MAG-SP y debe solicitarse al Ministerio de Agricultura y Ganadería el permiso respectivo para realizarla, sin embargo, no existe un marco prohibitivo general, aunque sí específico si no se cumplen las condiciones solicitadas oficialmente reguladas por el decreto.

La quema es realizada debido a las múltiples ventajas que brinda, como lo es la facilidad de corta de tallos, incremento del rendimiento de la corta ya sea manual o mecánica, favorece el retoñamiento y ahijamiento, reduce la presencia de plagas e incorpora nutrimentos al suelo, entre otros, lo cual repercute directamente en una disminución de los costos de producción (Chaves y Bermúdez 2006a, 2006b, 2006c, 2006d).

Por otra parte, existen diversos factores adversos que limitan esta práctica entre los que se encuentran: la emisión de GEI, disminución de la fertilidad del suelo y su actividad microbiológica, pérdida de biodiversidad, afectación a la salud humana, además de que favorece la erosión y disminuye la calidad industrial al introducir impurezas y aumentar los costos industriales.

Como aducen Chaves y Bermúdez (2006b), el uso de esta práctica responde a diversos factores, como son la topografía, la falta de mano de obra calificada para la corta, aumento en los costos de cosecha y pérdida de competitividad, la cual se vuelve una respuesta ante estas disyuntivas que tienen las personas que producen en el campo, donde en muchas ocasiones no desean realizar la quema. Lo anterior, debido a que no se cuenta con alternativas

prácticas a la quema, pues se necesita de una política que incentive el uso de la biomasa para producción eléctrica con proyectos de cogeneración que le permitan a las empresas satisfacer su demanda de manera parcial o total, además de la agregación de valor en el uso del bagazo para las personas productoras.

Bajo la premisa de que actualmente en Costa Rica se quema aproximadamente el 50% del área cosechada de caña, se estima que se estarían emitiendo a la atmósfera 12 061 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente cada año, sin embargo, esto significa que la atmósfera está dejando de recibir la misma cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente (Montenegro y Chaves 2013). Teniendo en cuenta este panorama, no es suficiente la reducción de emisiones en los cañales, ya que las alternativas que se aporten a las personas productoras deben ser factibles técnica y económicamente. De esta manera lograr incentivar el cambio en prácticas culturales y en tecnología que permita la adaptación al cambio climático y aumentar la resiliencia a la variabilidad climática.

### **5.2.3 PRINCIPALES AFECTACIONES AL SECTOR AGROPRODUCTIVO**

Debido al crecimiento demográfico y la necesidad de satisfacer la demanda creciente de alimentos y servicios, se ha generado una fuerte presión sobre los ecosistemas naturales, por lo cual, el sector agropecuario ha sido uno de los más impactados con pérdidas y daños recurrentes y muy significativos. Lo anterior, ha sido magnificado por la alta sensibilidad climática de todos los subsectores de la agricultura y producción pecuaria, además de los modelos económicos vigentes mundialmente, afectando mayormente a las economías emergentes como lo son las de América Latina y el Caribe.

Las variaciones en la temperatura de la tierra producidas por el cambio climático pueden reducir los rendimientos de algunos de los cultivos, provocar la proliferación de malezas, plagas y enfermedades, afectar los ciclos de polinización y alterar las precipitaciones, todo lo cual constituye una amenaza para la seguridad alimentaria mundial (IICA 2012). La

alteración de los patrones climáticos afectará indudablemente la producción y la productividad agropecuaria de diferentes maneras, dependiendo de los tipos de prácticas, sistemas y período de producción, cultivos, variedades y zonas de impacto.

Aumentos en la temperatura pueden tener efectos diversos sobre el rendimiento de los cultivos, dependiendo de la ubicación y magnitud de dichos cambios. El incremento proyectado para las temperaturas puede acelerar la tasa con que las plantas liberan CO<sub>2</sub> en el proceso de respiración, resultando en una reducción de sus condiciones óptimas de crecimiento. Cuando las temperaturas sobrepasen los niveles óptimos para los procesos biológicos, los cultivos responden generalmente de forma negativa disminuyendo abruptamente su rendimiento; además cuando los suelos están húmedos, la temperatura es usualmente el factor ambiental determinante en la velocidad de germinación.

Por otro lado, la temperatura afecta muchos aspectos del crecimiento incluyendo el desarrollo de los sistemas reticulares<sup>20</sup>, la velocidad a la que absorben agua y nutrientes, el desarrollo y expansión de las hojas, la floración y el rendimiento (Aguilar 2011).

Si continúa la tendencia actual de incrementos en la magnitud de las temperaturas nocturnas, estos serán mayores que los experimentados por las diurnas máximas (IPCC 2001, Aguilar *et al* 2005, citados por Aguilar 2011); además, el estrés causado en el día a los cultivos podría ser menos severo que otros efectos, pero los rendimientos potenciales podrían reducirse debido al aumento de la tasa de respiración. Asimismo, las temperaturas altas provocarían un desarrollo fisiológico acelerado, resultando en una maduración prematura y en reducciones en los rendimientos.

El efecto combinado de la aceleración en la transpiración de las plantas y del aumento de los niveles de evaporación del agua que se almacena en la superficie del suelo o agua edáfica, debido al incremento de la temperatura y de los cambios proyectados en la lluvia total

---

<sup>20</sup> Los sistemas reticulares son numerosos haces vasculares o nervios, que presentan una continuidad con el sistema vascular del tallo y se encuentran en el mesófilo de la planta (Raven *et al.* 1992).

estacional o en su patrón de variabilidad, podrían modificar las tasas de escorrentía<sup>21</sup> y reducir la capacidad de almacenamiento de humedad en la tierra (Aguilar 2011).

Con respecto a las precipitaciones, se ha observado un crecimiento en la intensidad y variación en los periodos de lluvia, pero a la vez una disminución en la cantidad de días lluviosos, mostrando en algunos países señales de reducciones en el volumen de lluvia total. Como un efecto colateral y aunado a las modificaciones de los patrones de precipitación con diferencias regionales significativas, se han intensificado los patrones hidrológicos, de modo que llueve más en regiones de alta precipitación y menos en regiones áridas, lo cual aumenta la frecuencia de inundaciones y sequías (IPCC 2007).

Se estima que, en la mayoría de los cultivos, el agua evapotranspirada durante su desarrollo representa más del 95% del consumo de este elemento (Palacios, citado por Cárdenas y Cárdenas 2009). Los cultivos pueden manifestar deficiencias hídricas, en especial a las horas de máxima demanda atmosférica, cuando la absorción de agua por las raíces es insuficiente para compensar las pérdidas por transpiración.

Si este desbalance se torna muy pronunciado y se prolonga en el tiempo, genera en el cultivo una situación de estrés hídrico que afecta su funcionamiento normal. Para disminuir la intensidad del estrés hídrico durante los períodos críticos, las prácticas de manejo deberán orientarse a obtener un balance de agua más favorable para el cultivo durante esos estados (Dardanelli *et al.*, citados por Cárdenas y Cárdenas 2009).

Es por lo cual, que se estima que los principales efectos directos derivados de las variaciones en la temperatura y precipitación, serían la duración de los ciclos de cultivo, alteraciones fisiológicas por exposición a temperaturas fuera del umbral permitido, deficiencias hídricas y respuesta a nuevas concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico (Watson, citado por Villalobos y Retana 1999).

---

<sup>21</sup> Parte de la precipitación que no se evapora ni es transpirada (IPCC 2007).

Por otra parte, algunos efectos indirectos serían el aumento de parásitos, plagas y enfermedades (migración, concentración, flujos poblacionales, incidencias, entre otras), disponibilidad de nutrientes en el suelo y planificación agrícola (fechas de siembra, laboreo, mercadeo) debido a la competencia por su uso de los otros sectores de la economía (Porter, Watson, citados por Villalobos y Retana 1999).

Según las tendencias observadas para los extremos climáticos en América Central durante el período 1961-2003, se han percibido patrones de cambio en las temperaturas extremas y en los niveles mensuales de lluvia, además de la presencia de eventos climáticos extremos como huracanes más intensos.

Dichos cambios han impactado la producción agrícola, teniendo así en la región un fenómeno del ENOS con mayor frecuencia, intensidad y duración, en los últimos 40 años, asociándosele de esta manera grandes pérdidas en la agricultura y disminución de las pesquerías debido a las sequías y altas temperaturas del aire y océanos, así como el aumento de enfermedades y hospitalizaciones entre las poblaciones humanas vulnerables, principalmente debido al estrés térmico y a las enfermedades infecciosas por la ocurrencia de olas de calor y escasez de agua respectivamente.

Por otra parte, La Niña, bajo las condiciones actuales de cambio climático, presentará lluvias continuas o intensas que generan con frecuencia desbordamientos de ríos y quebradas, provocando inundaciones en tierras de uso agrícola, zonas costeras y en asentamientos humanos; así como erosión del suelo, contaminación del agua subterránea y superficial, además de daños en infraestructura, viviendas, animales y otro tipo de bienes (Aguilar 2011).

La ocurrencia de eventos climáticos extremos húmedos, como tormentas o huracanes, podría causar estrés húmedo durante las fases de floración, polinización y fructificación de los cultivos, particularmente en el caso de los granos básicos como el maíz, el frijol y el trigo; además, si el nivel de precipitación anual disminuyera un 6% (Aguilar 2011), se podrían presentar situaciones de estrés hídrico y pérdidas considerables en los cultivos, dependiendo

del comportamiento mensual o estacional de las lluvias y de las temporadas y ciclos de crecimiento de los diferentes cultivos.

En la región centroamericana, dichos eventos climáticos se han intensificado en las últimas décadas, causando pérdidas y daños en el sector agropecuario, como se aprecia en el Cuadro 5.4, donde se expone el caso de los países más afectados, ya que estos fueron impactados directamente por cada uno de los eventos extremos descritos, a diferencia de Costa Rica que percibió de manera indirecta los efectos de estos.

Cuadro 5. 4

**América Central: Pérdidas del sector agropecuario por evento climático extremo, según país**

(porcentaje de la producción total)

País	Evento climático extremo				
	Huracán Mitch	Sequías (2001)	Tormenta Stan	Huracán Félix	Tormenta Agatha
Guatemala	67	55	8	-	8
Honduras	54	63	-	-	14
El Salvador	41	81	14	-	10
Honduras	19	60	-	23	-

Fuente: Elaborado a partir de datos de Aguilar (2011).

Por otra parte, otro aspecto a considerar es el contenido de CO<sub>2</sub>, ya que, según experimentos en cultivos con altos contenidos de este, el comportamiento estomático producido podría generar una economía del agua consumida por las plantas, así como un efecto fertilizante en el caso de las leguminosas (FAO, citado por Villalobos y Retana 1999). Además, un incremento en la concentración del CO<sub>2</sub>, aumentaría directamente la tasa de fotosíntesis y la producción de biomasa de las plantas C<sub>3</sub>, con cambios poco significativos en las plantas C<sub>4</sub>, como el maíz, sorgo y caña de azúcar (Salinger, citado por Villalobos y Retana 1999).

Las afectaciones mencionadas anteriormente, así como los efectos en el desarrollo sustentable y de las actividades antropogénicas en general, son potencialmente más significativos de acuerdo a la vulnerabilidad o al nivel al que un sistema sea susceptible ante los efectos adversos del cambio climático. Es decir, la vulnerabilidad a los impactos del cambio climático es una función de la exposición a variables climáticas, la sensibilidad a estas variables, y la capacidad adaptiva de la comunidad afectada (IPCC 2007).

El sector agrícola es altamente vulnerable a las variaciones y cambios del clima, incluyendo los cambios en la magnitud y patrones de comportamiento de las temperaturas y precipitación, olas de calor, sequías, inundaciones y otros eventos extremos. De acuerdo al Cuarto Informe de Evaluación (AR4) del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2007), la producción agrícola estará probablemente amenazada en muchas regiones y países, lo cual afectaría adversamente la seguridad alimentaria y exacerbaría la desnutrición, tal como se describe en el Cuadro 5.5.

Cuadro 5. 5

**América Latina y el Caribe: Afecciones del cambio climático por actividad agropecuaria, según país**

<b>País</b>	<b>Actividad agropecuaria</b>
Argentina	Incrementos en plagas y enfermedades agrícolas por el aumento de agentes patógenos en la Pampa. Cultivos de maíz, arroz y soja presentaría un decrecimiento en su producción. La actividad frutihortícola se vería perjudicada por la disminución en las lluvias al norte de la Patagonia.
Argentina	Producto de las olas de calor, se presenta una disminución en la producción de leche. Incremento en los rendimientos de los pastos.

Continúa...



...Continuación del Cuadro 5. 5

<b>País</b>	<b>Actividad agropecuaria</b>
Brasil	Reducciones en la productividad de los cultivos maíz y trigo, además de las áreas productivas aptas para el cultivo del café. Incrementos en plagas y enfermedades agrícolas, como el Fusarium en el trigo.
Belice	Banano, maíz, frijol y caña de azúcar (productividad y calidad), acuicultura y recursos pesqueros (daños a la infraestructura, reducción de la calidad del agua, pérdida de hábitats de los peces). Pérdidas generales en el sector agroproductor por el aumento de plagas y enfermedades agrícolas.
Bolivia	El cultivo de arroz presentaría disminuciones en su rendimiento, al igual que el cultivo del maíz. Por otra parte, el cultivo de la papa mostraría beneficios en su producción.
Chile	<p>Sector silvoagropecuario se vería afectado por motivo de disminución en la disponibilidad de agua para riego en las comunas ubicadas al norte del río Maipo (Región Metropolitana de Santiago). En términos generales, se extendería la superficie plantada de árboles frutales y plantaciones forestales en las regiones del sur del país.</p> <p>De manera complementaria, se esperan aumentos en la superficie plantada de otros tipos de cultivos en las comunas del norte del país. Las especies frutales de hojas serían las más perjudicadas porque no se cubrirían sus requerimientos de horas de frío y por su gran sensibilidad a las temperaturas elevadas. Los impactos en los árboles frutales de carozo y las vides serían de menor magnitud, ya que son menos sensibles a las variables citadas. Sin embargo, en términos agregados, los efectos serían negativos.</p>

Continúa...

... Continuación del Cuadro 5.5

<b>País</b>	<b>Cultivos principalmente afectados</b>
Colombia	Rendimientos en maíz prácticamente sin variaciones drásticas.
El Salvador	Reducción en la producción de granos básicos, ganadería y en la producción agrícola en general, por problemas de inundaciones o sequías (según la región del país), además de daños a la infraestructura productiva y reducción en la pesca mayormente artesanal.
Guatemala	Grandes reducciones en las cosechas de granos básicos (maíz, frijol, arroz), que dependen de la región y de las características de cada cultivo. Se estiman pérdidas en verduras y frutas en las partes altas; además de café, caña de azúcar y ganado.
Guyana	Decrecimiento en la producción de sorgo y arroz.
Honduras	El maíz se presenta como el cultivo que se proyecta mayormente afectado, sin embargo, se estiman pérdidas generales en el sector agrícola por terrenos afectados gravemente por inundaciones.
Perú	Acortamiento de los ciclos de crecimiento del algodón y del mango en la costa norte del Perú durante El Niño debido al incremento en el nivel de las temperaturas; además de un incremento en enfermedades producto de la presencia de hongos en maíz, papa, trigo y frijoles, debido a las lluvias intensas y la humedad.
Uruguay	Beneficios en el rendimiento en términos generales, por ejemplo, los pastos. El cultivo del arroz posiblemente se vea afectado por un aumento en la demanda del recurso hídrico poco sostenible en la Laguna de Merín, que sirve de fuente de riego para este cultivo.

Continúa...

... Continuación del Cuadro 5.5

<b>País</b>	<b>Cultivos principalmente afectados</b>
Venezuela	En las sabanas de los llanos del país, los rendimientos del maíz declinarían en gran cuantía.

Fuente: Elaborado a partir de información de Aguilar (2011), CEPAL (2010a), Cifuentes (2010), IPCC (2007)

Dada la incertidumbre que existe en la determinación de los escenarios de cambio climático, se ha observado que sus impactos son múltiples, heterogéneos entre países y subregiones, con un comportamiento no lineal, de diferentes magnitudes y muy significativos (CEPAL, citado por Aguilar 2011). De continuar los marcos de política y dinámicas socioeconómicas y ambientales vigentes, el sector agropecuario vería incrementada su vulnerabilidad climática y exacerbados los impactos adversos ante las variaciones y cambios del clima, por lo cual se evidencia la necesidad de establecer estrategias que permitan mejorar la gestión pública y privada.

### **5.2.3 CAÑA DE AZÚCAR**

Para realizar el estudio de los efectos del cambio climático sobre un cultivo específico, es indispensable conocer las principales características biológicas y fisiológicas, además de los requerimientos climáticos y fisioedáficos, en este caso, la caña de azúcar. Este cultivo se puede clasificar primeramente como una angiosperma, las cuales son plantas en las cuales los caracteres florales representan su estructura reproductiva. En ellas, las semillas se desarrollan en una estructura denominada fruto (Rojas 2010, Alexander *et al.* 1992).

La caña de azúcar se ubica taxonómicamente en el orden *Poales* y en la familia *Poaceae*. Entre sus principales características se encuentra la presencia de un rizoma subterráneo, el cual se define como un tallo horizontal que emite raíces y, a su vez, almacena alimento y da origen a nuevas hojas en la planta (Alexander *et al.* 1992).

La sistemática de las gramíneas se basa fundamentalmente en la morfología de las espiguillas, y en su disposición en inflorescencias. Una espiguilla está formada por una o más flores unidas directamente a su eje y protegidas por dos brácteas u hojas modificadas que acompañan a la inflorescencia. La inducción floral es el proceso mediante el cual las yemas de los frutales, originalmente vegetativas, sufren cambios metabólicos que las preparan para transformarse en yemas florales (Yuri *et al.* 2002).

A partir del conocimiento del cultivo, y sus requerimientos, en la presente investigación fue posible identificar las variables de estudio y, con ello, realizar un análisis econométrico de los impactos del cambio climático en la producción de la caña de azúcar, lo cual permitió obtener los resultados según los objetivos trazados.

#### **5.2.4 ECONOMETRÍA**

La econometría puede definirse como “el análisis cuantitativo de fenómenos económicos reales, basados en el desarrollo simultáneo de la teoría y la observación, relacionados mediante métodos apropiados de inferencia” (Samuelson *et al.* citado por Gujarati 2010).

Para la aplicación y el desarrollo econométrico, se requiere realizar un análisis de regresión, el cual consiste en el estudio de la dependencia de una variable (*variable dependiente*) respecto a una o más variables (*variables explicativas*) con el objetivo de estimar o predecir la media o valor promedio poblacional de la primera en términos de los valores conocidos o fijos (*en muestras repetidas*) de las segundas (Gujarati 2010).

Una variable cuyo valor está determinado por el resultado de un experimento al azar se denomina variable aleatoria. Variables aleatorias o estocásticas son las variables con distribución de probabilidad (Gujarati 2010). Por otro lado, una variable aleatoria discreta adquiere sólo un número finito (o infinito contable) de valores, mientras que una variable aleatoria continua es una variable que puede tomar cualquier valor dentro de un intervalo de valores (Gujarati 2010).

Cabe destacar que la variable dependiente puede ser afectada por diversos factores que no se consideran en el modelo de forma explícita, los cuales son representados por el término de perturbación o error “ $u$ ,” representa todos los factores (Gujarati 2010).

Para efectuar el análisis econométrico, se utilizaron modelos de regresión múltiple, los cuales establecen que la variable dependiente, o regresada,  $Y$ , depende de dos o más variables explicativas, o regresoras. Esta regresión fue realizada mediante el análisis de series de tiempo, donde estas son el conjunto de observaciones sobre los valores de una variable en diferentes momentos y dicha información debe recopilarse en intervalos regulares, ya sea diariamente, mensualmente o anualmente, entre otros (Gujarati 2010).

Se define Bondad del ajuste de la línea de regresión como un conjunto de datos, es decir, cuán “bien” se ajusta la línea de regresión a los datos (Gujarati 2010). Una de las formas para determinar dicha bondad de ajuste es mediante el coeficiente de determinación  $r^2$  (en caso de dos variables) o  $R^2$  (regresión múltiple), el cual es una medida comprendida que dice cuán bien se ajusta la línea de regresión lineal a la muestra (Gujarati 2010).

Cabe destacar que, además de realizar el análisis de la bondad de ajuste, se debe dictaminar qué tan significativos son en el modelo realizado la multicolinealidad, colinealidad, heterocedasticidad y autocorrelación. En sentido estricto, la multicolinealidad se refiere a la existencia de más de una relación lineal exacta, y colinealidad, a la existencia de una sola relación lineal (Gujarati 2010).

Con la finalidad de determinar si la multicolinealidad es significativa, se utiliza el Factor Inflacionario de la Varianza (FIV) y la Tolerancia (TOL). El FIV se define como la velocidad con que se incrementan las varianzas y covarianzas<sup>22</sup>; además de mostrar como la varianza de un estimador se infla por la presencia de la Multicolinealidad (Gujarati 2010). También se aduce que a medida que el coeficiente de correlación entre las variables regresoras, se

---

<sup>22</sup> La varianza se define como la distribución de los valores de  $X$  alrededor del valor esperado. Si se poseen dos variables,  $X$  y  $Y$ , la covarianza, se define como la media aritmética de los productos de las desviaciones de cada una de las variables respecto a sus medias respectivas.

acerca a 1, el FIV se acerca a infinito. Es decir, a medida que el grado de colinealidad aumenta, la varianza de un estimador también y, en el límite, se vuelve infinita. Si no existe colinealidad entre las variables independientes, el FIV será 1. Por lo anterior se aceptarán FIV cercanos a 1.

Generalmente, la colinealidad se encuentra estrechamente relacionada con el tamaño de la muestra. Se aduce que la micronumerosidad exacta surge cuando el tamaño de la muestra, es cero, en cuyo caso es imposible cualquier clase de estimación. La casi micronumerosidad, surge cuando el número de observaciones escasamente excede al número de parámetros o variables que se va a estimar (Goldberger, citado por Gujarati 2010).

Por otro lado, la heterocedasticidad se puede definir como la presencia de la varianza del error cuando esta es desigual o no es constante (Gujarati 2010).

Por último, el término autocorrelación se define, según Gujarati, como la “correlación entre miembros de series de observaciones ordenadas en el tiempo [como en datos de series de tiempo] o en el espacio [como en datos de corte transversal]”. En el contexto de regresión, el modelo clásico de regresión lineal supone que no existe tal autocorrelación en las perturbaciones  $u_i$ . Simbólicamente,

$$\text{cov}(u_i, u_j | x_i, x_j) = E(u_i u_j) = 0 \quad i \neq j$$

En forma sencilla, el modelo clásico supone que el término de perturbación  $u_i$ , relacionado con una observación cualquiera no recibe influencia del término de perturbación relacionado con cualquier otra observación.

Asimismo, es necesario para aceptar un modelo como válido, además de los factores mencionados anteriormente, considerar la probabilidad, la cual se define como la proporción de veces que un suceso "A" ocurrirá en ensayos repetidos de un experimento (Gujarati 2010).

## **5.3. MARCO GEOGRÁFICO**

### **5.3.1 GENERALIDADES DE LA PROVINCIA DE CARTAGO**

Cartago es la provincia tres del país, de acuerdo a la división territorial de Costa Rica, y se encuentra dividido en ocho cantones: Cartago, Paraíso, La Unión, Jiménez, Turrialba, Alvarado, Oreamuno y El Guarco, representando un 6% de la superficie total de Costa Rica y un 10,94% de la población con 502 258 personas, donde 253 204 son hombres y 249 054 son mujeres, según datos del INEC para 2011 (INEC 2016b).

Con respecto a las condiciones climatológicas, se identifica como clima tropical húmedo con una temperatura promedio anual que varía entre 12 y 20 °C y precipitaciones que fluctúan entre 2 600 y 6 000 mm anuales (TEC 2015).

La provincia de Cartago se ha caracterizado por poseer una economía predominantemente agrícola, así como por el desarrollo de la actividad ganadera para la producción de leche y el establecimiento de cultivos como la de caña de azúcar, las hortalizas y el café; sin embargo, debido a diversos factores socioeconómicos dicha oferta de productos agrícolas se ha diversificado, fomentando la producción de plantas ornamentales, especialmente las flores de corta.

Las primeras plantaciones de caña de azúcar del país se dieron en el Valle de El Guarco, las cuales se caracterizaron por ser extensiones pequeñas, básicamente para el autoconsumo, que se destinaba para la fabricación de dulce, bebidas alcohólicas como la chicha y la alimentación animal (Chaves 2010).

Según el VI Censo Nacional Agropecuario 2014, Cartago cuenta con 551 fincas que tienen caña de azúcar, con 5 201,1 hectáreas sembradas y 4 128,2 en edad de producción, representando respectivamente el 11,29%, 7,99% y 6,58% sobre los totales del país (INEC 2015b); incluyendo la producción de dulce. Entre los cantones más importantes para la

producción cañera, se encuentra Jiménez, el cual posee los distritos de Juan Viñas, Pejibaye y Tucurrique; así como el cantón de Turrialba.

### **5.3.2 GENERALIDADES DEL CANTÓN DE TURRIALBA**

Turrialba es el cantón cinco de la provincia de Cartago, con una extensión de 1 642,67 kilómetros cuadrados (Castro 2015) y se encuentra ubicado en 09° 47' 14" latitud norte y 83° 34' 03" longitud oeste; además cuenta con 12 distritos: Turrialba, La Suiza, Peralta, Santa Cruz, Santa Rosa, Santa Teresita, La Isabel, Pavones, Tres Equis, Tuis, Tayutic y Chirripó (Jiménez *et al.* 2015).

El cantón de Turrialba está ubicado entre los extremos de las cordilleras Volcánica Central y de Talamanca. Posee altitudes desde 3 329 msnm en el Volcán Turrialba, las estribaciones montañosas tienen altitudes intermedias y las del valle, son de 600 msnm. Esta diversidad de altitudes y relieves, y la cercanía al Mar Caribe, originan varios microclimas y zonas de vida específicas (Calvo, citado por Sánchez 2011). Predominan los bosques húmedos, muy húmedos y pluviales Holdridge (1978, citado por Sánchez 2011), debido a la alta precipitación y temperatura que caracteriza a la vertiente del Caribe (Hilje, citado por Sánchez 2011).

La precipitación pluvial anual, en la parte baja del Cantón de Turrialba es de 2 500 mm, en las alturas medias es de 2 500 a 4 000 mm y en la parte alta es de 2 000 mm (Jiménez, citado por Sánchez 2011). Por otra parte, la temperatura media anual es de 21,7°C, mientras que la humedad relativa presenta poca variación temporal, generalmente valores superiores a 85% durante todo el año, siendo la media anual de 87%. La evapotranspiración potencial varía desde 800 mm a 1 000 mm y es mínima durante la noche. Además, la radiación solar en marzo es mayor, lo cual concuerda con un mínimo pluviométrico y un mes transicional creciente en la temperatura (Calvo, citado por Sánchez 2011).



Con respecto a la población del cantón de Turrialba, según datos del X Censo Nacional de Población (INEC 2016), este contaba en 2010 con 72 631 habitantes, de los cuales 36 852 eran hombres y 35 779 mujeres, además, según proyecciones de población actualizadas en el 2011 por el Centro Centroamericano de Población (CCP) y el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), para 2016 la distribución poblacional del cantón es de 37 134 hombres y 36 390 mujeres, para un total de 73 524 habitantes.

En términos socioeconómicos la principal fuente laboral la constituye el sector primario, donde los cultivos más importantes son el café y la caña de azúcar. La situación socioeconómica del cantón presenta los índices más bajos de la provincia, siendo el 2000 el año que representa un punto de inflexión en su desarrollo socioeconómico, según el estudio realizado en 2008 por el Instituto de Investigación en Ciencias Económicas de la Universidad de Costa Rica (Jiménez *et al.* 2015), donde se resalta como factor principal la carencia de empleo en la zona.

Lo anterior se ve reflejado en el índice de desarrollo humano (IDH) para el cantón, en el cual nos encontramos con una disminución muy marcada en el periodo 2000-2004. Es así como mientras en el 2000 Turrialba ocupaba la posición número 20 de 81 cantones en cuanto a desarrollo humano, en el 2004 bajó hasta el número 40. La variable que explica esta caída de 20 posiciones es la que se refiere a la pérdida del poder adquisitivo (ingreso), dada la crisis de la economía local durante el período.

Comparando el IDH de Turrialba con el correspondiente a Costa Rica, Cartago y demás cantones de la provincia de Cartago, nos encontramos con la realidad preocupante de que Turrialba no sólo está por debajo de los índices nacionales y provinciales, sino que, comparado con los demás cantones de la provincia, Turrialba es el cantón con el IDH más bajo de todos (Arias 2009).

## 6. DISEÑO METODOLÓGICO

---

Se puede definir el tipo de investigación como mixto debido a que en la presente investigación se tomaron en cuenta aspectos que van desde características meramente mesurables hasta no cuantificables. Debido a lo anterior, esta investigación presenta técnicas tanto cuantitativas como cualitativas.

El enfoque cualitativo se ve reflejado en la descripción de la problemática producto del fenómeno del cambio climático, además del papel del sector agropecuario como ente emisor y receptor de gases de efecto invernadero y la descripción de las políticas generadas del sector cañero del país.

Para realizar el análisis de las estrategias y políticas vigentes sobre cambio climático en Costa Rica, se llevó a cabo la revisión bibliográfica sobre las políticas generadas en el país, así como el análisis de la gestión en el sector agropecuario ante el cambio climático. Adicionalmente se identificaron las principales acciones para abordar la adaptación y la mitigación establecidas en dichas políticas, específicamente para el sector agropecuario; además de identificar las principales acciones asociadas al cultivo de caña de azúcar.

Por otra parte, se realizó la descripción del cultivo de caña, mediante la identificación de los principales componentes climáticos y fisioedáficos que influyen en cada una de las etapas de crecimiento de la planta. Esta identificación se logró mediante la consulta de fuentes primarias y secundarias para realizar la descripción general del cultivo a nivel taxonómico, así como de la caracterización del género *Saccharum* según especie, morfología y descripción de ciclo vegetativo. Adicionalmente, se detallan los requerimientos fisioedáficos y climáticos del cultivo, así como su efecto en el crecimiento, desarrollo y maduración de la caña de azúcar, lo cual se refleja en el rendimiento agrícola y agroindustrial.

Cabe destacar además que, el presente estudio puede clasificarse como una investigación cuantitativa de casos, tal como lo aduce Lerma (2003), ya que esta profundiza en el efecto

del cambio climático en la producción de la caña de azúcar en la zona de Cartago, como una región de gran importancia en la producción de dicho cultivo en Costa Rica; específicamente se analiza el caso del Ingenio Atirro, en Turrialba, Cartago, mediante el desarrollo de modelos.

En el caso de este estudio, la población se ve representada por la producción de la caña de azúcar que produce el Ingenio Atirro y recibe de productores independientes de la zona, la cual proviene de la caña sembrada, cosechada y procesada (molida) en el cantón de Turrialba y otros cantones de la provincia de Cartago. Según datos del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), en la zafra de 1981-1982, se obtuvo una producción de 109 173 toneladas métricas de caña molida procesada y un rendimiento agroindustrial de 95,41 kg azúcar por tonelada métrica de caña; mientras que para la zafra 2015-2016, la producción fue de 63 621 toneladas métricas de caña molida y el rendimiento industrial fue de 99,01 kg azúcar por tonelada métrica de caña. Cabe destacar que el año con mayor producción para dicho periodo es de 200 415 toneladas métricas de caña molida para la zafra de 1995-1996, mientras que el menor es de 63 621 toneladas métricas de caña para la zafra 2015-2016.

Además, se utilizaron datos históricos de las variables sujetas a estudio, las cuales se encuentran comprendidas en el periodo de 1981 a 2015. Las variables de estudio son de tipo cuantitativo, de las cuales la temperatura, la radiación solar, la precipitación y la evapotranspiración son variables independientes, también conocidas como predictoras o explicativas; mientras que la producción, expresada en toneladas métricas de caña de azúcar procesada, es la variable dependiente, también conocida como variable explicada o respuesta.

La temperatura promedio ha tenido un comportamiento con pequeñas variaciones interanuales, siendo 1985 el año en que se mostró una menor temperatura mínima y media, por otra parte, 2014 se establece como uno de los años más calurosos. El comportamiento de la humedad relativa promedio ha presentado grandes fluctuaciones a lo largo del periodo de

estudio, en el cual el valor máximo corresponde a 93,7% para los años 2012 y 2013 y el mínimo 85,5% para el año 1992.

Para el caso de la precipitación, se muestran fluctuaciones importantes de un año a otro, siendo el año 2013 el que presentó una menor precipitación, con un total de 1 944,9 mm y el año 1997 el que presentó una mayor cantidad de lluvia, con un total de 3 626,0 mm. Según Chaves (citado por Chaves *et al.* 2008), la radiación solar promedio diaria mensual de la zona en la que se encuentra el Ingenio Atirro, es de 16,2 MJ/m<sup>2</sup>; no obstante, su comportamiento para el periodo en estudio presenta grandes variaciones, siendo el año 2002 el de menor radiación, con un valor de 14,4 MJ/m<sup>2</sup>, mientras que el año 1995 se caracterizó por ser el de mayor radiación, con un valor de 17,2 MJ/m<sup>2</sup>.

La recolección de la información se realizó mediante consulta a fuentes primarias, como son los registros de procesamiento y fabricación del Ingenio Atirro y el de variables climatológicas de la estación meteorológica tipo A<sup>23</sup> ubicada en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE),

La Estación Meteorológica del CATIE se encuentra ubicada en el Campus del centro en Turrialba, Costa Rica, a una altitud de 602 msnm, en las coordenadas 9° 53' Latitud Norte y 83° 38' Longitud Oeste. A 10 km del ingenio, pero no precisamente de las personas productoras que entregan caña al ingenio

la cual proporciona datos de las mediciones realizadas de temperatura y humedad relativa con valores mínimos, máximos y promedios, medidas en grados centígrados y porcentajes, respectivamente; así como precipitación y evaporación, medidas en milímetros. Para el caso de la evapotranspiración potencial (Eto), se estima mediante la evaporación del tanque

---

<sup>23</sup> Estación donde se registra la precipitación (cantidad, duración e intensidad), la temperatura (máxima y mínima), la humedad relativa, la presión atmosférica, el viento (dirección, recorrido y ráfaga máxima), la radiación solar, la evapotranspiración y las horas de sol en registro gráfico continuo. Además, observaciones directas de la evaporación y la temperatura del suelo (INEC S.F.). Las estaciones tipo B, por su parte, recopilan únicamente datos de temperatura, precipitación, velocidad y dirección de viento y humedad relativa.

evaporímetro, el cual proporciona una medida del efecto integrado de la radiación, viento, temperatura y humedad sobre el proceso evaporativo de una superficie abierta de agua (FAO 2006).

Estas variables fueron determinadas mediante la revisión bibliográfica y consulta a personas expertas en cambio climático, modelos de simulación y agroclimatología; sin embargo, su inclusión en el modelo final depende del comportamiento conjunto de los datos.

Para determinar el impacto de la variabilidad climatológica y del efecto anteriormente analizado de esta sobre el rendimiento del cultivo de la caña de azúcar; y al afectar dicha interacción al sector agro productor, se realizaron diversos análisis econométricos de Regresión Múltiple, los cuales constituyen modelos en los que la variable dependiente, o regresada,  $Y$ , depende de dos o más variables explicativas, o regresoras (Gujarati 2010). Esto se realizó a través de la técnica análisis de series de tiempo, sobre el establecimiento de un modelo estructural unidireccional, con un nivel de confianza del 90%.

La selección del modelo econométrico, para demostrar el efecto de las variables climatológicas sobre la producción agropecuaria, se realizó mediante la determinación de la bondad de ajuste, es, decir, cuán bien se ajusta la línea de regresión lineal a la muestra, mediante el coeficiente de determinación  $R^2$ . Asimismo, se determinó la significancia de las variables incluidas en el modelo econométrico propuesto.

## **7. RESULTADOS**

---

### **7.1 ANÁLISIS DE LAS ESTRATEGIAS DEL SECTOR AGROPECUARIO ANTE EL FENÓMENO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN COSTA RICA**

#### **7.1.2 GESTIÓN EN EL SECTOR AGROPECUARIO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO EN COSTA RICA**

La incertidumbre de los efectos futuros del cambio climático y sus manifestaciones actuales, aunado al efecto producido por la desorientación en las políticas públicas, que han generado patrones desordenados de ocupación, uso y transformación del suelo y de los recursos naturales, indican que el sector agropecuario presenta gran vulnerabilidad climática. Asimismo, dichas políticas han generado en varios países altos niveles de desempleo y pobreza, deterioro ambiental y emigración rural, bajas capacidades técnicas e institucionales, descoordinación interinstitucional e intersectorial e ineffectividad de la función. Bajo los marcos de política actuales, los impactos adversos del cambio climático sobre el sector agropecuario se estarían exacerbando y las estrategias de adaptación serían bajas o mal direccionadas, lo cual implicaría altos riesgos en asegurar la seguridad alimentaria y nutricional de las personas (Aguilar 2011).

A pesar de que la producción agrícola y pecuaria es clave para los países de América Latina y el Caribe, ya que produce empleo directo e indirecto, permite el suministro de alimentos, genera ingresos en los territorios rurales y contribuye a las cuentas nacionales, existen déficits importantes en la región, como lo es en el caso de la infraestructura e instalaciones agropecuarias como sistemas de riego, puentes, caminos, alcantarillas, drenajes, pozos, ambientes protegidos, muelles, centros de acopio; así como una notoria carencia de

investigación, innovación y desarrollo (IyD), transferencia de tecnologías, asistencia técnica, capacitación y crédito en materia agropecuaria (CEPAL citado por Aguilar 2011).

Los retos que enfrentan los países de la región son diversos, por lo cual se han realizado múltiples esfuerzos, que se han fomentado mediante acciones políticas vinculantes y no vinculantes, como son aquellas derivadas de las Conferencias de las Partes (COPs) e iniciativas a nivel regional como la Red de Comunicación en Cambio Climático para América Latina y el Caribe, entre otras. En ellas se plasma que los embates del cambio climático son a nivel mundial, así como las políticas que se generen para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, mientras que las estrategias deben ser adecuadas de forma regional, teniendo en cuenta la situación de cada nación.

Para el caso de Costa Rica, se definió la *Política de Estado para el Sector Agroalimentario y el Desarrollo Rural Costarricense 2010-2021* sobre cuatro pilares: Competitividad, Innovación y desarrollo tecnológico, Gestión de territorios rurales y agricultura familiar, y cambio climático y gestión agroambiental. El objetivo de este último pilar es promover los esfuerzos intersectoriales para mitigar y adaptarse al cambio climático, pues se considera que este es un fenómeno global que afectará a toda la agricultura costarricense y a las otras actividades económicas que se desarrollan en el mundo rural (SEPSA 2011).

Cabe destacar además que este pilar está subdividido en las siguientes áreas estratégicas: variabilidad y cambio climático, agrobiodiversidad, producción limpia, y manejo sostenible de tierras y otros recursos naturales (SEPSA 2011). En lo que respecta a la variabilidad y cambio climático, el sector agropecuario promueve esfuerzos intersectoriales que propician la mitigación y adaptación a la variabilidad y al cambio climático y la prevención de los riesgos asociados; así como aquellos que permiten enfrentar los retos de desarrollo productivo con nuevas condiciones agroclimáticas.

Con respecto a la gestión integral del riesgo, el sector agropecuario pretende impulsar una visión integral que considere la ejecución de acciones a través de la participación y

coordinación de la institucionalidad pública sectorial, considerando los riesgos naturales (climáticos, meteorológicos, sísmicos, volcánicos) y las amenazas que derivan de la acción de la sociedad (contaminación química a gran escala, procesos de erosión y sedimentación de suelos, riesgos asociados a microorganismos, a la combinación de eventos naturales con el colapso de grandes estructuras como edificios, represas y otros). Además, se impulsará un sistema nacional de prevención del riesgo, atención y manejo de desastres por fenómenos naturales extremos, estudios de base y sus aplicaciones sobre las diferentes vertientes de investigación en gestión de riesgos, planes regionales y locales de gestión integral del riesgo.

Otro aspecto a destacar es el trabajo a realizar en temas como gestión del conocimiento y fortalecimiento de capacidades en cambio climático, mediante programas de capacitación, información y comunicación sobre cambio climático y normativa ambiental, además de un sistema de información integral sobre variabilidad, cambio climático y gestión del riesgo que se trabajará en conjunto con el Instituto Meteorológico Nacional (IMN).

El área de agrobiodiversidad enfatiza la importancia de desarrollar estrategias y trabajos colaborativos interdisciplinarios e interinstitucionales relacionados con la conservación y uso de los recursos fitogenéticos y zoogenéticos, el establecimiento de infraestructura y equipo para la creación de bancos de germoplasma, además de la normativa sobre propiedad intelectual.

El área sobre producción limpia tiene como objetivo impulsar la producción limpia para lograr mayor sustentabilidad, modernización productiva y competitividad de las empresas, con énfasis en las pequeñas y medianas, por medio de la cooperación público-privada y la articulación de las políticas y decisiones de los diversos actores, mediante el trabajo integral de prácticas y técnicas de producción sostenible en las agro-cadenas prioritarias, dirigidas a difundir y prevenir la contaminación ambiental.

Por otra parte, en el área de manejo sostenible de tierras y otros recursos naturales, se combinan elementos de la política que son también parte integral de la gestión de territorios



rurales. Se orienta a promover, en los niveles regional y local, procesos integrales de ordenamiento y gestión territorial y procesos de producción sostenible desde un enfoque ecosistémico, sustentados en planes de acción conjuntos: agricultura-ambiente-salud.

Desde una visión holística, tanto en el país como mundialmente, se están elaborando estrategias integrales y multisectoriales, las cuales abarcan acciones para la mitigación y la adaptación ante el cambio climático, teniendo en cuenta las características de cada una de las naciones, pero con un objetivo común que permita disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, además de adaptarse al cambio y variabilidad climática.

#### **7.1.2.1 ACCIONES PARA ABORDAR LA MITIGACIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO**

El ser humano realiza acciones con el objetivo de reducir las emisiones o mejorar los sumideros de gases de efecto invernadero, es decir, desarrolla mecanismos para capturar el carbono que está siendo liberado al ambiente, lo cual es definido por el IPCC (2007) como mitigación.

A fin de dar una respuesta internacional ante el aumento creciente de las emisiones de GEI por parte de los países desarrollados, en el seno de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en 1993 se suscribió la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), la cual fue ratificada por todos los países miembros y entró en vigencia a partir de 1994. El Protocolo de Kioto (PK), fue suscrito en 1997 y entró en vigencia en 2005, lo cual constituyó un paso adelante en la implementación de la CMNUCC.

Todas las estipulaciones de la CMNUCC y las decisiones que adoptan las Conferencias de las Partes (COP), se fundamentan en tres principios: precaución, el que contamina paga y equidad; cuya aplicación integrada se expresa en el criterio de responsabilidades comunes pero diferenciadas de acuerdo a las capacidades respectivas. El objetivo último de la CMNUCC, según el Artículo 2 es "...lograr (...) la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el

sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible” (ONU 1992a).

Sin embargo, con las políticas actuales de mitigación del cambio climático y las prácticas de desarrollo sostenible, las emisiones de gases de efecto invernadero continuarán en aumento durante los próximos decenios (Cifuentes 2010), por lo cual se debe reestructurar y establecer compromisos vinculantes entre las naciones, que permitan tener efectivamente disminuciones considerables de GEI.

Para el caso de Costa Rica y como se aduce en el Plan de Acción Estrategia Nacional de Cambio Climático (MINAE 2014), se establecen acciones para la reducción de emisiones donde se destaca el uso eficiente y prácticas de conservación de energía, la utilización de biocombustibles (biodiesel, etanol, biogás), la aplicación de tecnologías y materiales más limpios y eficientes, y el manejo, reciclaje y aprovechamiento de los desechos sólidos y líquidos.

En el año 2008 se implementó la Estrategia Nacional sobre Cambio Climático, la cual cuenta a su vez con una agenda nacional que está dirigida principalmente a la adaptación y la mitigación del cambio climático. En cuanto a la mitigación, se busca lograr una economía carbono neutral, la cual favorezca la competitividad y el desarrollo sostenible; asimismo, plantea cuatro ejes transversales, métricas, desarrollo de capacidades y tecnología, sensibilización pública, educación y cambio cultural, y financiamiento. Lo anterior se realiza con la finalidad de desarrollar un sistema de información preciso, confiable y verificable, mejorar la eficacia y eficiencia de medidas de implementación, crear un cambio en los hábitos de la población y asegurar los recursos y su uso eficiente. El eje de mitigación propone reducir las emisiones de gases de efecto de invernadero según las fuentes, desarrollar sumideros de carbono, mediante la reforestación y regeneración forestal natural y el desarrollo de mercados de carbono, en el plano nacional e internacional. (IMN 2009a).

En la Primera Comunicación Nacional (IMN 2000), el país estableció que, en el sector de cambio de uso del suelo, persisten problemas para avanzar en el ordenamiento territorial, asociados a los planes reguladores y su efectiva planificación y control de las municipalidades; además se desconoce la efectividad real de los Pagos por Servicios Ambientales (PSA), ya que no cubren el costo de oportunidad de los dueños de los bosques privados. Por otra parte, en el sector agropecuario se mostraron leves avances en la educación a las personas productoras sobre el uso de agroquímicos y de abonos orgánicos, manifestando aún debilidad en el uso de fertilizantes químicos y alto rezago en investigación para el manejo de aspectos ambientales.

Entre las propuestas para el sector agropecuario, está incentivar la adopción de prácticas y tecnologías agropecuarias que reduzcan de forma integrada la emisión sostenida de metano y otros gases de efecto invernadero, mediante la creación e implementación de políticas que generen y transfieran conocimiento y tecnología a las personas productoras para ser efectuadas en las fincas agropecuarias. Por otra parte, se proponen políticas de transferibilidad de emisiones reducidas o mitigadas asociadas a nuevas áreas reforestadas, así como incentivar la sustitución de fertilizantes químicos, mediante metas de emisión por cultivo y tamaño de finca, normativa de estándares y control de emisiones (IMN 2000). Existe gran énfasis en la disminución de GEI, sin embargo, el estudio para determinar la vulnerabilidad, los efectos y los riesgos no son suficientes.

En cuanto a las propuestas para el sector cambio de uso del suelo, se promueve el pago por internalización a dueños de suelos con base en daño evitado del valor de reducción, otras externalidades ambientales y sociales positivas, además se proponen políticas de compensación y reducción, mediante iniciativas para crear transferibilidad de emisiones reducidas o mitigadas de distintos ecosistemas, así como estudios de potencial mitigación y transferibilidad a terceros deficitarios en emisiones GEI. Por otra parte, se proponen estudios para generación hidroeléctrica en bosques de áreas protegidas y el pago por emisiones

evitadas por esta vía, así como un rediseño del PSA en función de los objetivos de reducción de emisiones, incluyendo un pago por la mitigación de CO<sub>2</sub> (IMN 2000).

La Segunda Comunicación enfatiza en que las políticas creadas anteriormente en el tema de mitigación fueron concebidas como “una conjunción de áreas de interés de instituciones” (IMN 2009c) y remarca la falta de compromiso político, recursos humanos, técnicos y económicos que garanticen la implementación de una verdadera Política Nacional de Cambio Climático en concordancia con lo acordado en la CMNUCC.

El sector agropecuario presentó como objetivo principal el incentivar la adopción de prácticas y tecnologías agropecuarias que reduzcan de forma integrada la emisión de metano y otros gases de efecto invernadero. Por otro lado, en el sector del uso del suelo, se continúa con la propuesta realizada en la Primera Comunicación de implementar un pago por internalización a dueños de suelos con base en daño evitado del valor de reducción, y mitigación de emisiones de GEI diversificando por ecosistema.

La Tercera Comunicación Nacional (IMN 2014b), destaca ocho sectores claves a nivel nacional en el tema de mitigación los cuales son: energía, transporte, agropecuario, industrial, residuos sólidos, turismo, hídrico y cambio en el uso del suelo. Además, se realizó una evaluación de los objetivos alcanzados en materia de cambio climático, donde se ha detectado la necesidad de generar estrategias de adaptación y mitigación, tanto a nivel nacional como sectoriales, complementadas con la transferencia de tecnología. En cuanto a los principales resultados en mitigación se ha realizado una priorización de los sectores y subsectores, para los cuales se definen estrategias y políticas para la reducción de emisiones. En lo que respecta al sector agropecuario, los principales problemas detectados incluyen el rediseño del Programa de la Producción Agropecuaria Sostenible (PFPAS), el cual requiere una estrategia para su lanzamiento a nivel nacional, así como la formulación de políticas de producción sostenible a largo plazo y el establecimiento de sinergias para la coordinación de políticas agropecuarias y ambientales. Además, se requiere una estrategia de sensibilización hacia el

consumo de productos de origen sostenible y el desarrollo de mecanismos de financiamiento que incentiven dicha producción.

Además de realizar las Comunicaciones Nacionales, el país debe elaborar los Reportes Bienales de Actualización (BUR por sus siglas en inglés) que detalla las emisiones nacionales y las estrategias de mitigación, los cuales deben presentarse a la CMUNCC.

Dentro del marco del Plan de Acción Estrategia Nacional de Cambio Climático (MINAE 2014) se encuentra como principal proyecto la consolidación del Mercado Doméstico Voluntario de Carbono de Costa Rica; por su parte, se presenta la estrategia denominada Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de bosques (REDD+), la cual es parte de un conjunto de programas del MINAE que responden al Plan Nacional de Desarrollo y está vinculado con la Estrategia Nacional de Cambio Climático, el Plan Nacional Forestal y la Estrategia de Biodiversidad.

La estrategia REDD+ ha identificado como opciones estratégicas a ser implementadas, el integrar la captura de carbono en parques nacionales y reservas biológicas a la Estrategia REDD+, mantener y ampliar la cobertura del programa de Pagos por Servicios Ambientales, incrementar el secuestro de carbono mediante la regeneración natural y el establecimiento de plantaciones forestales para producir materia prima de consumo nacional en terrenos desprovistos de bosques, entre otros aspectos.

Las estrategias de mitigación del sector agropecuario se han enfocado principalmente en las actividades productivas de café, ganadería y caña de azúcar, en donde en los dos primeros se han establecido Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación (NAMA por sus siglas en inglés), por ser los subsectores claves en la emisión y, a su vez, en la mitigación de gases de efecto invernadero.

La Política de Estado para el Sector Agroalimentario y el Desarrollo Rural Costarricense (SEPSA 2011) establece que en materia de mitigación, se considera fundamental continuar con procesos de producción sostenible que contribuyan a mitigar la emisión de gases de

efecto invernadero (GEI) de las prácticas agrícolas, y la huella carbono, para actividades agrícolas, pecuarias, pesqueras y acuícolas, en coordinación con el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) y otras instituciones del sector y la academia, entre otros. Esta coordinación permitirá aplicar el Plan Nacional Agroalimentario de Mitigación al Cambio Climático y formular estrategias de mitigación de los efectos del cambio climático.

Además, en la Política de Estado para el Sector Agroalimentario y el Desarrollo Rural 2010-2021 se establecen sistemas de compensación a la producción sostenible como estrategia de mitigación y adaptación al cambio climático. Esta política fomenta iniciativas con enfoque ecosistémico (suelos y otros recursos), mediante el aprovechamiento de los mecanismos de compensación existentes y el desarrollo de otros nuevos que permitan un uso sostenible de los recursos naturales y contribuyan a disminuir la emisión de GEI del sector agropecuario, mediante el programa de mecanismo de incentivos carbono neutralidad, sistema de certificación C-neutral, además del Pago por Servicios Ambientales (PSA) para sistemas silvopastoriles y agroforestales.

Por otra parte, existen cultivos que poseen mayor potencial de mitigación del cambio climático, mediante la adopción de prácticas o la disminución de las quemadas controladas, como es el caso de la caña de azúcar. “Existe evidencia internacional que muestra que los suelos sembrados con caña donde se practica regularmente la quema para cosechar, presentan menores contenidos de carbono con respecto a suelos de cañaverales donde no se quema” (Montenegro y Chaves 2011).

Para la zafra 2010-2011, Montenegro y Chaves (2011) estimaron que, la actividad cañera en cada hectárea sembrada y cada año retira de la atmósfera aproximadamente 379 kg de CO<sub>2</sub>, lo cual implica que el sector cañero removió un total de 19 815 toneladas de CO<sub>2</sub> atmosférico, por lo cual los suelos sembrados con caña podrían estar capturando y fijando en promedio por hectárea y por año, cerca de 312 kg de CO<sub>2</sub>.

Por otra parte, durante la fase de cultivo, la emisión proviene del Óxido Nitroso ( $N_2O$ ) utilizado en el proceso de fertilización, por lo que su uso eficiente generaría menores emisiones de  $CO_2$  equivalente y ahorro en los costos de producción. Cabe destacar que toda medida que vaya a favor de acumular materia orgánica en el suelo y favorecer la mineralización, va a mejorar la mitigación.

Las plantaciones de caña tienen la capacidad de mitigar el cambio climático mediante la captura y fijación del carbono atmosférico, dado que poseen un mecanismo fotosintético tipo  $C_4$ , así como características y dotación estructural, anatómica y metabólica, que la convierte en un cultivo con mayor eficiencia respecto a otras (Montenegro y Chaves 2011).

De manera complementaria a la fertilización nitrogenada, la aplicación de abonos orgánicos ha permitido reducir los impactos ambientales de la producción en las fincas, dado que mejoran la capacidad de intercambio del suelo y de retención de nutrimentos, que se traduce en menos contaminación. Otra acción complementaria es la cosecha en verde, la cual genera una cantidad importante de hojarasca que queda en el cañal, que al aplicar la remanga<sup>24</sup> beneficia tanto al retoño como a la plantación que dispone de materia seca como fuente de nutrimentos, contribuyendo a reducir la cantidad de fertilizante nitrogenado que se aplica a las plantas de caña (PNUD 2012).

La producción de caña de azúcar debe buscar un manejo integral, en el cual incorporen servicios ambientales adicionales como el uso de cercas vivas que permitan mejorar el ciclo del carbono y, de esta manera, se absorba  $CO_2$  de las plantaciones de caña y de los árboles que se utilicen como cercas. Este manejo integral debe realizarse incentivando la producción cañera baja en carbono y que permita la mitigación de gases de efecto invernadero, para lo cual debería establecerse un pago por los servicios ambientales para esta actividad.

Adicionalmente, la producción de energía es uno de los principales productos derivados del funcionamiento de un ingenio azucarero, mediante la combustión del bagazo que permite la

---

<sup>24</sup> Separar la hojarasca del surco para que tener una buena brotación del retoño.

generación de energía, lo que aporta a los ingenios azucareros gran potencial de alcanzar una eficiencia energética tanto suplir sus necesidades, como cogenerar electricidad cuyos excedentes pueden ser vendidos al mercado eléctrico nacional (PNUD 2012).

Todas estas políticas y estrategias para mitigar el cambio climático deben considerar la factibilidad técnica y la viabilidad económica, donde se le debe asegurar a los productores y productoras una rentabilidad superior a la que reciben con las tecnologías y prácticas que utilizan actualmente. De esta manera, se incentiva la producción sostenible, manteniendo la visión de gestar un sector agropecuario competitivo y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

#### **7.1.2.2 ACCIONES PARA ABORDAR LA ADAPTACIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO**

Los sistemas humanos o naturales al percibir cambios en su entorno, tienden a realizar ajustes o adaptarse. En cuanto al cambio climático, la adaptación hace referencia a aquellos ajustes efectuados como “respuesta a estímulos climáticos proyectados o reales, o sus efectos, que pueden moderar el daño o aprovechar sus aspectos beneficiosos” (IPCC 2007). Por otra parte, la capacidad de adaptación o adaptabilidad se define como la capacidad de un sistema para ajustarse al cambio climático, con la finalidad de moderar los daños potenciales, así como aprovechar los efectos positivos y sobrellevar los negativos (IPCC 2007).

La adaptación al cambio climático puede ser de dos formas, autónoma o planificada. La adaptación autónoma o espontánea, es aquella que no constituye una respuesta consciente o premeditada a los estímulos climáticos, sino que es desencadenada por cambios ecológicos en los sistemas naturales o por cambios en el bienestar de los sistemas humanos. La adaptación planificada es el resultado de una decisión política deliberada y consensuada, basada en resultados obtenidos mediante el análisis científico y la observación de que las condiciones han cambiado o están a punto de cambiar, teniendo en cuenta que se deben realizar acciones estratégicas que permitan retornar, mantener o lograr el estado deseado. La



adaptación además puede ser anticipada o proactiva, cuando tiene lugar antes de que los impactos del cambio climático sean observados (IPCC 2007).

Debido a que las afectaciones son de carácter mundial, tanto las acciones de mitigación y adaptación, que conlleven a un desarrollo económico responsable ambientalmente, deben ser aplicables a las realidades económicas y sociales de cada país, donde se tome en consideración las demás problemáticas que presenta cada región, tal como la pobreza, el subdesarrollo y la marginación (Azqueta, Delacámara y Sotelsek 2006).

En virtud de los compromisos asumidos ante la CMNUCC y el Protocolo de Kioto, y sobre la base del principio de precaución, los gobiernos tienen el compromiso de adoptar estrategias, políticas y medidas de adaptación planificada, incorporándolas en el marco de políticas públicas y apoyar con acciones concretas. Para asegurar la efectividad de la adaptación, los países deberán identificar los factores generadores de riesgos y vulnerabilidades climáticas, a fin de buscar la coherencia y consistencia entre las diferentes políticas públicas, ya sea en el ámbito nacional, como en el regional e internacional. Asimismo, los marcos de política deberán asegurar la sinergia entre la adaptación y la mitigación, ya que las medidas de respuesta encaminadas a la mitigación del cambio climático, no deberían generar efectos adversos que aumenten las vulnerabilidades climáticas o conduzcan a la desadaptación de los sistemas naturales o humanos.

Dados los efectos percibidos del cambio climático, así como los escenarios no tan alentadores que brindan las proyecciones futuras, se requieren medidas adaptativas en el presente, para posicionar y redireccionar el rumbo mundial de los próximos años. Debido a lo anterior, los países de América Latina y el Caribe deberán generar estrategias basadas en las afecciones de la variabilidad climática, optimizando los recursos y esfuerzos, tomando en cuenta que la capacidad de enfrentar los impactos del cambio climático depende del desarrollo económico y del apoyo institucional de cada uno, así como de diversos factores culturales y socioeconómicos (FAO 2009), considerando que el grado de vulnerabilidad de los diferentes

sistemas expuestos, su grado de tolerancia y capacidad de adaptación climática son diferenciados.

Cabe destacar además que, a cualquier nivel o ámbito de intervención, el objetivo de una estrategia de adaptación al cambio climático debe enfocarse en modificar las tres variables que determinan el grado de vulnerabilidad climática, las cuales son la amenaza climática, la resiliencia y la capacidad de adaptación. Para tal efecto, deberá frenarse el ritmo y magnitud de la amenaza climática (mediante la mitigación de los GEI a nivel mundial) y aumentarse la resiliencia y capacidad de adaptación de los sistemas naturales y humanos (Aguilar 2011).

En el caso de Costa Rica, el eje de adaptación de la Estrategia Nacional sobre Cambio Climático (IMN 2009a), se centra en reducir la vulnerabilidad y el riesgo a los impactos del cambio climático según cada sector, para fortalecer la preparación ante desastres y la gestión del riesgo. Para ello, se requiere realizar un plan estratégico que permita evaluar la vulnerabilidad y riesgo actual y futuro del sistema, con la finalidad de identificar y priorizar las acciones de adaptación, el cual debe contemplar de forma paralela la ejecución, el monitoreo y el seguimiento.

Entre las principales acciones propuestas para el sector agropecuario, se encuentran la investigación y desarrollo, mejoramiento genético de las especies para obtener mayor resiliencia a la variabilidad climática, y manejo de los sistemas de producción considerando los pronósticos climáticos, así como la optimización del recurso hídrico mediante sistemas de drenaje y riego más eficientes.

La Primera Comunicación Nacional de Costa Rica cuenta con estudios de vulnerabilidad en los sectores: recurso hídrico, zonas costeras, agricultura y ecosistemas forestales (IMN 2000). Para la Segunda Comunicación Nacional se incluyen los sectores: salud, biodiversidad y los resultados de un estudio piloto sobre vulnerabilidad y adaptación del sistema hídrico en la zona noroccidental del Gran Área Metropolitana (IMN 2009c).

Entre las estrategias incluidas para el sector agropecuario, se proponen medidas como el manejo integrado de fincas, nuevas alternativas de producción, proyecto de riego y capacitación, drenajes o zanjales en zonas afectadas por exceso de precipitación y reciclaje de aguas. Respecto al sector forestal, se propone como medidas de adaptación la protección, reforestación y mejoramiento de paisajes degradados, reducción de la erosión mediante el aporte de material orgánico al suelo, conservación del agua y manejo de cuencas.

El gobierno costarricense estableció, a raíz de los estudios anteriores, la Estrategia de Vulnerabilidad y Adaptación, la cual tiene como objetivo: “Ser un país que a través de la identificación rigurosa de los sectores más vulnerables y la aplicación de las medidas de adaptación logre reducir los efectos adversos del cambio climático”. (IMN 2009c).

Según la Tercera Comunicación (IMN 2014b), los sectores que muestran mayores avances en el diseño e implementación de esfuerzos para adaptarse al cambio climático, son el hídrico, agropecuario, biodiversidad y energía. Entre las principales iniciativas en marcha se encuentran las relacionadas con la red de observación del clima y monitoreo de cambio climático mediante la operación de seis estaciones de monitoreo, así como la base de datos MAG-MIDEPLAN que recopila la información sobre la incidencia y el impacto de los fenómenos naturales. Además, se presenta el Programa Agua Para Guanacaste (PAPG), como una estrategia para proveer una solución a los problemas de disminución significativa de precipitación, la cual mejoraría la oferta hídrica para el consumo humano, las actividades agropecuarias y las actividades turísticas, entre otras.

La Política de Estado para el Sector Agroalimentario y el Desarrollo Rural Costarricense (SEPSA 2011) aduce que la adaptación implica la implementación de procesos para la recuperación del potencial productivo, reubicación de actividades agroalimentarias y nuevas prácticas de manejo tecnológico e infraestructura de producción, en un horizonte de mediano y largo plazo, lo que representa un cambio radical en la forma de concebir el desarrollo.

Las estrategias de adaptación a los efectos del cambio climático serán concordantes con la Estrategia Nacional de Cambio Climático y la normativa internacional; además el Sistema Integral de Prevención Fito y Zoonositaria se consolidará con base en investigación y medidas de prevención, que minimicen el impacto por las enfermedades a causa de la modificación del hábitat de los transmisores, y la expansión de virus y bacterias que inciden a escala mundial por el cambio climático, sobre las condiciones sociosanitarias y los servicios de salud pública (SEPSA 2011).

Por otra parte, entre los instrumentos que posee la política se encuentran el Programa de Planificación del Uso Agroalimentario del Territorio, el cual permitirá que las actividades productivas del sector agroalimentario se adapten a los escenarios futuros de cambio climático y variabilidad futura, para lo cual se tomará en cuenta la capacidad de uso del suelo en los diferentes ámbitos de los territorios.

Por las características intrínsecas del cultivo de caña de azúcar, este se desarrolla en grandes extensiones, lo cual agrega alta variabilidad, dispersión e incertidumbre en factores determinantes e influyentes de la producción, entre los cuales destacan las características del clima como la precipitación, temperatura, luz, viento, humedad, altitud (msnm) y ubicación geográfica de las plantaciones de caña, topografía de los terrenos sembrados, grado de fertilidad natural y condición físico-química y microbiológica de los suelos cultivados, condición y predisposición a sufrir impactos fitosanitarios, disponibilidad de componentes potencialmente influyentes y favorables o no, como por ejemplo los climáticos y edáficos, requerimiento obligado de agentes específicos ligados con la producción (nivelación, riego y/o drenaje) y potencial mecanizable, entre otros (Chaves y Chavarría 2013)

Debido a lo anterior, tanto para la fase agrícola e industrial, la planificación representa un elemento fundamental, por lo cual posee un potencial adaptativo ante el cambio climático y la variabilidad climatológica.

La ausencia o insuficiencia de nuevos materiales genéticos que puedan sustituir satisfactoriamente a las antiguas variedades introducidas décadas atrás y que, con el paso del tiempo, han perdido o disminuido significativamente su capacidad adaptativa y potencial productivo, tanto agrícola como industrial, ha limitado los rendimientos de gran cantidad de las plantaciones comerciales de caña de azúcar (Chaves et al. 2001); teniendo en cuenta que dichos procesos de selección de material genético puede tornarse lento.

Es por ello que el contar con variedades más resistentes al estrés hídrico y a la variabilidad climática, es fundamental para fortalecer la diversidad genética, y el banco de germoplasma, para lo cual es necesario mantener un proceso continuo de introducción, evaluación y selección de variedades paralelamente al mantenimiento y fortalecimiento de la línea de variedades nacionales, que permita aumentar las probabilidades de encontrar nuevas variedades para las diferentes regiones cañeras del país; ya que las condiciones de clima y suelos prevalecientes, dificultan en gran medida el poder encontrar un mayor número de variedades comerciales que sean resilientes a la variabilidad climática y a la vez generen una alta rentabilidad. (Durán y Oviedo 2012)

Por otra parte, la incorporación de materia orgánica al suelo constituye una medida adaptativa, la cual puede llevarse a cabo mediante la labranza de conservación, la cosecha de caña en verde, el uso de abonos verdes y de biofertilizantes.

La labranza de conservación es un sistema de laboreo en que la siembra se realiza sobre una superficie del suelo cubierta con residuos del cultivo anterior, con lo cual se conserva la humedad y se reduce la pérdida del mismo a causa de la lluvia y el viento. Al emplear la labranza de conservación, después de algunos años se incrementa la capacidad productiva del suelo, aumentan los rendimientos y se reducen los costos de producción, se ahorra energía, tiempo y mano de obra, se reduce la compactación del suelo, se genera mayor actividad biológica en la superficie del suelo, disminuye la proliferación de malezas, se favorece el desarrollo de las raíces de los cultivos y mejora el drenaje interno del suelo.

Además, esta práctica aporta en la retención de carbono en la materia orgánica acumulada, reduce la lixiviación de nutrientes y sustancias químicas hacia los mantos freáticos, disminuye la contaminación del agua y la erosión del suelo. (Navarro *et al.*, citado por Bravo-Mosqueda *et al.* 2012).

La cosecha de caña de azúcar en verde se presenta como una alternativa a la quema de la plantación para facilitar la recolección de los tallos, la cual permite además disminuir el uso de agua, energía eléctrica y combustible, así como incrementar el contenido de carbono, aumentando su fertilidad, lo cual promueve que con el tiempo se disminuya la dosis de fertilizante aplicado; además de conservar mayor contenido de humedad en el suelo. (Bravo-Mosqueda *et al.* 2012).

El uso de abonos verdes promueve la sustentabilidad de la producción agrícola, por lo que se puede considerar como otra medida de adaptación al cambio climático, ya que reducen las necesidades de herbicidas y pesticidas, mejoran los rendimientos de los cultivos que les siguen en rotación, conservan la humedad del suelo, son eficientes para controlar la erosión, aumentan el contenido de materia orgánica, adicionan nitrógeno, evitan la lixiviación de nutrientes, se incrementa el pH, mejoran la fertilidad del suelo y reducen la necesidad y el costo de la aplicación de fertilizantes (Bravo-Mosqueda *et al.* 2012). La incorporación de estos debe realizarse previo a la siembra o una vez establecido el cultivo de caña de azúcar, incorporando especies de leguminosas que no compitan con este, lo cual permite mejorar la fertilidad del suelo y la producción de grano para consumo humano.

Los biofertilizantes son productos a base de bacterias y hongos, viven en asociación o simbiosis con las plantas y ayudan a su proceso natural de nutrición, fijan el nitrógeno de la atmósfera, extraen nutrientes del suelo como fósforo, potasio y azufre, incorporándolos a las plantas para su desarrollo y producción. Su utilización logra beneficios económicos por acortamiento del período de los cultivos, además de ahorrar agua, plaguicidas y mano de obra, y de contribuir al aumento de la población de plantas por unidad de área y reducción de la dosis de fertilización (Acosta *et al.*, citado por Torriente 2004).

El uso de barreras vivas pueden ser utilizadas como una práctica más de adaptación del cultivo de caña de azúcar, debido a que permiten reducir la erosión hídrica, retener e infiltrar agua en el suelo o mejorar su fertilidad; además, disminuyen la velocidad del viento y evitan la erosión por el impacto de este, así como la pérdida de la humedad transpirada de la superficie de las hojas del cultivo hacia la atmósfera, permite una mayor acumulación de la humedad residual en la noche (sereno) y pueden disminuir la presencia de plagas al establecerse como una barrera física (Bravo-Mosqueda *et al.* 2012).

Otra de las prácticas agronómicas que permitan adaptar el cultivo de caña de azúcar es la optimización del recurso hídrico, mediante el aprovechamiento del agua producto de las precipitaciones y el uso eficiente de los sistemas de riego, como lo son los sistemas de aspersión o goteo; aunado a la utilización de prácticas que aumenten la capacidad de retención de agua del suelo (Bravo-Mosqueda *et al.* 2012).

El manejo integrado de plagas y enfermedades se presenta como una manera alterna de manejar los problemas fitosanitarios, el cual consiste en controlar la plaga y su proliferación hasta el umbral económico, el cual permite disminuir el uso de agroquímicos, disminuir el efecto en los rendimientos del cultivo y la calidad del producto cosechado, reducir los costos de aplicación y a la vez disminuir el impacto a la salud humana y al ambiente (Bravo-Mosqueda *et al.* 2012).

Por otra parte, una alternativa eficiente en el proceso de adaptación son los sistemas de alerta temprana, los cuales, desde una perspectiva agrícola, deben proporcionar a las personas productoras información agroclimática actualizada y en tiempo real, que permita reducir la vulnerabilidad ante los eventos climatológicos extremos, como sequías e inundaciones o eventos relacionados al cambio climático, como la proliferación de plagas o enfermedades a los cultivos. Este tipo de sistemas deben brindar información a corto, mediano y largo plazo, difundiendo pronósticos climáticos, a fin de incorporar la variabilidad climática en las actividades agropecuarias, y con esto orientar la toma de decisiones informadas que permitan adaptarse a situaciones de vulnerabilidad climática.

El éxito de las medidas adaptativas anteriormente descritas yace en llevarlas a la práctica y lograr una adecuada transferencia de tecnología y conocimientos, que logre establecer una estrategia no solamente a nivel de las personas productoras, sino del sector cañero en general, además de las instituciones gubernamentales y no gubernamentales, el sector privado, instituciones financieras e instituciones de investigación y educación como las universidades públicas y privadas.

Sin embargo, no se debe perder la perspectiva de que ninguna política o estrategia baja en emisiones será exitosa si esta no genera beneficios económicos. La rentabilidad de la producción agrícola marca la pauta sobre la aceptación de nuevas tecnologías y prácticas agrícolas. Además, la agregación de valor al producto y el aumento en la competitividad del sector agropecuario, son fundamentales para el éxito de cualquier estrategia que se desee implementar.

En el Cuadro 7.1 se recopilan las políticas presentes en el país de manera cronológica. También destaca el eje de mitigación y adaptación al cambio climático de cada una de estas y enmarca la institución encargada de llevar a cabo dicha directriz nacional.



Cuadro 7. 1

**Marco institucional de Costa Rica por institución, nombre de la política y medida de mitigación y adaptación, según año**

<b>Año</b>	<b>Institución</b>	<b>Nombre de la política</b>	<b>Eje Mitigación</b>	<b>Eje Adaptación</b>
2008	MINAE	Estrategia Nacional sobre Cambio Climático	Lograr una economía carbono neutral, la cual favorezca la competitividad y el desarrollo sostenible.	Fomentar el mejoramiento genético y la investigación y desarrollo, para obtener mayor resiliencia a la variabilidad climática, y manejo de los sistemas de producción.
2008	MINAE	Primera Comunicación Nacional	Incentivar la sustitución de fertilizantes químicos y la transferibilidad de emisiones reducidas o mitigadas asociadas a nuevas áreas reforestadas.	Vulnerabilidad en los sectores: recurso hídrico, zonas costeras, agricultura y ecosistemas forestales.

Continúa...

Continuación del Cuadro 7. 1

<b>Año</b>	<b>Institución</b>	<b>Nombre de la política</b>	<b>Eje Mitigación</b>	<b>Eje Adaptación</b>
2009	MINAE	Segunda Comunicación Nacional	Incentivar la adopción de prácticas y tecnologías agropecuarias bajas en carbono que reduzcan de forma integrada la emisión de CH <sub>4</sub> y otros GEI.	Establecer medidas como el manejo integrado de fincas, nuevas alternativas de producción, proyecto de riego y capacitación, drenajes o zanjas en zonas afectadas por exceso de precipitación y reciclaje de aguas.
2011	MAG	Política de Estado para el Sector Agroalimentario y el Desarrollo Rural Costarricense	Continuar con procesos de producción sostenible que contribuyan a mitigar la emisión de GEI de las prácticas agrícolas, y establecer sistemas de compensación a la producción sostenible.	Permitir que las actividades productivas del sector agroalimentario se adapten a los escenarios futuros de cambio climático y variabilidad futura
2014	MINAE	Tercera Comunicación Nacional	Esquema de reconocimiento de servicios ambientales Sistemas de ganadería para reducción de metano.	Recopilar información sobre la incidencia y el impacto de los fenómenos naturales relacionados con el cambio climático.

Continúa...

Continuación del Cuadro 7. 1

<b>Año</b>	<b>Institución</b>	<b>Nombre de la política</b>	<b>Eje Mitigación</b>	<b>Eje Adaptación</b>
2015	MINAE	Plan de Acción Estrategia Nacional de Cambio Climático	Disminuir las emisiones GEI del sector y mantener o aumentar la productividad de banano, caña de azúcar, café, ganado, piña y arroz inundado.	Aumentar la capacidad de los productores y productoras para adaptarse a los efectos del cambio climático y consolidar el Mercado Doméstico Voluntario de Carbono del país

La puesta en marcha de las políticas a las acciones concretas, es un reto para el sector agropecuario, ya que este posee grandes vulnerabilidades al clima y a otros agentes económicos, como los precios de los insumos. Es, por lo tanto, que este marco institucional debe acompañarse de sinergia público privadas para su debida implementación, involucrando de manera activa al sector académico. De esta manera se logra la transmisión de conocimiento de forma efectiva, donde el acompañamiento y el extensionismo son claves para establecer una agricultura sustentable y eficiente.

## 7.2 CONDICIONES GENERALES DEL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

### 7.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO

#### 7.2.1.1 TAXONOMÍA DEL CULTIVO

La caña de azúcar se ubica, taxonómicamente, en la clase *Liliopsida*. Las plantas pertenecientes a esta clase, se caracterizan por ser angiospermas que poseen un único cotiledón. La subclase *Commelinidae* comprende, en su mayoría, especies herbáceas, las cuales pueden presentar sépalos y pétalos bien definidos, o un perianto herbáceo o ausente.

Dentro de la subclase *Commelinidae*, se encuentra el orden *Poales*, en el cual se incluye la Familia *Poaceae*, la cual se caracteriza por poseer raíces principalmente fasciculadas, así como raíces adventicias. Además, poseen tallos generalmente cilíndricos y huecos, los cuales suelen ser, en su mayoría, herbáceos (Subirós 2000).

Cuadro 7. 2

#### Clasificación taxonómica de la caña azúcar

Clasificación taxonómica	
Reino	Plantae
Phyllum	Spermatophyta
Subphyllum	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Subclase	Commelinidae
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Género	Saccharum

Fuente: Elaborado a partir de información de Armenta (2007).

La caña de azúcar es una gramínea o poácea tropical perenne, con tallos gruesos y fibrosos, perteneciente al género *Saccharum*. Se caracteriza por poseer un tallo macizo de 2 a 5 metros de altura, aproximadamente, y alrededor de 6 cm de diámetro (Guerrero 1999).

Dentro del género *Saccharum*, se encuentran 5 especies: *S. spontaneum*, *S. robustum*, *S. barberi*, *S. sinensis*, *S. edule* y *S. officinarum* (Rojas y Eldin 1983), siendo la *S. officinarum* la de mayor importancia en el sector azucarero costarricense, ya que las especies cultivadas hoy en día son, en su mayoría, híbridos derivados de las combinaciones de las cinco especies, con características predominantes de la *S. officinarum* (Guerrero 1999, MAG 1991). En el Cuadro 7.3 se enuncian las principales características de las especies pertenecientes al género *Saccharum*, así como el lugar de origen de cada una de las mismas.

Cuadro 7. 3

**Descripción del género *Saccharum* por origen y características, según especie**

<b>Especie</b>	<b>Origen</b>	<b>Características</b>
<i>Saccharum officinarum</i>	Melanesia, Nueva Guinea y Nueva Caledonia	Hojas muy anchas. Ahijamiento débil, de 8 a 10 tallos muy gruesos, de 6 a 8 cm. Tallos de 4 a 5 m de longitud. Contenido de fibra del 10 al 13% del peso del tallo.
<i>Saccharum sinensis</i>	China	Cañas muy finas y fibrosas con sistema radicular muy bien desarrollado, de ahijamiento abundante pero heterogéneo. El nudo es más grueso que el entrenudo.
<i>Saccharum barberi</i>	Norte de la India	Altura media, tallos delgados, entrenudos largos y cilíndricos. Contenido bajo de sacarosa.

Continúa...

Continuación del Cuadro 7. 3

<b>Especie</b>	<b>Origen</b>	<b>Características</b>
<i>Saccharum spontaneum</i>	India	Tallos delgados, de mediana altura, entrenudos largos y rectos. No contiene sacarosa.
<i>Saccharum robustum</i>	Nueva Guinea y otras islas del Pacífico	Ancestro sexual de más cercano parentesco con la <i>Saccharum officinarum</i> . Bajo contenido sacarosa.
<i>Saccharum edule</i>	Melanesia y Nueva Guinea	Caracterizado por inflorescencias gruesas y carnosas. Morfológicamente similar a <i>Saccharum robustum</i> .

Fuente: Elaborado a partir de información de Rojas y Eldin (1983) y Subirós (2000).

### 7.2.1.2 MORFOLOGÍA DE LA PLANTA

La caña posee un sistema radicular compuesto por un robusto rizoma subterráneo, el cual se subdivide en raíces primordiales y raíces permanentes. Las primordiales son raíces ramificadas que corresponden a las raíces del esqueje original de siembra; mientras que, las permanentes, germinan a partir de los anillos de crecimiento de los nuevos brotes de la planta (Osorio 2007).

El tallo, por su parte, representa el órgano más importante de la planta, puesto que en él se da el almacenamiento de sacarosa, la cual corresponde a un 8-15% del tallo (Perafán citado por Díaz y Portocarrero 2002). Las hojas se originan en los nudos del tallo y son parte fundamental en el proceso de fotosíntesis y, por ende, en la producción de azúcares en la planta.

La flor de la caña es una inflorescencia en panícula sedosa en forma de espiga, que se presenta cuando el fotoperiodo<sup>25</sup>, la temperatura, la disponibilidad de agua, y el nivel de nutrientes en el suelo, son los óptimos para el cultivo de la caña (Osorio 2007).

### **7.2.1.3 FLORACIÓN EN LA CAÑA DE AZÚCAR**

El proceso de floración es indeseable, desde el punto de vista productivo, ya que su aparición, impide la formación de nuevos entrenudos, lo cual disminuye su rendimiento agrícola. Asimismo, la concentración de sacarosa por unidad de área será menor, debido al gasto de energía involucrado en el proceso.

Además, desde el punto de vista agronómico e industrial, el origen de la yema floral implica la formación de corcho<sup>26</sup>, lo cual involucra una reducción en el peso del tallo y en la recuperación de sacarosa en la planta. Por otro lado, se da un decrecimiento en la calidad de los jugos, debido a la aparición de yemas laterales o “lalas” (Subirós 2000).

El fotoperiodo influye directamente en la floración de la caña. Con la finalidad de que inicie el proceso de inducción floral, se requieren 10 ciclos fotoinductivos<sup>27</sup> ininterrumpidos, de aproximadamente 12,5 horas de duración lumínica, lo cual dependerá de la variedad genética (Subirós 2000).

Como aduce Subirós (2000), la temperatura, tiene un efecto directo sobre la floración, dándose una inducción máxima entre los 21 y 27° C. Si se presenta una reducción de la temperatura nocturna a los 18° C o un incremento de la temperatura diurna a los 32 ° C, se presentará una reducción de la floración.

---

<sup>25</sup>Respuesta de la planta a la duración de luminosidad diaria (Subirós 2000).

<sup>26</sup> El corcho se define como la presencia de tejido deshidratado en la parte inferior de la planta de la caña (Subirós 2000).

<sup>27</sup> Alternancia de horas de luz y de oscuridad en un día, germinación y la duración del crecimiento vegetativo (Subirós 2000).

Por otra parte, una disminución en la precipitación o en el riego, durante el mes anterior al periodo inductivo, afectará considerablemente la aparición de la yema floral en la planta.

Por último, la presencia de la inflorescencia aumentará, si las condiciones nutricionales disminuyen durante el periodo inductivo. En el caso del nitrógeno, una aplicación elevada durante el periodo crítico, implicará la reducción de la floración en la caña (Subirós 2000).

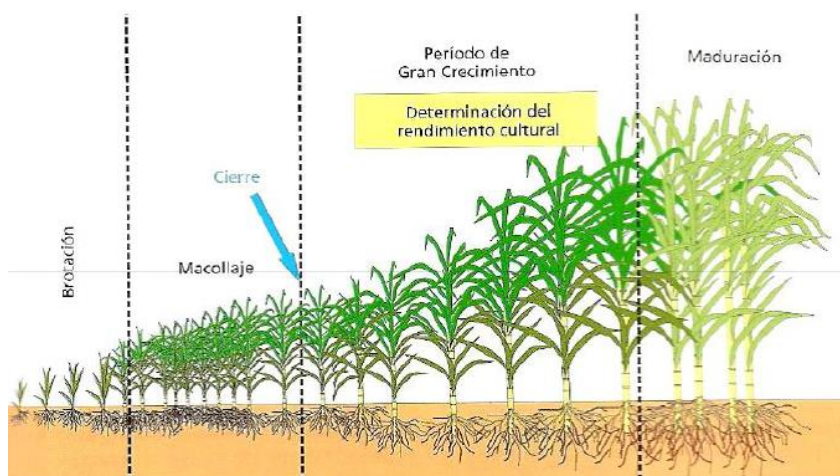
Lo anterior evidencia que las variables climáticas juegan un papel relevante en el proceso de la floración del cultivo, por lo cual la incertidumbre en las condiciones climatológicas puede incidir directamente en los rendimientos esperados y, por ende, en los flujos de caja de los productores e ingenios azucareros.

#### 7.2.1.4 CICLO VEGETATIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR

El ciclo vegetativo de la caña de azúcar está dividido en tres fases bien diferenciadas, las cuales son denominadas como el periodo de germinación o brotación, macollamiento y ahijamiento, el rápido crecimiento y la maduración (Chaves 1999b).

Figura 7. 1

#### Etapas fenológicas del cultivo de la caña de azúcar



Fuente: Hernández (2012)



La fase de germinación, macollamiento y ahijamiento, inicia con la siembra del esqueje<sup>28</sup> y finaliza con el cierre de la plantación, entre 5 y 6 meses de edad; es decir, con la cobertura realizada entre las hojas de las plantas en surcos paralelos (Chaves 1999b, Rojas y Eldin 1983).

En dicha fase, se produce la proliferación de tallos en la caña de azúcar, a partir de la germinación de las yemas del tallo primario, o macollamiento (Subirós 2000); así como el ahijamiento o reproducción vegetativa, mediante la ramificación subterránea múltiple (Hernández 2012).

Por otro lado, el rápido crecimiento comprende el periodo entre el cierre de la plantación y el comienzo de la maduración de los tallos de la caña. Se caracteriza por presentar un crecimiento acelerado, donde se da la acumulación de materia seca en la planta (Chaves 1999b).

El concepto de maduración de la caña de azúcar, puede visualizarse desde diversos enfoques, entre los cuales se encuentran el botánico, el económico y el fisiológico (Deuer, citado por Larrahondo y Villegas 1995).

El estado de maduración botánica es aquel en el que la emisión de semillas y la aparición de flores, puede originar la aparición de nuevas plantas. Por otra parte, la maduración, según el enfoque económico, es la condición en la que la caña está en condiciones para ser utilizada con un beneficio industrial, es decir, cuando la planta presenta un contenido mínimo de sacarosa y un porcentaje de sacarosa o “pol” por encima del 13%, con base en el peso total de la caña (Larrahondo y Villegas 1995).

Desde otra perspectiva, la maduración fisiológica se caracteriza por ser el estado en el que se presenta el contenido o almacenamiento máximo de sacarosa en la planta. La maduración fisiológica consta de dos periodos, el primero incluye el engrosamiento y finalización del

---

<sup>28</sup>Trozos de caña entre 40 cm y 60 cm, aptos para siembras comerciales (Ministerio del Medio Ambiente 2002)

crecimiento de los entrenudos, así como el incremento de la materia seca en la caña; mientras que el segundo consiste en la acumulación de sacarosa en los entrenudos completamente desarrollados (Clemments, citado por Larrahondo y Villegas 1995). El óptimo desarrollo y crecimiento de los entrenudos, así como la acumulación de sacarosa en los tejidos, se ven altamente influenciados por factores nutricionales, así como ambientales, entre los cuales destacan el clima, la topografía y el tipo de suelo.

En el Cuadro 7.4 se presenta la duración aproximada de cada una de las fases anteriormente mencionadas, según el ciclo que presenta dicho cultivo, el cual puede ser de 12 meses, de 14-18 meses y de 24 meses aproximadamente.

Cuadro 7. 4

**Descripción del cultivo de caña de azúcar por etapa de desarrollo, según duración del ciclo**

Duración del ciclo	Etapa de desarrollo		
	Germinación, macollamiento y ahijamiento	Rápido crecimiento	Maduración
12 meses	5-6 meses	5-6 semanas	5-6 semanas
14-18 meses	6-7 meses	6-8 semanas	6-8 meses
24 meses	9 meses	5 meses	10 meses

Fuente: Elaborado a partir de datos de Rojas y Eldin (1983).

### 7.2.1.5 REQUERIMIENTOS FISIOEDÁFICOS

La importancia del suelo en el cultivo de la caña de azúcar, radica en su capacidad de drenaje y/o inundación, así como en su contenido de materia orgánica y nutrientes, lo cual le permite a la planta un adecuado crecimiento y desarrollo.

Es preferible que los suelos sean fértiles y que no presenten deficiencias o desbalances de los minerales requeridos por la caña de azúcar; no obstante, si las condiciones físicas del suelo son adecuadas para el cultivo de la caña, estas deficiencias pueden corregirse mediante el uso de fertilizantes (Subirós 2000).

La caña de azúcar se cultiva con rendimientos óptimos en suelos con un rango de acidez o pH<sup>29</sup> de 5,5-8,2; según la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO, citado por Rojas y Eldin 1983). No obstante, la mayoría de los investigadores afirman que el nivel de acidez ideal se encuentra entre 5,5 y 6,5 (Chaves 1999b). Sin embargo, dicho cultivo puede desarrollarse bajo un pH de 4,5-8,5 (FAO, citado por Rojas y Eldin 1983, Quintero 1995). Pese a lo anterior y como indica Khanna, (citado por Osorio 2007), es preferible los suelos en condiciones básicas que los que se encuentran con mayor acidez.

Esta gramínea se desarrolla de mejor forma en suelos llanos o de pendientes suaves, no superiores al 8%, y de 0,60 a 0,80 m de profundidad (Rojas y Eldin 1983); además de requerir suelos moderadamente drenados a bien drenados (FAO, citado por Rojas y Eldin 1983). Como indica Chaves (2011), un suelo profundo con una textura adecuada, brindará un mayor sostén a la planta, así como una mayor resistencia a la fuerza ejercida por el agua en casos de anegamiento<sup>30</sup> o inundación.

Cabe destacar además que el crecimiento de la caña en suelos residuales o lomas, es menor al observado en partes planas y hondonadas; no obstante, la concentración de sacarosa obtenida es mayor (Corpoica-Sena, citado por Osorio 2007).

Por otro lado, una baja compactación de las partículas en el terreno, facilita el desarrollo del cultivo de la caña, ya que se lleva a cabo una mejor penetración del agua y del aire; además de proveer una alta resistencia a que las plantas sean arrastradas por el viento, lo cual permite

---

<sup>29</sup> Concentración presente de iones hidronio (Sirieda 1979).

<sup>30</sup> Probabilidad y frecuencia de ocurrencia de un desborde de una corriente de agua fuera de su cauce normal, y que pone en peligro las áreas aledañas (Cubero citado por Chaves 2011).

que las raíces se desarrollen de forma adecuada (Osorio 2007). Debido a ello, los suelos ideales para el cultivo de la caña son aquellos que poseen una estructura granulada y porosa, así como una gran capacidad de retención<sup>31</sup> (Rojas y Eldin 1983).

La compactación del suelo es una característica poco deseable para la agricultura. En el caso del sector cañero manifiesta una alta vulnerabilidad, tanto por condiciones naturales como por el mal manejo de las plantaciones (Chaves 2011).

El rendimiento del cultivo de la caña de azúcar, está estrechamente ligado con la productividad del suelo. El rendimiento, depende a su vez, de factores como la capacidad de retención del agua, la densidad, la porosidad y la estructura del suelo.

De acuerdo a la proporción de materia orgánica, aire, agua y las partículas del suelo o material mineral, la textura de los suelos se clasifica en arenosa (0,05-2,0 mm), limosa (0,002 y 0,05 mm) y arcillosa (< de 0,002 mm) (Chaves 2011).

Los suelos de textura franca o limosa y franco-arcillosa son los ideales para el cultivo de la caña, así como aquellos de textura de origen volcánico o aluviones<sup>32</sup> recientes (Rojas y Eldin 1983). La textura arenosa no es deseable en una condición extrema, puesto que favorece la salida de agua por su alta macro porosidad, mientras que la arcillosa la limita y la impide. Sin embargo, las arcillas poseen una superficie específica mayor y una mayor cantidad de microporos, lo cual favorece la compactación y retención del agua (Chaves 2011).

En cuanto al drenaje, la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (citado por Rojas y Eldin 1983) define que la clase óptima de drenaje para la caña de azúcar, es de moderadamente drenado a bien drenado. Según Cubero, (citado por Chaves 2011), el drenaje moderadamente excesivo, es aquel donde el agua se elimina del suelo con una rapidez moderada. La mayoría de los suelos con esta clase de drenaje poseen una textura

---

<sup>31</sup> Capacidad del suelo de retener el agua infiltrada (Nebel y Wright 1999)

<sup>32</sup> Inundaciones repentinas estacionales (Perucca y Paredes 2005).

moderadamente liviana y/o relieve ondulado. Por su parte, los suelos con drenaje bueno son aquellos que eliminan agua del suelo, mas no logran realizar con rapidez. Estos suelos usualmente poseen texturas medias; no obstante, también abarcan a los suelos arcillosos con una buena estructura.

En el Cuadro 7.5 se establecen los criterios de clasificación de los suelos en relación al cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica, según la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO, citado por Rojas y Eldin 1983).

Cuadro 7. 5

**Clasificación de los suelos por índices fisioedáficos, según sus características**

Características del suelo	Índices fisioedáficos		
	Óptimo	Marginal	Rango
Pendiente (%)	0-20	20-50	--
Profundidad (cm)	>50	10-50	--
Clase de Drenaje	Moderadamente drenado a bien drenado	--	Pobrementemente drenado a imperfectamente drenado
Textura	Franco limoso a arenoso	--	Arcillo-arenoso a Arcillas motmorilloníticas <sup>33</sup>
Fertilidad	--	Moderado	--
pH	5,5-8,2		4,5-8,5

Fuente: FAO, citado por Rojas y Eldin (1983)

<sup>33</sup> Arcilla formada por cantidades importantes de aluminio y silicio, que se combinan en presencia de óxidos de hierro y cationes, principalmente Mg<sup>++</sup> y Ca<sup>++</sup> (Collinet 1997).

La temperatura ideal del suelo para el desarrollo normal de las raíces y la toma de nutrientes varía entre 29 y 32° C. Si se presentaran temperaturas mayores a las anteriormente mencionadas, la planta podría dañarse por quema, mientras que, temperaturas menores a los 15° C, impiden que la germinación se dé en condiciones óptimas (Osorio 2007).

En Costa Rica, se han identificado siete de los órdenes de suelo, según la clasificación taxonómica del USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), como cultivados con caña de azúcar (Chaves y Alvarado, citado por Chaves 1999a, Chaves 2011). En orden de relevancia, los suelos cultivados con caña son: Inceptisol, Ultisol, Andisol, Vertisol, Entisol, Molisol y Alfisol (Chaves 1999a).

Cuadro 7. 6

**Costa Rica: Descripción de los suelos cultivados con caña de azúcar por características principales, según tipo de suelo**

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Características principales</b>
<b>Inceptisol</b>	Se forma en superficies de tierras jóvenes, fertilidad variable, común en regiones montañosas. El pH se ubica dentro de un rango aceptable. Son suelos con características poco acentuadas y poco problemáticos, que permiten una amplia gama de producción agropecuaria, como la caña de azúcar.
<b>Ultisol</b>	Diferenciado, fertilidad deficiente, deficiencia de Mg; y, algunas veces, Zn. Excelentes condiciones físicas, de estructuración y drenaje naturales.
<b>Molisol</b>	Diferenciado, con horizonte de superficie orgánica oscura gruesa, en algunos casos muestra deficiencia de P, S, Zn y Mn.

Continúa...

Continuación del Cuadro 7. 6

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Características principales</b>
<b>Vertisol</b>	<p>Alto contenido de arcilla, especialmente en pastizales de regiones estacionalmente secas. Fertilidad buena, alto contenido de Ca y Mg; y en algunos casos deficientes en K, P y Zn. Predomina el pH alto. La abundancia de arcillas expandibles ocasiona serias dificultades en el movimiento vertical del agua, por lo cual se inundan con facilidad, y al secarse forman bloques masivos que se fracturan en grandes grietas que afectan obras de infraestructura como canales de riego, cercas, postes de alumbrado, etc. La mecanización resulta una práctica dificultosa.</p>
<b>Entisol</b>	<p>Horizonte rudimentario, se forma en tierras de aluvión húmedas, buena fertilidad, presente en valles fluviales. Son los suelos con menor desarrollo, los cuales presentan poca profundidad radical, exceso de humedad, inundaciones frecuentes, y alta susceptibilidad a erosión hídrica y/o eólica.</p>
<b>Andisol</b>	<p>Profundos, de origen volcánico, buena fertilidad con riego. En ocasiones, estos suelos manifiestan deficiencia de Zn. Poseen pH ácido que oscila entre 5 y 6. Excelentes características físicas para el cultivo. Son suelos profundos, aunque esto depende de la magnitud de las deposiciones y sus colores son oscuros o pardo oscuros. Son suelos muy bien estructurados que propician el buen drenaje, pero a su vez, una buena retención de humedad.</p>
<b>Alfisol</b>	<p>Diferenciado, especialmente el horizonte de arcilla, fertilidad deficiente, presente en regiones húmedas y templadas.</p>

Fuente: Elaborado a partir de datos de USDA (2006), Berstch *et al.* (1993), Subirós (2000)

Los tipos de suelo antes mencionados, están distribuidos en diversas regiones, según el orden de importancia para el sector azucarero costarricense, tal como se muestra en el Cuadro 7.7.

Cuadro 7.7

**Costa Rica: Clasificación de los suelos cultivados con caña de azúcar por tipo de suelo según región**

(Basado en la clasificación de órdenes de suelo por USDA)

<b>Región</b>	<b>Tipo de suelo</b>
<b>Guanacaste</b>	Inceptisol, Vertisol, Molisol, Entisol, Alfisol
<b>Valle Central</b>	Andisol, Inceptisol, Alfisol
<b>Puntarenas</b>	Inceptisol, Alfisol
<b>Turrialba</b>	Ultisol, Andisol, Inceptisol
<b>San Carlos</b>	Inceptisol, Ultisol
<b>Pérez Zeledón</b>	Ultisol, Inceptisol

Fuente: Chaves (1999b)

Cabe destacar además que, si el suelo posee una buena humedad, así como suficientes nutrimentos, la producción potencial de la caña de azúcar y, por ende, de la sacarosa, se verá influenciada por el clima y sus variaciones, las características del cultivo y la concentración de dióxido de carbono presente en la atmósfera (Kropff, *et al.*, Rabbinge, citados por Díaz y Portocarrero 2002).

Dicha producción potencial podrá verse afectada por diversos factores, tales como la disponibilidad y el suministro de agua, las características del suelo, o la floración temprana. Lo anterior se define como producción obtenible, la cual podrá verse afectada a su vez, por la presencia de malezas, plagas, enfermedades y agentes contaminantes y fenómenos naturales, así como por otros factores inherentes al sistema producción (Díaz y Portocarrero 2002).



## 7.2.2 REQUERIMIENTOS CLIMÁTICOS

Las condiciones climáticas presentes en las zonas donde se cultiva la caña de azúcar, interfieren directa o indirectamente en su crecimiento, desarrollo y maduración y, por ende, en el rendimiento agrícola e industrial.

Según diversos autores (Dillewijn, Gómez, Humber, citados por Rojas y Eldin 1983), entre los principales factores climáticos que inciden en el desarrollo este cultivo, destacan la radiación solar, la temperatura, la precipitación y la humedad.

### 7.2.2.1 RADIACIÓN SOLAR

La caña de azúcar se caracteriza por ser una gramínea con el ciclo fotosintético C-4<sup>34</sup>; lo cual permite una mayor fijación del CO<sub>2</sub> en los haces vasculares<sup>35</sup> de la vaina. Por lo tanto, el brillo solar es un factor determinante en la formación de azúcares invertidos o simples, es decir, la combinación de glucosa y fructuosa, en el proceso fotosintético de la planta y, por consiguiente, en la producción de la caña.

Además, al aumentar la luminosidad, se producen tallos cortos y gruesos, así como hojas de mayor longitud y coloración más intensa (Subirós 2000; Gómez, Humber, citados por Rojas y Eldin 1983).

Debido a lo anterior, la disminución de las condiciones de luminosidad provoca una acumulación de almidones, lo cual es indeseable desde el punto de vista productivo y extracción de sacarosa (Subirós 2000). Además, dicha disminución provoca un aumento en la altura de los tallos primarios y la presencia de hojas más angostas, alargadas y quebradizas.

---

<sup>34</sup> Prolongación del ciclo de Calvin mediante un modo alternativo de fijación del carbono que forma como su producto inicial un compuesto de 4 carbonos, minimizando el costo de la fotorrespiración. (Campbell y Reece 2007)

<sup>35</sup> Tejidos de conducción de agua y nutrientes que se distribuyen a lo largo del cilindro del tallo (Subirós 2000)

### 7.2.2.2 TEMPERATURA

La variación de la temperatura incide directamente en la absorción de agua y nutrientes de la planta, así como en la formación de clorofila. Para el adecuado crecimiento de la caña de azúcar, así como para una buena germinación y macollamiento, se requiere una temperatura predominante superior a los 20 °C; encontrándose la temperatura óptima en el rango de 27-33 °C (Rojas y Eldin 1983).

La temperatura ejerce una gran influencia sobre la calidad del jugo en los períodos secos y húmedos, dándose una estimulación del almacenamiento de sacarosa cuando la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima varía entre 11 y 12°C, lo cual incrementa la productividad<sup>36</sup> del cultivo (Rojas y Eldin 1983).

Según Rojas y Eldin (1983), la asimilación cloroflica o fotosíntesis, aumenta de los 23°C a los 32°C y decrece a temperaturas superiores; mientras que la respiración máxima ocurre entre los 36°C y los 38°C. Debido a lo anterior, una temperatura superior a los 33°C, provocará un decrecimiento en la adquisición de materia seca. Por otra parte, cabe destacar que un aumento en la temperatura mínima favorece el crecimiento y desarrollo general de la planta; sin embargo, limita la fase de su maduración fisiológica (Chaves *et al.* 2008).

Desde otra perspectiva, la temperatura ideal del suelo debe situarse entre los 29 y 33°C, con la finalidad de que las raíces se desarrollen normalmente y se dé la absorción de nutrientes. Valores de temperatura superiores a los mencionados podrían ocasionar daño por quema en la planta, mientras que los inferiores inhiben el proceso de germinación de la caña (Osorio 2007).

La caña de azúcar tolera condiciones extremas de hasta 47°C, siempre que posea un riego y drenaje adecuados. Se estima que la absorción óptima de nutrientes se realiza a los 27°C, por

---

<sup>36</sup> Relación entre lo producido y los medios o insumos empleados, tales como mano de obra, materiales, entre otros (Aguilar, 2002).

lo cual temperaturas inferiores a los 21°C provocarán un rezago en el crecimiento de las raíces, paralizándose a los 10°C (Chaves 2011).

### **7.2.2.3 PRECIPITACIÓN**

El suministro de agua en el cultivo de la caña de azúcar es fundamental durante la totalidad del período de crecimiento, ya que permite la absorción de los nutrientes necesarios, así como su transporte y asimilación.

La caña de azúcar requiere grandes cantidades de agua, aunque también es relativamente eficiente en su uso, debido a su sistema fotosintético C-4. Según Subirós (2000), se requieren en promedio de 1200 a 1500 mm anuales. Sin embargo, se ha considerado que, para el cultivo de la caña en suelos franco-limosos o franco-arcillosos, se requiere de una precipitación de 1500 a 1750 mm anuales (Larrahondo y Villegas 1995).

Un manejo inapropiado del agua o el incremento en la cantidad, intensidad y frecuencia de precipitaciones en la fase de maduración, puede implicar un efecto perjudicial para el cultivo de la caña de azúcar y un impacto productivo, ya que aumentará la cantidad de materia seca al continuar su crecimiento y se reducirá la calidad del jugo (Subirós 2000).

Además, es de suma importancia considerar la topografía de los suelos sobre los cuales se encuentra la plantación, ya que esto puede determinar la capacidad de drenaje e inundación que esta posea. Una excesiva humedad en el suelo, así como las condiciones de inundación, pueden ser originadas tanto por el movimiento ascendente y acumulativo del agua, como por el movimiento descendente dado por la pendiente del terreno, lo cual ocasiona la pérdida total o arrastre de las cepas por escorrentía o fuerza del agua (Chaves 2011).

Asimismo, las condiciones de inundación generan estrés y falta de oxígeno en los tejidos o Anoxia Radicular, lo cual adicionalmente puede favorecer el desarrollo de “lalas”, el volcamiento de plantas y una inducción posterior de raíces adventicias, lo cual genera a su

vez, una afectación agroindustrial, ya que se da una disminución de los tallos industrializables y, consecuentemente, a la obtención de una menor cantidad de sacarosa.

#### **7.2.2.4 HUMEDAD**

El contenido de humedad presente en los tallos durante el período de maduración y cosecha es fundamental en la formación de azúcares en la planta, siendo la humedad interna el factor determinante para la formación de sacarosa. Además, es de suma importancia en la disolución y el transporte de las moléculas producidas durante el metabolismo, y la turgencia<sup>37</sup> de los tejidos (Larrahondo y Villegas 1995).

Conforme se desarrolla el crecimiento de la planta, se da un aumento en la demanda de agua, ya que la transpiración<sup>38</sup> en la planta aumenta. Durante el periodo de germinación, macollamiento y ahijamiento, se requiere un alto contenido de humedad, del 85 al 87%; mientras que, en el periodo de rápido crecimiento, se requiere una disminución de esta de alrededor del 78-80%, con la finalidad de promover la producción vegetal (Rojas y Eldin 1983).

No obstante, durante el periodo de maduración es necesaria una disminución de la humedad paulatinamente hasta alcanzar el 73-75%, con el fin de reducir el crecimiento y favorecer el inicio de la acumulación de sacarosa.

Además, es importante destacar que la cantidad de humedad, así como la temperatura, se relaciona estrechamente con el desarrollo de plagas y enfermedades, así como la severidad de estas. Esta observación concuerda con lo enunciado por Retana y otros investigadores (citados por Chaves 2011), quienes afirman que el desarrollo de la Rata Cañera se encuentra ligado a la variación climática.

---

<sup>37</sup> Presión ejercida por el movimiento del agua en el interior de los tejidos contra la pared celular (Vargas 2011)

<sup>38</sup> Difusión de agua a través de los estomas de la planta (Alexander *et al.* 1992)

En el Cuadro 7.8, se definen los requerimientos climáticos de la caña de azúcar, según el periodo de su ciclo vegetativo.

Cuadro 7. 8

**Descripción del cultivo de la caña de azúcar, por periodo del ciclo vegetativo, según requerimientos climáticos**

Requerimientos climáticos	Periodo del ciclo vegetativo		
	Germinación, macollamiento y ahijamiento	Rápido crecimiento	Maduración
Luminosidad	Alta	Alta	Alta
Temperatura	Alta, constante 30-32°C	Alta, constante 30-32°C	Baja, gran diferencia entre máxima y mínima
Humedad	80-85% en la planta, 75% en el suelo	78-80% en la planta, 66% en el suelo	73-75% en la planta, 33% en el suelo

Fuente: Elaborado a partir de datos de Rojas y Eldin (1983)

## **7.3 MODELO ECONOMÉTRICO PROPUESTO**

### **7.3.1 MODELOS DE SIMULACIÓN PARA ANALIZAR LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR**

Entre los análisis más utilizados en el estudio del impacto del cambio climático en la agricultura, se encuentran los modelos de evaluación del impacto económico, donde se destacan los modelos de simulación de cultivos, los modelos de zonificación agroeconómica (ZAE), los modelos de función de producción y el modelo ricardiano.

Según Challinor *et al.* (citados por Ribeiro *et al.* 2009), una de las mejores formas de estudiar el impacto del cambio climático en el rendimiento de los cultivos, es mediante la aplicación de modelos de simulación, donde estos constituyen herramientas que simulan la influencia de las condiciones climáticas en el crecimiento, desarrollo y productividad de estos. Este tipo de análisis permiten generar información clave para procurar reducir los impactos ambientales y a la vez los costos de producción, minimizar los costos asociados a las pérdidas en que se pueda incurrir debido a la variabilidad climática y disminuir la vulnerabilidad ante el cambio climático.

Los modelos de simulación de cultivos se basan en la experimentación, donde se controlan los factores y se simulan diferentes climas y niveles de CO<sub>2</sub>, para de esta manera observar la respuesta en los rendimientos de los cultivos a las distintas combinaciones de estas variables. Estos modelos presentan la limitante de que no consideran las medidas adaptativas empleadas por las personas productoras y, en consecuencia, sus estimaciones tenderán a ser más severas. Existen dos tipos de modelos de equilibrio parcial, el primero se basa en modelos de simulación de crecimiento de los cultivos y el segundo utiliza procedimientos econométricos (CEPAL 2011).

Por su parte, los modelos ZAE combinan aspectos de los modelos de simulación de cultivos con el análisis de decisiones de gestión de la tierra y captura los cambios en los recursos agroclimáticos, donde para su análisis, se categorizan las tierras por zonas agroecológicas y la duración del período de crecimiento se clasifica con base en la temperatura, las precipitaciones, las características del suelo y la topografía. Dichos modelos se utilizan para identificar las limitaciones medioambientales específicas de cultivos bajo diferentes condiciones de manejo e insumos. Debido a que los rendimientos potenciales alcanzables predichos a partir de modelos ZAE son generalmente mayores a los rendimientos reales actuales, tienden a sobreestimar los efectos de la adaptación (CEPAL 2011).

En el caso de los modelos de función de producción, estos se basan en el uso de funciones empíricas o experimentales para estimar la relación entre la producción agrícola y los cambios ambientales, utilizando variables explicativas como la temperatura, precipitación y el dióxido de carbono. Mendelsohn y otros (citados por CEPAL 2011), señalan que estos modelos sobrevaloran los daños asociados con el cambio climático y que, además, dichas estimaciones no contemplan las medidas adaptativas realizadas en el campo.

Los modelos ricardianos analizan las relaciones entre la capacidad agrícola, como el valor de la tierra, y las variables climáticas, por lo general la temperatura y la precipitación, utilizando datos de encuestas agrícolas o datos a nivel de país. Al medir directamente los precios agrícolas o ingresos, Mendelsohn y otros (citados por CEPAL 2011), representaron el impacto directo del cambio climático en una variedad de rendimiento de los cultivos, incluyendo el efecto de la sustitución de diferentes insumos, la introducción de diferentes actividades y otras adaptaciones posibles a diferentes climas. El modelo asume que los mercados funcionan correctamente y permite medir los impactos económicos del cambio climático sobre el valor económico de las diferentes actividades, aunque esta metodología no tiene en cuenta los cambios de precios y no puede controlar totalmente el impacto de otras variables que afectan a la renta agrícola (Mendelsohn y Dinar y Cline, citados por CEPAL 2011).

Otra de las maneras de analizar el impacto del cambio climático en la agricultura es mediante el uso de los modelos estructurales, los cuales combinan la respuesta agronómica de los cultivos y las decisiones económicas de las personas productoras, y los modelos espaciales, los cuales utilizan las diferencias observadas en la producción agrícola y en las condiciones climáticas entre países y regiones. (Adams *et al.* y Schimmelpfennig *et al.*, citados por CEPAL 2011)

Los modelos estructurales son enfoques multidisciplinarios que incorporan conceptos de diversas disciplinas con la finalidad de medir el efecto del cambio climático en la agricultura, estimando la respuesta de variedades específicas de un cultivo a diferentes condiciones climáticas establecidas o de otra índole. De esta manera facilita la incorporación de los efectos del cambio climático en el rendimiento de los cultivos, pues permite una mayor comprensión de las respuestas fisiológicas, biológicas y económicas de los cultivos ante las variaciones de las variables climáticas. Una de las fortalezas de utilizar este análisis es que permite incorporar las prácticas y medidas adaptativas; sin embargo, cuenta con la limitante de que, para realizar estudios agregados que permitan analizar grandes extensiones cultivadas u otras regiones, se requieren múltiples inferencias (Schimmelpfennig *et al.*, citado por CEPAL 2011).

Los modelos espaciales, permiten analizar estadísticamente el impacto del cambio climático en regiones geográficas específicas y con un elevado nivel de desagregación, además de que considera de forma independiente factores como la calidad del suelo, así como efectos aislados del cambio climático, lo cual no es considerado por los modelos de tipo estructural (CEPAL 2011).

Por otro lado, los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (GCMs por sus siglas en inglés), son simulaciones matemáticas de la atmósfera y el océano, que predicen la respuesta de los cultivos a las variaciones climáticas y los incrementos de los gases de efecto invernadero (CEPAL 2011), teniendo como limitante la exactitud de los resultados



observados a escala local. El Cuadro 7.9, resume los distintos modelos descritos anteriormente, así como las limitantes principales de cada uno de ellos.

Cuadro 7. 9

**Descripción de los modelos utilizados para estimar el impacto del cambio climático en la agricultura, por características y sus limitantes, según tipo de modelo**

<b>Tipo de modelo</b>	<b>Características</b>	<b>Limitante</b>
Modelos de simulación de cultivos	Se basan en la experimentación, donde se controlan los factores y se simulan diferentes climas y niveles de CO <sub>2</sub> , para observar la respuesta en los rendimientos de los cultivos.	No consideran las medidas adaptativas.
Modelos ZAE	Identifican las limitaciones medioambientales específicas de cultivos bajo diferentes condiciones de manejo e insumos.	Sobreestiman los efectos de la adaptación.
Modelos de función de producción	Estiman la relación entre la producción agrícola y los cambios ambientales.	Sobrevaloran los daños asociados con el cambio climático y no contemplan las medidas adaptativas.
Modelos ricardianos	Mide los impactos económicos del cambio climático sobre el valor económico de las diferentes actividades agrícolas.	No toma en cuenta los cambios de precios y el efecto de otras variables sobre la rentabilidad agrícola.

Continúa...

Continuación Cuadro 7.9

<b>Tipo de modelo</b>	<b>Características</b>	<b>Limitante</b>
Modelos estructurales	Estima la respuesta de variedades específicas de un cultivo a diferentes condiciones climáticas.	Se requieren múltiples inferencias para analizar grandes extensiones cultivadas.
Modelos espaciales	Analizan estadísticamente el impacto del cambio climático en regiones geográficas específicas y con un elevado nivel de desagregación.	Limita cuantificar las diferencias de adaptación debido a la variabilidad espacial.
Modelos de Circulación General de la Atmósfera (GCMs)	Predicen la respuesta de los cultivos a las variaciones climáticas y los incrementos de GEI.	Exactitud de los resultados observados a escala local.

Cabe destacar que la incertidumbre es un factor presente en este tipo de análisis, sin embargo, la experimentación y generación de modelos y escenarios climáticos, son herramientas fundamentales para conocer las posibles condiciones futuras y establecer, de esta manera, medidas de mitigación y adaptación que permitan estar mejor preparados ante la variabilidad climática y el gran reto que presenta el cambio climático a nivel mundial.

Pese a la diversidad de modelos, enfoques y análisis existentes; a nivel regional no existen suficientes estudios robustos que permitan estimar el rendimiento de la caña de azúcar, que puedan utilizarse como base para analizar el cultivo en distintas zonas productivas, respetando las características de cada zona productora; y mucho menos poder replicarlos en otros sectores con características agronómicas y condiciones climáticas similares.

### **7.3.1.1 EFECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMATOLÓGICA SOBRE EL RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR**

El clima y su variabilidad afectan a toda la economía, siendo el sector agrícola uno de los que presentan mayor vulnerabilidad, ya que este se basa en las condiciones climáticas medias de un lugar, pero es sensible a la variabilidad climática, a los valores extremos y a los cambios en los valores medios. Este efecto es distinto entre cultivos y el sistema de producción, el cual impacta a todos los eslabones de la cadena agroproductiva.

El IPCC (2001), estimó que la agricultura enfrentará nuevos desafíos en las próximas décadas, ya que si el calentamiento global es menor a un aumento de la temperatura en 2.5°C, no se espera disminución significativa de la producción total de alimentos; sin embargo, las estimaciones indican que el incremento sería mayor de 2.5 °C, por lo cual la disponibilidad de alimentos podría reducirse drásticamente a escala mundial.

Los cambios en la temperatura y la disponibilidad de agua modificarán la productividad de los cultivos en la región, en particular de aquellos que ya padecen limitaciones por motivo de estos factores.

Por otra parte, un mayor contenido de CO<sub>2</sub> atmosférico influirá también en la productividad, pero tal efecto aun no es plenamente conocido en las diferentes especies vegetales (Körner *et al.*, citado por Bravo *et al.* 2012). Para el caso de la caña de azúcar, por ser una planta tipo C4, depende más de la luz que de la presencia de CO<sub>2</sub> para desarrollarse (Salinger *et al.*, citado por Bravo *et al.* 2012); además el aumento del CO<sub>2</sub>, disminuirá la transpiración, lo que favorece el uso más eficiente del agua para este tipo de plantas. (Gregory *et al.*, citado por Bravo *et al.* 2012).

El suelo y el clima son componentes fundamentales en todas las etapas del cultivo, ya que estas condiciones deben de favorecer los procesos de germinación, desarrollo y maduración, para optimizar su producción.

Entre los factores que inciden mayormente en la producción, destacan la temperatura y la humedad, las cuales inciden directamente en la germinación y desarrollo de las plantas (Subirós 2000). La precipitación es otro componente que afecta el periodo de crecimiento, más en los países tropicales donde esta se presenta de forma heterogénea según la región y la época del año.

Por ende, el sector cañero requiere de investigaciones que profundicen el análisis de las condiciones climáticas y sus efectos en los distintos procesos de la planta, los cuales inciden directa e indirectamente en la producción de azúcar.

### 7.3.2 VARIABLES INCLUIDAS EN EL MODELO

El clima hace referencia al conjunto de los valores estadísticos promedios del tiempo atmosférico, así como su variabilidad, durante un período representativo, el cual comprende normalmente 30 años, según lo establecido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM, citado por IPCC 2007). El clima se caracteriza por diversas condiciones o propiedades de la atmósfera o variables de la superficie, como son la radiación solar, temperatura, humedad y precipitación.

Los elementos del clima anteriormente mencionados, influyen directamente en el sistema climático, es decir en la atmósfera, hidrosfera, criosfera, biosfera<sup>39</sup> y la superficie terrestre y las relaciones entre ellas. Dicho sistema evoluciona a partir de forzamientos externos, como erupciones volcánicas y variaciones solares, así como por la variabilidad climática, la cual puede ser ocasionada por procesos naturales o debido a las acciones humanas o antropogénicas (IPCC 2007).

---

<sup>39</sup> La **hidrosfera** es el componente del sistema climático que consta de superficie líquida y aguas subterráneas; mientras que la **criosfera** abarca toda la nieve y hielo situado encima y debajo de la superficie terrestre y oceánica. Por otra parte, la **biosfera** es la parte del sistema Tierra que abarca todos los ecosistemas y organismos vivos presentes en la atmósfera, en la tierra firme y en los océanos, incluida la materia orgánica muerta resultante de ellos (IPCC 2001, 2007).

Según diversas investigaciones, factores como la temperatura, la precipitación, la radiación solar y la evapotranspiración inciden en los rendimientos del cultivo de caña de azúcar. Es por esta razón que se procede a analizar los posibles efectos en el cultivo de cada una de estas variables y posteriormente estimar mediante la creación de un modelo de regresión múltiple el comportamiento en el rendimiento medido en toneladas por hectárea (t/ha).

Para realizar dicho análisis, se utilizan diversas fuentes de información las cuales permiten describir cada una de las variables; además de clasificar los años que presenten características determinantes entre cada variable según la fase del ENOS en que se encuentre, utilizando la escala de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) del Departamento de Comercio de Estados Unidos (GGW 2016).

### **7.3.2.1 TEMPERATURA**

La temperatura es definida por la Organización Mundial de Meteorología (OMM 2009), como “la condición que determina la dirección del flujo neto de calor entre dos cuerpos”. Es decir, la temperatura es una propiedad que determina si un objeto se encuentra en equilibrio térmico con otro cuerpo, el cual es alcanzado mediante las transferencias de calor durante un tiempo determinado.

Para la caña de azúcar, este factor es clave en todas las etapas del cultivo, ya que esta afecta la absorción de agua y nutrientes por la planta, limitando o acelerando su crecimiento y desarrollo. En las zonas subtropicales, las bajas temperaturas en el invierno se reducen casi totalmente, incidiendo en el crecimiento de la planta debido a que afecta la formación de la clorofila y la absorción de nitrógeno y potasio, aun cuando los niveles de estos nutrientes son adecuados en el suelo.

En condiciones tropicales, la temperatura tiene su mayor efecto sobre la calidad del jugo en períodos secos, cuando la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima varía entre 11 y 12°C (Larrahondo y Villegas 1995), lo cual estimula el almacenamiento de sacarosa. En las épocas lluviosas esta oscilación es menor y los rendimientos decrecen.

Se espera que, si las temperaturas mínima y promedio disminuyen, y aumenta la temperatura máxima, el diferencial favorezca el proceso de maduración debido a la mayor concentración de sacarosa en los tallos, pero a la vez, limita en algún grado la germinación, retoñamiento, ahijamiento y crecimiento en momentos específicos, afectando el tonelaje alcanzado, como evidenció el estudio realizado en Costa Rica, por Chaves y otros investigadores (2008). Para ese caso, la pérdida de tonelaje de caña fue compensada en grado variable y relativo, aunque importante, por la mayor concentración de sacarosa recuperada en los tallos, particular y especialmente en la Vertiente Atlántica donde fue muy elevado

Los incrementos en la temperatura aumentarán la evapotranspiración del cultivo, por tanto, acrecentarán las necesidades de riego en algunas áreas, además de acortar los ciclos de cultivo, y, en consecuencia, disminuir la capacidad de concentración de sacarosa y la humedad del suelo. Ante el aumento de la temperatura mínima, la caña de azúcar puede presentar problemas de maduración, el cual afectará directamente la acumulación de sacarosa, reduciendo el tonelaje de caña. (López *et al.* 2009 y Chaves *et al.* 2008)

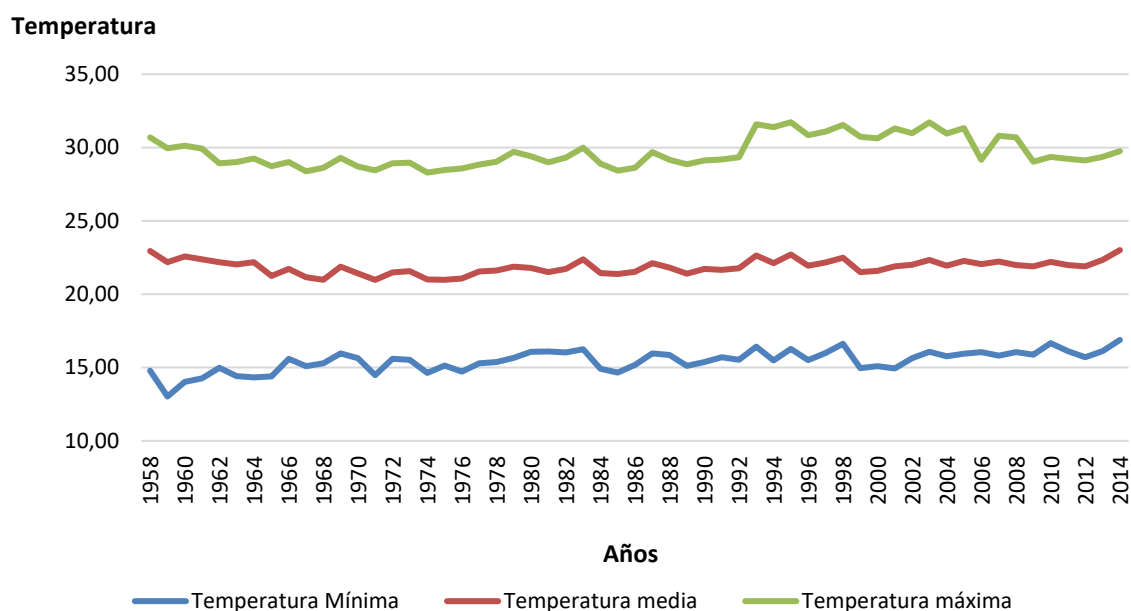
El cambio climático afectará la producción de caña de azúcar en diversos aspectos, entre los cuales se destaca la proliferación de plantas arvenses o malas hierbas, ya que el cultivo deberá competir por nutrimentos debido al aumento en las temperaturas. Por otro lado, las condiciones ideales para la maduración fisiológica de la caña se pueden alterar en forma desfavorable por las altas temperaturas, ya que tener fotoperíodos cortos posteriores a fotoperíodos largos, aceleran la fase reproductiva y presentan niveles freáticos altos como consecuencia de lluvias abundantes, riegos frecuentes y malos drenajes (Abarca, s.f).

El gráfico 7.1 muestra el comportamiento máximo, mínimo y promedio medido por la estación experimental ubicada en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), el cual representa las condiciones de temperatura en que el cultivo de caña de azúcar ha sido expuesto durante el periodo de 1985 a 2014 en la zona de Turrialba.

Gráfico 7. 1

**Turrialba: Temperatura mínima, promedio y anual según año, 1958-2014**

(en grados centígrados)



Fuente: Elaborado a partir de datos de la estación meteorológica del CATIE.

Los años que presentan mayor temperatura máxima son: 1995 (Niña), 2003 (fase neutra), 1993 (fase neutra), 1998 (Niña) y 1994 (Niño); donde se puede apreciar que dos de los cinco años con mayor temperatura máxima son Niña y otros dos están en fase neutra. Por otra parte, los años que presentan mayor temperatura mínima son: 2014 (fase neutra), 2010 (Niño), 1998 (Niña), 1993 (fase neutra), y 1995 (Niño), mostrando la fase cálida del ENOS como la que ha predominado, al igual que los años con fases neutras (Retana 2000, Quiroz 2011). Sin embargo, como señala el IMN (2014 c), el comportamiento de la temperatura a nivel mundial indica que cada nuevo año Niña es tan caliente como un año Niño de 10 a 15 años antes, lo cual se puede considerar como una señal o influencia del calentamiento global en los eventos fríos del ENOS y podría explicar en gran parte el comportamiento de esta variable medida en la serie de datos tomados de la estación experimental del CATIE.

Con respecto a la temperatura promedio, los años más calientes fueron: 2014 (fase neutra), 1958 (Niño), 1995 (Niño), 1993 (fase neutra) y 1960 (fase neutra).

### **7.3.2.2 PRECIPITACIÓN**

La precipitación se define como la caída del valor de agua contenido en la atmósfera a la superficie terrestre, ya sea en forma líquida o sólida.

Los patrones de lluvia se han modificado sustancialmente, lo que dificulta la toma de decisiones en la agricultura, pues la incertidumbre de las tendencias es cada vez mayor, razón por la cual la base climática conocida dejó de ser confiable y por ello utilitaria para ese fin, lo cual se intensificó aún más por la presencia del cambio climático. Dichos cambios se presentan en duración e intensidad, pues en algunos casos se han detectado periodos de lluvias más cortos, pero con mayor cantidad de milímetros por día y en otros casos disminuciones en la cantidad de precipitación anual.

Una valoración de la información lluviosa regional disponible demuestra que la distorsión de los patrones se da no solamente por el aumento de la precipitación sino también por su ausencia, en una variación explicada por la presencia fluctuante del fenómeno “Niño y Niña” cada vez más corta que genera una distorsión e impacto aún menos previsible.

Para este caso en los años en que se presenta la Niña, existe un cambio en el patrón climático, aportando más lluvia en el Pacífico y sequía en el Atlántico, mientras que el Niño muestra el efecto contrario. Para el cultivo de caña de azúcar, la Niña distorsiona los patrones de germinación, retoñamiento, crecimiento y desarrollo y maduración (Chaves *et al.* 2008).

El exceso de lluvias en los cañaverales, puede inundar las tierras bajas, con la consecuente pérdida de cepas, además de crear condiciones favorables para el desarrollo de plagas y enfermedades, dificultar la realización de algunas prácticas de cultivo, disminuir el contenido de sacarosa en la caña y afectar la respiración de la planta, generando un proceso de ahogamiento radicular; además del proceso de fotosíntesis y la tasa de crecimiento de la



planta. Lo anterior impacta de manera negativa la germinación, además de que las plantas presentan un deficiente retoñamiento y ahijamiento con un crecimiento vegetativo limitado y un tonelaje de caña esperable bajo (Chaves *et al.* 2008 y Bravo *et al.* 2012).

Otros de los factores que pueden ser afectados por lluvias excesivas y con mayor intensidad, son las vías de comunicación, las cuales pueden dificultar el traslado de insumos y distribución del cultivo, además de que la cosecha puede sufrir retrasos, y a la vez, aumentar el problema de erosión y la degradación por compactación de tierras al cosechar sobre suelos muy húmedos. Aun cuando la caña de azúcar requiere bastante agua, al ser un cultivo heliófilo<sup>40</sup>, necesita al mismo tiempo alta insolación; la mayor nubosidad que se asocia a una mayor precipitación, podría disminuir la concentración de azúcar, aunque la producción de tallos fuera mayor. (Bravo *et al.* 2012)

Por otra parte, el déficit en la precipitación puede reducir drásticamente el rendimiento, sobre todo si falta humedad entre el cuarto y séptimo mes posterior al corte de la caña, favorece la incidencia de plagas, aumenta la mortalidad de cepas, reduce la germinación y aumenta la concentración de sacarosa, entre otras (Bravo *et al.* 2012).

El gráfico 7.2 muestra la variación anual de la precipitación para el periodo de 1942 a 2014, en la estación experimental ubicada en el CATIE.

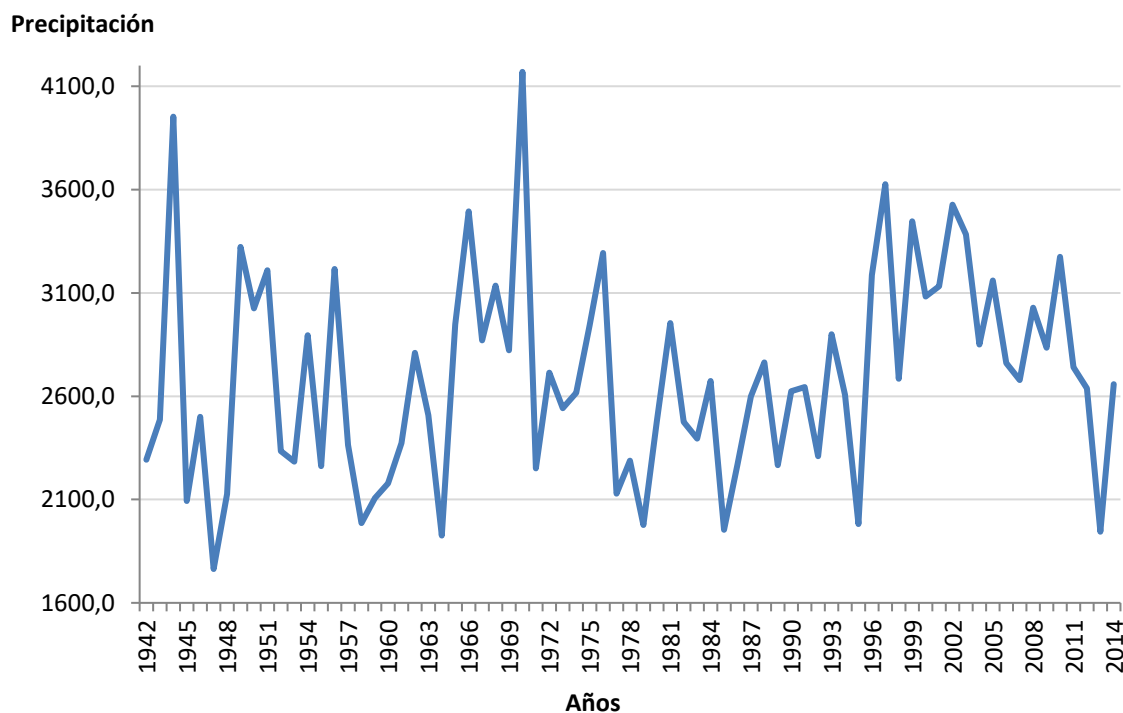
---

<sup>40</sup> Especie vegetal que exige condiciones de iluminación intensa para su óptimo desarrollo, dado que su sistema fotosintético desarrolla su máxima eficiencia a estas condiciones (Barragán 1970).

Gráfico 7. 2

**Turrialba: Precipitación total según año, 1942-2014**

(en milímetros)



Fuente: Elaborado a partir de datos de la estación meteorológica del CATIE.

Según el gráfico anterior, los años que mostraron mayor precipitación fueron 1970 (Niña), 1944 (Niño), 1997 (Niño), 2002 (Niño) y 1966 (fase neutra), teniendo a 1970 como el único que se presentó en la fase fría del ENOS (Niña). Además, cabe destacar que los años en que hubo menos precipitaciones fue en 1979 (Niño), 1985 (fase neutra), 2013 (fase neutra), 1964 (Niña) y 1947 (Niña), ocurriendo dos años Niña y dos en fase neutra, con solo 1979 de fase cálida del ENOS (Niño).

**7.3.2.3 RADIACIÓN SOLAR**

La radiación solar se define como el proceso físico mediante el cual se transmiten las ondas electromagnéticas emitidas por el Sol. Dicha radiación, conocida como radiación de onda

corta, se encuentra definida por una longitud de onda específica determinada por la temperatura del Sol (IPCC 2007).

Un factor determinante para la radiación es la nubosidad, ya que esta puede reflejar o absorber hasta un 90% de la energía que se dirige a la superficie terrestre. Por otra parte, se refiere a brillo solar como la cantidad de tiempo en que un lugar percibe radiación directa (IMN 2013).

En las plantas, la asimilación de clorofila 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 1975, citado por Arias 2008)

La luz es la fuente principal de energía para la fotosíntesis, y la caña de azúcar es uno de los cultivos que mejor la aprovecha. La disminución en la intensidad de la luz afecta directamente la fotosíntesis, el metabolismo, el crecimiento de las plantas y con ello su tonelaje de materia prima; además de una reducción en la elaboración y el almacenamiento de azúcares, y una acumulación de almidones en las hojas (Larrahondo y Villegas 1995).

Estudios realizados por Martín y Eckart (citados por Larrahondo y Villegas 1995), demostraron que, al disminuir la intensidad de la luz, conlleva a un aumento en la altura de los tallos primarios; el desarrollo de los tallos secundarios se retarda; las hojas se tornan angostas, alargadas y quebradizas, el desarrollo de las raíces se reduce; aumenta la clorofila en las hojas hasta cierto nivel y después empieza a decrecer, ocasionando una reducción en el porcentaje de materia seca.

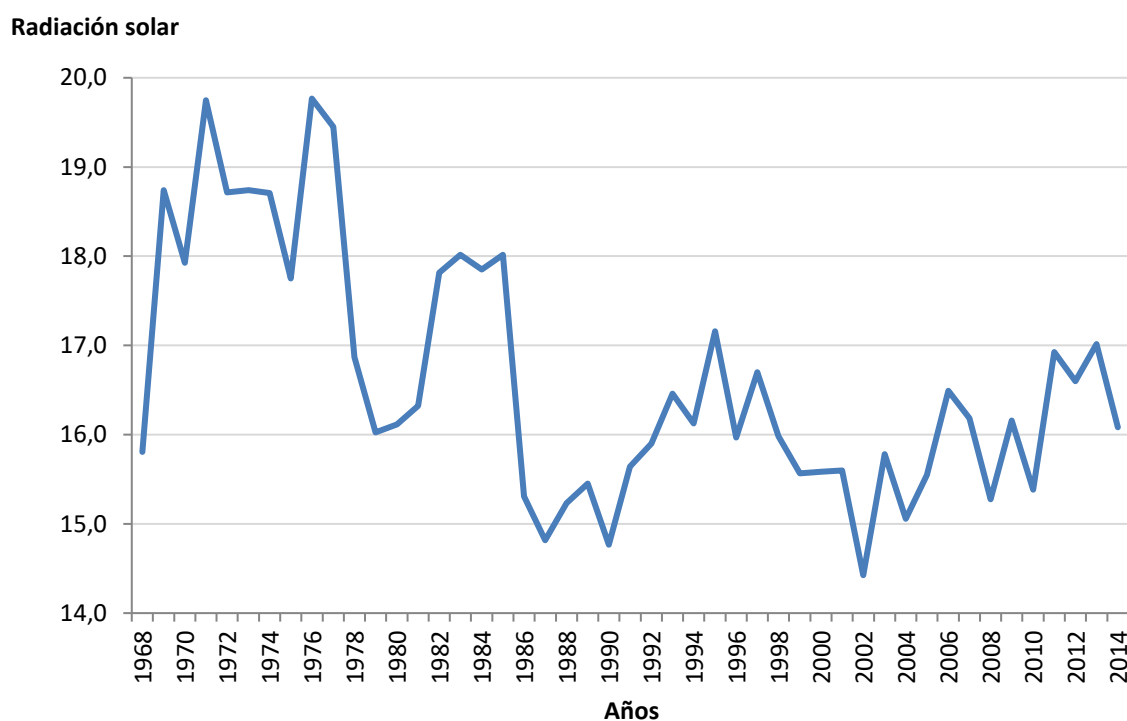
Por otra parte, Abarca (s.f.) y Chaves *et al.* (2008) aducen que una baja luminosidad afecta el proceso de fotosíntesis, crecimiento y desarrollo general de la planta, limitando el crecimiento vegetativo, aumentando la floración y presentando un bajo tonelaje de caña esperado.

La variación anual de la radiación solar para el periodo de 1968 a 2014, en la estación meteorológica del CATIE en Turrialba, se muestra en el siguiente gráfico.

Gráfico 7.3

### **Turrialba: Radiación solar promedio según año, 1968-2014**

(en megajoules por metro cuadrado)



Fuente: Elaborado a partir de datos de la estación meteorológica del CATIE.

La radiación solar promedio anual, medida en Megajoules por metro cuadrado (MJ/m<sup>2</sup>), mostró diferencias importantes donde el promedio del periodo analizado es de 16,63 MJ/m<sup>2</sup> y los años 1988 (Niño), 1996 (fase neutra), 2004 (Niño), 1987 (Niño), 1990 (fase neutra) y 2002 (Niño) son los que presentaron valores más bajos, siendo estos inferiores a la media.

Cabe destacar que los años que presentaron mayor radiación solar fueron 1976 (Niño), 1971 (Niña) y 1977 (Niño) con 19,77MJ/m<sup>2</sup>; 19,75 MJ/m<sup>2</sup> y 19,45 MJ/m<sup>2</sup> respectivamente. Por otra

parte, el promedio del periodo descrito es 3,14 MJ/m<sup>2</sup> menor al dato registrado en 1976 (Niño), pero 2,20 MJ/m<sup>2</sup> mayor a 2002, el cual presentó menor comportamiento con 14,43 MJ/m<sup>2</sup>.

#### **7.3.2.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN**

La evapotranspiración se define como la pérdida de agua a través de la superficie del suelo por evaporación, así como por la transpiración del cultivo. La evaporación consiste en el proceso mediante el cual el agua líquida se vaporiza y se retira de la superficie evaporante, mientras que la transpiración consiste en la vaporización del agua contenida en los tejidos de la planta y la remoción de esta hacia la atmósfera. La evapotranspiración se expresa en milímetros por unidad de tiempo (FAO 2006).

La evapotranspiración de referencia, por su parte, se define como la tasa de evapotranspiración o pérdida máxima de agua de una superficie cultivada de referencia, la cual ocurre sin restricciones hídricas (FAO 2006). Esta variable se simboliza como ETo y es utilizada para estimar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de su manejo.

Esta depende de parámetros climáticos, como lo son la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento, por lo cual puede ser calculada a partir de ellos, mediante la ecuación de Penman & Monteith. Dicha ecuación considera tanto la radiación como la evaporación, mas no la transpiración, mientras que la ecuación modificada o combinada considera el intercambio de energía y flujo de calor en la superficie cultivada, mediante la inclusión en el modelo de las ecuaciones encontradas para la resistencia superficial o estomática del cultivo y la resistencia aerodinámica<sup>41</sup> (FAO 2006).

---

<sup>41</sup> La resistencia superficial es la resistencia al flujo de vapor a través de las estomas, del área total de la hoja y de la superficie del suelo; mientras que la resistencia aerodinámica, consiste en la resistencia desde la superficie evaporante hacia el aire que se encuentra sobre la planta.

La evapotranspiración potencial puede estimarse además mediante la evaporación del tanque evaporímetro<sup>42</sup>, el cual proporciona una medida del efecto integrado de la radiación, viento, temperatura y humedad sobre el proceso evaporativo de una superficie abierta de agua (FAO 2006).

Para la caña de azúcar, el efecto de la evapotranspiración depende del estado en que se encuentre la planta. Cuando el cultivo se encuentra en fase de germinación, debe asegurarse la humedad en el suelo, por lo cual los periodos de siembra y la disponibilidad de agua, ya sea por lluvia o el uso de riego, son esenciales para esta etapa. Los suelos desnudos son más propensos a perder humedad que los que poseen cobertura vegetal; además de que otro aspecto a destacar es la reflexión de los suelos, pues los más húmedos reflejan menos que los suelos secos (Subirós 2000).

En la etapa de macollamiento, la evapotranspiración aumenta por el incremento del área foliar, y a la vez, la capacidad para interceptar la radiación. Además, existe un aumento en la capacidad de la planta para captar agua a mayor profundidad, debido a un mayor desarrollo de las raíces en número y profundidad.

Para el período de crecimiento, aumenta el área foliar de la planta y con ello la transpiración. Los requerimientos de agua en esta fase son mayores a las anteriores, debido a que el incremento del área foliar guarda una relación directa con la curva de evapotranspiración, los efectos negativos de estrés por humedad se verían reflejados directamente en los rendimientos del cultivo, al igual que el exceso de agua, por lo cual se debe asegurar un suministro adecuado (Subirós 2000).

---

<sup>42</sup> La evaporación del tanque está relacionada con la evapotranspiración de referencia por un coeficiente empírico derivado del mismo tanque:  $ET_o = K_p E_{pan}$ , donde,  $ET_o$  hace referencia a la evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ ),  $K_p$  es el coeficiente del tanque evaporímetro, y  $E_{pan}$  es la evaporación del tanque evaporímetro ( $\text{mm día}^{-1}$ ) (FAO 2006).

La fase de maduración, busca la reducción de la humedad en el suelo, lo cual conlleva a una reducción de la evapotranspiración, ya que la pérdida de agua se traduce en acumulación de sacarosa.

Según datos de la estación meteorológica del CATIE, la cual muestra una serie histórica desde 1968 hasta 2013, con la excepción de que no se registran los datos para el periodo de 1993 a 2005, siendo este un desfase de 12 años en medio de la serie sujeta a análisis. Debido a lo anterior es que no se muestra gráficamente dicho comportamiento histórico, sin embargo, se destaca que de los datos disponibles se puede aducir que el promedio anual de la ETo es de 93,82 mm, donde 1985 (fase neutra) y 1983 (fase neutra), poseen la mayor evapotranspiración para la serie de tiempo analizada, con 14,91 y 12,85 mm más que el valor promedio, respectivamente. Por otra parte, los años que presentaron menor ETo fueron 2009 (Niño) y 2010 (Niño), con valores inferiores a la media anual de 85,88 y 84,28 mm, respectivamente.

### **7.3.2.5 PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR**

La producción agrícola corresponde a la cantidad de materia prima producida y cosechada anualmente que, al establecer la relación que existe con el área sembrada, permite calcular el rendimiento del cultivo. Para el caso de la caña de azúcar, la producción primaria se cuantifica por las toneladas métricas de caña cosechada, la cual depende de diversos factores como son las condiciones climáticas, el material genético utilizado, el suelo, el manejo agronómico y la tecnología empleada para su producción (Chaves 1999c).

Por otra parte, la agroindustria azucarera, cuantifica la producción mediante las toneladas métricas de caña molida y el rendimiento industrial obtenido mediante los kilogramos de

azúcar por tonelada métrica de caña molida (kg/tmc), los bultos de azúcar a 96 ° de polarización<sup>43</sup> y el rendimiento de miel final medido en kilogramos de miel final producidos.

Para el caso de la zona productora de Turrialba y Juan Viñas, en la zafra 2014-2015, se produjo un total de 270 524 toneladas métricas de caña, lo cual equivale al 6,12% de la producción nacional, y 567 379 bultos de azúcar de 50 kg, producidos a 96° de polarización (Chaves, Bermúdez y Méndez, 2015). Cabe destacar que dicha zona presenta una importante variabilidad en la producción, debido a que las fincas cañeras se encuentran en un rango altitudinal que va desde los 600 a 1550 msnm, así como a la presencia de terrenos con pendientes elevadas, además de distintos patrones de lluvia, bajas temperaturas y alta humedad (Chaves *et al*, citado por Calderón 2013). Por otra parte, la región cuenta con distintas variedades cultivadas, entre las más utilizadas son: H 77-4643, B 76-259, B 77-95 y PINDAR (Chaves *et al*. 2013).

En el periodo analizado, se efectuaron variaciones en la cantidad de área sembrada por el Ingenio Atirro, debido al manejo agronómico y la edad de las plantaciones, adquisiciones de terrenos y los costos de producción; sin embargo, la tecnología empleada es la misma para todos los lotes, donde se utiliza control de malezas manualmente y, la aplicación de agroquímicos se realiza con bombas de espalda y las fuentes de agua son quebradas, acueductos y nacientes para la aplicación de riego; además de las prácticas de aporca y subsolado<sup>44</sup> (Bolaños 2015).

Para analizar la producción del cultivo, se utilizan las toneladas métricas de caña molida, con una serie histórica disponible que comprende las zafras de 1981-1982 hasta la de 2015-2016

---

<sup>43</sup> Azúcar que contiene el noventa y seis por ciento (96%) de su peso en sacarosa (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica 1998)

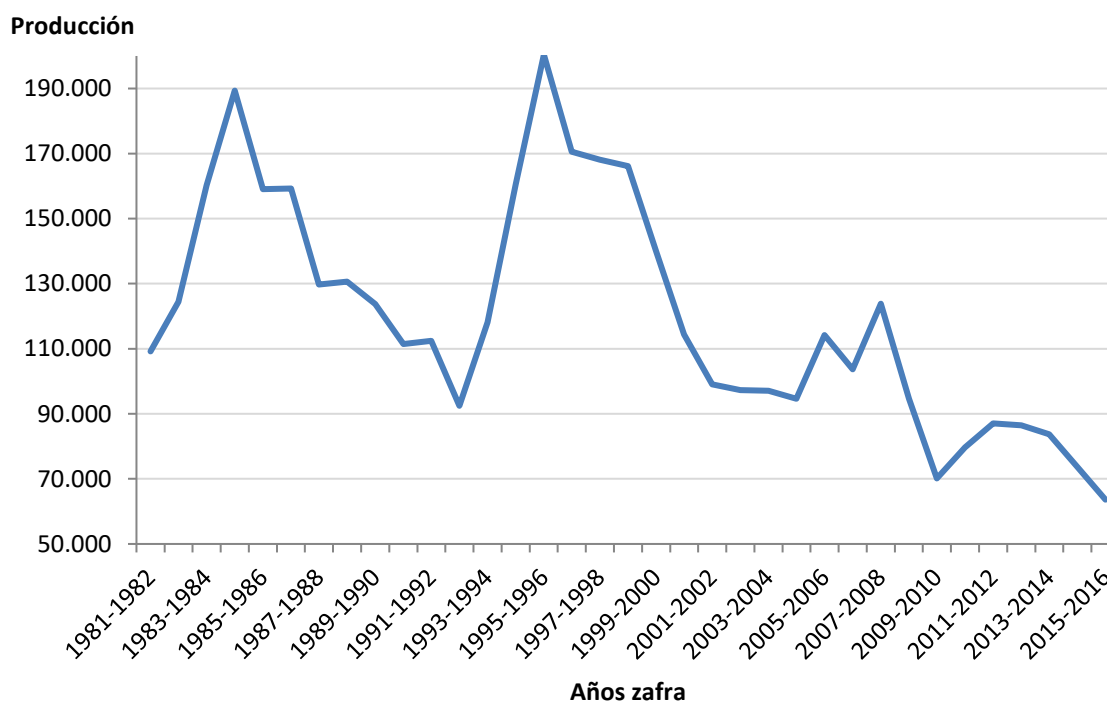
<sup>44</sup> La aporca consiste en retirar tierra del entresurco, situarla en el surco de siembra y formar el lomillo El subsolado consiste en fracturar el suelo, con el fin de destruir las capas compactadas o impermeables y, de esta manera, mejorar la estructura y facilitar el movimiento de aire y agua (Subirós 2000).



para el Ingenio Atirro y la zona de Turrialba, la cual también contempla al ingenio Juan Viñas, así como lo muestran los gráficos 7.4 y 7.5, respectivamente.

Gráfico 7.4

**Turrialba: Producción de caña de azúcar procesada en el Ingenio Atirro según año zafra, 1981-1985 a 2015-2016**



Fuente: Elaborado a partir de datos de LAICA.

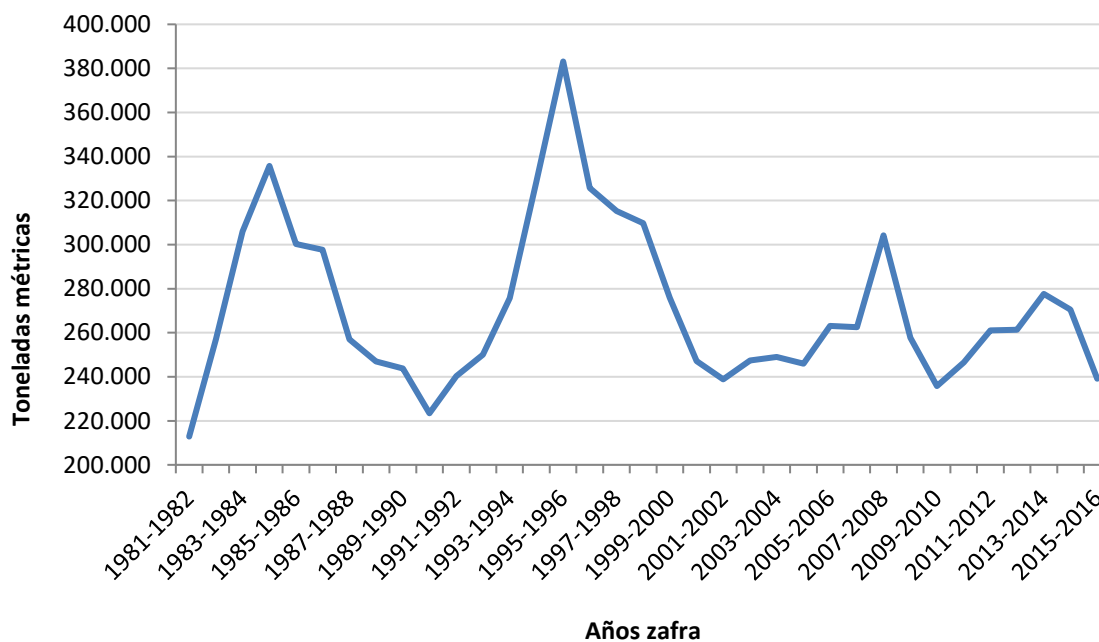
En el gráfico 7.4 se puede observar la fluctuación en la producción del cultivo, donde los años que presentan mayores incrementos para el Ingenio Atirro son: 1994 (Niño), 1983 (Niña) y 1993 (fase neutra) y para el caso de Turrialba son 1982 (Niño) y los ya mencionados 1994 y 1983. Con respecto a los años que presentan mayores decrecimientos son: 2009 (Niño) para Atirro, 1996 (fase neutra) para la región y 2008 (fase neutra) y 1987 (Niño) para ambas.

En el ingenio el año que presenta mayor producción es 1995 (Niña) y el de menor el 2015 (Niña), contrastando con los presentados en la zona turrialbeña en 1981 (fase neutra) y 1995 (Niña) que mostraron el mismo comportamiento respectivamente.

Gráfico 7. 5

**Turrialba: Producción de caña de azúcar de la zona según año zafra, para el periodo 1981-1982 a 2015-2016**

(en toneladas métricas de caña de azúcar)



Fuente: Elaborado a partir de datos de LAICA.

La volatilidad en la producción tanto del Ingenio Atirro como de la región productora de Turrialba, se debe a diversas razones que han afectado a la actividad a través del tiempo, como son la administración, la infraestructura y los problemas financieros de la empresa, así como la situación económica mundial.

En la década de los ochenta, se agrava la crisis del sector cañero, principalmente debido a la disminución de los precios del azúcar en los mercados internacionales, así como el recorte que sufre la cuota preferencial asignada por el gobierno estadounidense a nuestro país.

Además, la presencia de algunas enfermedades como la roya<sup>45</sup>, carbón<sup>46</sup> y escaldadura foliar<sup>47</sup> mermaron el crecimiento que se venía presentando en los primeros años de este periodo (Chaves 2010, León y Arroyo 2010).

Para los años noventa, la apertura comercial y la situación del agro costarricense, fomentó la producción azucarera en pequeña y mediana escala para los primeros años; no obstante, a mediados de esta década se destacó por la merma en la producción debido a la reducción de la cuota establecida por Estados Unidos y la caída de los precios del azúcar debido a la sobreproducción en los mercados externos (Chaves 2010, León y Arroyo 2010).

Para el caso del Ingenio Atirro, conformado por distintas sociedades anónimas, entre ellas la Central Azucarera Turrialba, se presentaron problemas financieros por inversiones poco rentables, lo que acarreó atrasos e incumplimientos en los pagos sobre la entrega de la caña, decretándose de esta manera el cierre técnico del ingenio.

En consecuencia a lo plasmado anteriormente, se formó la Sociedad de Cañeros del Atlántico, como iniciativa de los productores de la zona. En 1994, esta sociedad adquiere la totalidad de las acciones de Central Azucarera; sin embargo, a finales de ese año venden la mitad de las acciones a otros inversionistas con el fin de generar mayor capital para la empresa. A

---

<sup>45</sup> La roya es una enfermedad causada por el hongo *Puccinia melanocephala* H. Sydow y P. Sydow, el cual ataca el sistema foliar y se presenta con mayor intensidad en plantas de cuatro meses de edad. Los síntomas pueden consistir en machas cloróticas, las cuales pueden tornarse en grandes secciones de color rojizo-oscuro, que pueden causar el secamiento de la hoja (Victoria et al. 1995).

<sup>46</sup> El carbón es una enfermedad causada el hongo *Ustilago scitaminea* Sydow, que al invadir el tejido meristemático o de crecimiento vegetativo de la yema, produciendo la formación de una estructura semejante a un látigo en la parte terminal de los tallos infectados; lo cual ocasiona que los tallos no se desarrollen y mueran (Victoria et al. 1995).

<sup>47</sup> La escaldadura foliar es una enfermedad causada por la bacteria *Xanthomonas albilineans*, la cual puede presentar diversos síntomas de acuerdo a la fase de la enfermedad, como lo son decoloración vascular, presencia de estrías y rayas blanquecinas en las hojas, brotes laterales o “lalas” e, inclusive, la muerte (Victoria et al. 1995).

partir de ese momento, se reflejaron resultados positivos sobre la producción, en gran medida por el incentivo a las personas con el pago puntual a la producción entregada al ingenio.

En 1996, el Ingenio Atirro adquirió 400 hectáreas para dedicarlas a la producción cañera, las cuales se encontraban en abandono y representaron un gran costo para maximizar su producción, lo cual afectó directamente las finanzas de la empresa. Además, las condiciones en que se realizó dicha adquisición no fueron las óptimas, ya que el plazo del préstamo fue corto, con tasas de interés altas y sin aporte de capital social por parte de los accionistas (INFOCOOP 2015).

Otra de las causas de la disminución de la producción fue el fallo de la Sala IV en 1997, que modificó la asignación de la extracuota a nivel nacional, lo cual tuvo repercusiones en la producción de Atirro, ya que se le asignó un 30% más de producción, pero a un precio de aproximadamente la mitad del recibido por la cuota, desestimulando a las personas dedicadas a esta actividad (Chaves 2010, León y Arroyo 2010, INFOCOOP 2015).

En 1999, se presentaron problemas mecánicos que perjudicaron la extracción del jugo a la caña, lo que provocó una pérdida de 243 millones de colones para la empresa, debido a la disminución del rendimiento industrial. Aparte de esto, en el 2002 el ingenio debió invertir 250 millones en la reparación de la infraestructura; siendo este un rubro al que no se le asignaba oportunamente recursos para el mantenimiento preventivo de los equipos.

Ante la difícil situación financiera que atravesaba la empresa, ya para ese año se vislumbraba el cese de operaciones, después de varios intentos de arreglos con los acreedores, se decide poner en venta las acciones. Sin embargo, no se logró concretar dicha venta a los principales compradores Coopeagri R.L. y Hacienda Juan Viñas S.A. Es después de esto que, con apoyo de INFOCOOP, se crea Coopeatirro R.L., quien adquirió el 50% de las acciones y el otro 50% se le adjudicó a Coopeagri, conformando el Consorcio Cooperativo Agriatirro R.L (INFOCOOP 2016).

La producción de caña de azúcar se vio afectada por la crisis económica mundial y para el 2008 el costo de los insumos aumentó drásticamente, afectando las finanzas de los productores cañeros. Esto propició que el mantenimiento del cultivo fuera menor, lo cual influyó en la baja productividad y retardó la renovación de plantaciones que superaban inclusive los quince años.

En el 2009, las pérdidas reportadas ascendían a ¢664 millones, por un marcado decrecimiento en las ventas. Además, los costos implicados a las plantaciones de caña aumentaron dicho monto a ¢1.228 millones. Esta situación propició la salida inminente de Coopeagri.

Como respuesta a los problemas financieros del ingenio, el decrecimiento en cantidad y calidad de la caña producto de plantaciones viejas con baja productividad, falta de financiamiento y la situación financiera mundial que incrementó drásticamente los costos de producción, se creó el programa de reactivación cañera. Este se enfocó en aumentar el área cultivada e incrementar la productividad de las plantaciones ya establecidas, renovar las de baja productividad y mejorar los procesos de transporte y molienda de caña.

Lo anterior se realizó mediante líneas de crédito, subprogramas de cultivo, administración y venta de semillas a productores, que les permita renovar y efectuar siembra de áreas nuevas; así como la asistencia técnica a productores, inversiones en equipo, revisión de los métodos de logística de transporte y mejoras tanto en infraestructura del ingenio como de los procesos productivos. Esto permitió elevar los índices de productividad y producción agroindustrial.

No obstante, para la zafra 2014-2015 se presentó una disminución de las toneladas métricas de azúcar obtenidas, relacionada mayormente con los patrones de precipitación presentados en la región. Dicho comportamiento incidió en la cantidad y la calidad de la materia prima entregada, ya que afectó el periodo de crecimiento vegetativo y la cosecha (Chaves, Bermúdez y Méndez 2015).

A lo descrito anteriormente, se debe agregar el deterioro en la inversión de los productores independientes que entregan la producción a Agroatirro, lo cual reflejó el punto más bajo en la producción de caña registrada por la empresa, tal y como lo señala el gráfico 7.4.

Cabe resaltar que, todas estas eventualidades, afectaron de manera circunstancial la producción de caña de azúcar en el ingenio, siendo los componentes de mercado como el precio del azúcar, los costos de producción; además del manejo administrativo y financiero de la empresa los factores determinantes en el declive observado en el gráfico 7.4. Los factores climáticos vienen a aportar incertidumbre a una empresa con diversos retos y disyuntivas por resolver. Es por lo cual que, el análisis climático debe convertirse en una herramienta que acuerpe la toma de decisiones del ingenio, basados en criterios técnicos y financieros que permitan incrementar la competitividad.

### **7.3.3 MODELO ECONÓMICO PROPUESTO**

Para poder explicar el efecto de las variables climáticas y económicas sobre el cultivo de la caña de azúcar, se propone un análisis de series de tiempo utilizando como base el modelo de Nerlove, donde primeramente se analizan los datos disponibles y las fuentes de información.

Las variables explicativas se pueden dividir en componentes climáticos y de mercado, donde las primeras son tomadas de la Estación Meteorológica del CATIE, las cuales son: valores diarios promedio de temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura promedio, precipitación total, radiación solar y evapotranspiración. Los componentes de mercado son los precios internacionales del azúcar en términos reales y nominales, tomados del Banco Mundial y las toneladas métricas de caña de azúcar aportadas por LAICA. Estas dos variables son analizadas según el enfoque utilizado por Nerlove, el cual propone que el precio y el rendimiento rezagado o de las cosechas anteriores pueden explicar en alguna medida la oferta o producción actual.

Para el caso del precio, no se contó con datos suficientes para su incorporación en el análisis, ya que se contaba solamente con información para el periodo 1991 - 2013, por lo cual fue necesario la utilización de los precios internacionales del azúcar. Estos fueron tomados del GEM (Monitor Económico Global, por sus siglas en inglés) Commodities, del Banco Mundial, en el cual se establecen los precios mensuales del azúcar y sus respectivos índices, desde 1960 hasta 2016. Dichos precios son calculados con base en los precios diarios establecidos por el Convenio Internacional del azúcar (ISA, por sus siglas en inglés), en el cual las cantidades de azúcar especificadas se expresan en valor crudo, peso neto (valor crudo de cualquier cantidad de azúcar significa su equivalente en azúcar crudo de 96° de polarización).<sup>48</sup>

Según datos de LAICA (citado por INEC 2015a) para la zafra 2012-2013, el país destinó el 42,1% del azúcar para la exportación lo cual nuevamente se destaca como una limitante para la creación del análisis de regresión.

Adicionalmente, es importante mencionar que la totalidad de la caña entregada, no es pagada al mismo precio al productor, dado que se poseen precios establecidos para producción correspondiente a la cuota y a la extracuota, lo cual merece un tratamiento diferente para cada caso, ya que se reporta una diferencia del 30 al 40 por ciento entre ellos.

Debido a lo anterior es que se asume que los cambios en el volumen de producción de azúcar que realizan tanto productores e ingenios, están influenciados también por los cambios que sufren los precios internacionales, ya que gran parte de la producción se destina al mercado internacional y la asignación de la Cuota Nacional de Producción es definida tomando en

---

<sup>48</sup> A los efectos de este Convenio, el precio diario del azúcar será: “la media del precio para pronta entrega del contrato No. 11 de la Bolsa del Café y del Azúcar de Nueva York y del precio diario del contrato No. 2 de la Bolsa del Azúcar de Londres, convertido este último a centavos de dólar de los Estados Unidos por libra f. o. b., y estibado en puerto del Caribe, sobre la base del tipo de cambio apropiado vigente en el mercado de Londres” (ONU 1992b).

consideración el consumo nacional de azúcar registrado en la zafra inmediatamente anterior, así como el azúcar destinada a la exportación a los mercados internacionales.

Cabe destacar que se presentaron varias dificultades a la hora de establecer el modelo inicial, ya que la serie histórica de la producción limitó el uso de las variables climáticas, las cuales poseen datos para una mayor cantidad de años, además de estar disponibles de manera diaria y mensual, en contraste con las variables de mercado, que solamente cuentan con un dato por año. Esto conllevó a utilizar promedios anuales de todas las variables correspondientes al clima, minimizando los efectos de su variabilidad e introduciendo sesgo al modelo.

Los factores climáticos inciden directamente en el ciclo productivo de la caña de azúcar y en su rendimiento agroindustrial, en primer lugar, en el crecimiento vegetativo y la cantidad y la calidad de azúcar producida; además de la presencia de plagas y enfermedades y por último el movimiento de nutrientes y el uso de agroquímicos. Esto es determinado mayormente por las precipitaciones, ya sea el exceso o falta de lluvia. Además, teniendo en cuenta otros factores determinantes, como las propiedades del suelo y aspectos culturales de la producción, así como la motivación y la capacidad de inversión de los productores, se puede determinar en gran medida la producción del cultivo (Arias 2008).

Como indica Cifuentes (2010), si la incorporación de los modelos con enfoque al diagnóstico del rendimiento es integrada a la planificación de la empresa para proyectar la producción agrícola, esta será una herramienta clave para determinar la aplicación de fertilizantes y plaguicidas, uso de riego o avenamiento, entre otras labores agrícolas. Por otra parte, una mejor planificación derivada de estimaciones con escenarios climáticos y de mercado, permitirá optimizar el uso de recursos, adaptarse a las condiciones climatológicas y económicas y, derivado de esto, se generaría un aumento en sus utilidades y la disminución de riesgos financieros.

Para la definición del modelo se asumen ciertas condiciones como son que el uso de las variedades de caña cultivada, la fertilización y uso de agroquímicos, el método de labranza



y la preparación del suelo, son similares en todas las fincas (*ceteris paribus*) que aportan la caña procesada por el Ingenio Atirro. Pese a que se conoce que en la práctica cada persona o empresa desarrolla el cultivo según diversos factores culturales y agronómicos, para el análisis se dispone a priori que estos no tienen un efecto significativo y además no se integran en el análisis, pues es difícil de incorporar en el modelo por las características de las variables, las cuales son de tipo cualitativo.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que el asumir la homogeneidad de la producción en una zona donde se produce en terrenos con distintas pendientes, manejo de las plantaciones, dificultades para el traslado del producto hasta el ingenio, diversidad en el tamaño de las fincas y el uso de tecnologías, aumentan de manera significativa el sesgo del modelo.

Es por esto que el análisis propuesto en una región y un cultivo específico, mediante el uso de un modelo econométrico que incorpore variables climáticas y económicas, responde a la necesidad de conocer los impactos generados por el cambio climático sobre las actividades antropogénicas, además de sus posibles estrategias de mitigación y adaptación, conjuntamente con la determinación del efecto de los precios y la oferta de la zafra anterior sobre la producción actual.

Debido a lo anterior es que el estudio incorpora variables climáticas y de mercado, las cuales procuran explicar la relación con la producción de caña de azúcar y además cuantifican el impacto que tienen sobre esta, determinando cuáles presentan valores estadísticamente significativos y cuáles no aportan al análisis propuesto. El estudio establece una metodología que pueda ser validada en otras regiones y cultivos del país con criterios técnicos, científicos y estadísticos, teniendo en cuenta las características agronómicas, climáticas y socioculturales de cada actividad y lugares a analizar.

### 7.3.3.1 DEFINICIÓN DEL MODELO PROPUESTO

Previamente y según la revisión bibliográfica sustentada en otros estudios que incorporaron variables climáticas y de mercado al análisis de la producción, es que se establecieron las variables descritas como temperatura, precipitación, radiación solar, precio del azúcar y producción de caña de azúcar medido en TMC procesada, con lo cual se generaron diversos modelos con datos del Ingenio Atirro, con resultados no concluyentes para establecer una ecuación econométrica. Este mismo análisis se realizó con datos de la región azucarera de Turrialba, obteniendo resultados similares, los cuales direccionaron a desestimar las ecuaciones obtenidas.

Inicialmente, se utilizó un modelo lineal que contempló como variable dependiente la producción de caña de azúcar y como variables independientes la temperatura mínima y máxima, la precipitación total anual y la radiación solar.

El planteamiento en el modelo de la temperatura máxima y mínima, pretende captar el efecto de cada una de ellas sobre las distintas fases del cultivo, además de la variación térmica, la cual se refiere a la diferencia entre estas. Para el cultivo de la caña de azúcar la temperatura incide en el crecimiento y el desarrollo del cultivo, así como la diferencia entre los valores máximos y mínimos en el proceso de la madurez y en el almacenamiento de sacarosa para temperaturas entre 11 y 12°C (Larrahondo y Villegas 1995). Cuanto mayor sea esta diferencia, se obtendrá mejor rendimiento de azúcar, mientras que cuanto menor sea esta tendrá un comportamiento decreciente.

Este modelo lineal, el cual contempló solamente variables climáticas, obtuvo un coeficiente de determinación bajo, con variables no significativas y con alta correlación entre variables como radiación solar y la temperatura. A raíz de estos resultados, se aplicaron diversos modelos contemplando las variables que mostraban mayor respuesta al análisis y se utilizaron diversas formas funcionales, como las funciones logarítmicas y exponenciales, basadas en criterios técnicos y en la experiencia de otros estudios como el denominado *Cambio climático*

y cultivos azucareros (ISO 2013). Además de esto, se introdujeron las variables de mercado, mostrando una leve mejoría, pero aún sin mejorar los estadísticos analizados.

Modelo 1: Modelo lineal de producción con variables climáticas

$$Y = -77814,2 - 27658,5 T_{min} + 15821,3 T_{max} - 18,9827 P + 13198,8 \text{ Rad} \quad (1)$$

**Cuadro 7. 10**

Características del modelo 1 de regresión

Características	Valor
R <sup>2</sup>	0,394876
R <sup>2</sup> ajustado	0,314193
Contraste de especificación: F (4,30)	4,894155

**Cuadro 7. 11**

Descripción del modelo 1 de regresión

Variable	Coefficiente	Desviación Típica	Estadístico t	Valor p
C	-77814,2	213667	-0,3642	0,7183
Tmin	-27658,5	9263,61	-2,986	0,0056
Tmax	15821,3	5514,46	2,869	0,0075
P	-18,9827	14,5487	-1,305	0,2019
Rad	13198,8	6066,80	2,176	0,0376

Modelo 2: Modelo logarítmico de producción con variables climáticas

$$\begin{aligned} \ln Y = & 106609 - 0,254183 T_{min} + 0,131329 T_{max} - 0,000151929 P \\ & + 0,0924511 \text{ Rad} \end{aligned} \quad (2)$$

**Cuadro 7. 12**

Características del modelo 2 de regresión

Características	Valor
R <sup>2</sup>	0,394752
R <sup>2</sup> ajustado	0,314052
Contraste de especificación: F (4,30)	4,891606

**Cuadro 7. 13**

Descripción del modelo 2 de regresión

Variable	Coefficiente	Desviación Típica	Estadístico t	Valor p
C	10,6609	1,77353	6,011	1,35e <sup>-08</sup>
Tmin	-0,254183	0,0768920	-3,306	0,0025
Tmax	0,131329	0,0457725	2,869	0,0075
P	-0,000151929	0,000120761	-1,258	0,2181
Rad	0,0924511	0,0503571	1,836	0,0763

Modelo 3: Modelo logarítmico-lineal de producción con variables climáticas

$$\begin{aligned} \ln Y = & 869511 - 3,96494 \ln T_{min} + 3,89269 \ln T_{max} - 0,419354 \ln P \\ & + 1,43296 \ln \text{Rad} \end{aligned} \quad (3)$$

**Cuadro 7. 14**

Características del modelo 3 de regresión

Características	Valor
R <sup>2</sup>	0,388838
R <sup>2</sup> ajustado	0,307349
Contraste de especificación: F (4,30)	4,771701

**Cuadro 7. 15**

Descripción del modelo 3 de regresión

Variable	Coefficiente	Desviación Típica	Estadístico t	Valor p
C	869511	5,67792	1,531	0,1362
In Tmin	-3,96494	1,22128	-3,247	0,0029
In Tmax	3,89269	1,37259	2,836	0,0081
In P	-0,419354	0,325975	-1,286	0,2081
In Rad	1,43296	0,829676	1,727	0,0944

Modelo 4: Modelo lineal- logarítmico de producción con variables climáticas

$$Y = -436445 - 432157 \ln T_{min} + 469682 \ln T_{max} - 53057,2 \ln P + 205749 \ln \text{Rad} \quad (4)$$

**Cuadro 7. 16**

Características del modelo 4 de regresión

Características	Valor
R <sup>2</sup>	0,390540
R <sup>2</sup> ajustado	0,309278
Contraste de especificación: F (4,30)	4,805970

**Cuadro 7. 17**

Descripción del modelo 4 de regresión

Variable	Coefficiente	Desviación Típica	Estadístico t	Valor p
C	-436445	683168	-0,6389	0,5278
In Tmin	-432157	146945	-2,941	0,0062
In Tmax	469682	165150	2,844	0,0079
In P	-53057,2	39221,4	-1,353	0,1862
In Rad	205749	99826,7	2,061	0,0481

Modelo 5: Modelo lineal de producción con variables climáticas y precio nominal

$$Y = -107740 - 16757,7 T_{min} + 11384,1 T_{max} - 150825P + 13546 \text{ Rad} - 100382 P_{nom} \quad (5)$$

**Cuadro 7. 18**

Características del modelo 5 de regresión

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
R <sup>2</sup>	0,459591
R <sup>2</sup> ajustado	0,36417
Contraste de especificación: F (5,29)	4,932606

**Cuadro 7. 19**

Descripción del modelo 5 de regresión

<b>Variable</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Desviación Típica</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Valor p</b>
C	-107740	205998	-0,5230	0,6049
Tmin	-16757,7	10653,4	-1,573	0,1266
Tmax	11384,1	5810,60	1,959	0,0598
P	-150825	14,1396	-1,067	0,2949
Rad	13546	5834,21	2,322	0,0275
$P_{nom}$	-100382	53866,5	-1,864	0,0725

Modelo 6: Modelo lineal de producción con variables de mercado y precio real

$$Y = -75162,9 - 23211,6 T_{min} + 13358,1 T_{max} - 16,4528P + 13,744 Rad - 51958,9 P_{real} \quad (6)$$

**Cuadro 7. 20**

Características del modelo 6 de regresión

Características	Valor
R <sup>2</sup>	0,408562
R <sup>2</sup> ajustado	0,306590
Contraste de especificación: F (5,29)	4,006608

**Cuadro 7. 21**

Descripción del modelo 6 de regresión

Variable	Coefficiente	Desviación Típica	Estadístico t	Valor p
C	-75162,9	214873	-0,3498	0,7290
Tmin	-23211,6	10781,1	-2,153	0,0398
Tmax	13358,1	6307,73	2,118	0,0429
P	-16,4528	14,9516	-1,100	0,2802
Rad	13,774	6140,62	2,243	0,0327
$P_{real}$	-51958,9	63427,3	-0,8192	0,4194

Donde las siglas indican,

Y = Rendimiento de azúcar; C = constante, Tmin = temperatura mínima promedio anual, Tmax = temperatura máxima promedio anual, P = Precipitación total anual; Rad = radiación promedio anual,  $P_{nom}$  = precio internacional del azúcar en términos nominales,  $P_{real}$  = precio internacional del azúcar en términos reales.

A continuación, se detalla el tratamiento de los datos e indicadores.



**Cuadro 7. 22**

Tratamiento de los datos e indicadores

<b>Variable</b>	<b>Indicador</b>
$Y =$ Rendimiento de azúcar	Rendimiento del azúcar del Ingenio Atirro, expresado en kilogramos de azúcar por tonelada métrica de caña (kg/TMC)
$T_{min} =$ temperatura mínima promedio anual	Temperatura mínima promedio anual, expresada en grados centígrados ( $^{\circ}C$ )
$T_{min} =$ temperatura máxima promedio anual	Temperatura mínima promedio anual, expresada en grados centígrados ( $^{\circ}C$ )
$P =$ Precipitación total anual	Precipitación total anual, expresada en milímetros (mm)
$Rad =$ radiación promedio anual	Radiación promedio anual, expresada en MegaJulio por metro cuadrado ( $MJ/m^2$ )
$P_{nom} =$ precio internacional del azúcar en términos nominales	Precio internacional del azúcar crudo en términos nominales, expresado en dólares por kilogramo de azúcar (\$/kg azúcar)
$P_{real} =$ precio internacional del azúcar en términos reales	Precio internacional del azúcar crudo en términos nominales, expresado en dólares por kilogramo de azúcar (\$/kg azúcar)

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, es que se procedió a realizar el mismo análisis con los rendimientos industriales del cultivo, obteniendo mejores resultados para la variable rendimiento de azúcar. A partir de esa premisa, se construyó la siguiente ecuación, mediante

el análisis econométrico de series de tiempo y sustentado en el modelo de ajustes parciales propuesto por Nerlove:

$$\ln Y = 2,56015 - 0,000420032P + 8,14841 e^{-08}P^2 + 0,562792\ln Y_{t-1} \quad (7)$$

Donde,

$Y$  = Rendimiento de azúcar, expresado en kilogramos de azúcar por tonelada métrica de caña (kg/TMC)

$P$  = Precipitación total anual, expresada en milímetros (mm)

$P^2$  = Precipitación total anual cuadrática, expresada en milímetros cuadrados (mm<sup>2</sup>)

$Y_{t-1}$  = Rendimiento de azúcar del periodo anterior, expresado en kg de azúcar por tonelada métrica de caña (kg/TMC)

Los datos fueron evaluados por medio del software estadístico Gretl, estableciendo los criterios estadísticos presentes en los cuadros 7.23 y 7.24.

### **Cuadro 7. 23**

Características del modelo de regresión propuesto

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
$R^2$	0,414376
$R^2$ ajustado	0,355813
Contraste de especificación: F (2,28)	1,3251

**Cuadro 7. 24**

Descripción del modelo de regresión propuesto

<b>Variable</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Desviación Típica</b>	<b>Estadístico t</b>	<b>Valor p</b>
C	2,56015	0,675021	3,793	0,0007
P	0,000420032	0,000242490	-1,732	0,0935
P <sup>2</sup>	8,14841 $e^{-08}$	4,3499 $e^{-08}$	1,873	0,0708
Y <sub>t-1</sub>	0,562792	0,140387	4,009	0,0004

Donde,

C= constante del modelo

Las variables evaluadas en el modelo, presentan significancia estadística según los valores del estadístico t; además, los valores de p con un  $\alpha= 10\%$  también se muestran significativos. Dicho análisis presenta un modelo log-log, el cual mide la elasticidad de la variable explicada en términos de las variables regresoras, para el caso del modelo propuesto determina el rendimiento de azúcar según las variaciones porcentuales de la precipitación y el rendimiento industrial de la zafra anterior.

Analizando cada una de las variables propuestas en el modelo, el rendimiento industrial de la caña de azúcar es definitivamente un determinante de la eficiencia y productividad del cultivo, el cual es sensible al entorno en donde se desarrolla la plantación, ya sea en variaciones en el clima expresados en diferencias en la temperatura mínima y máxima, humedad y radiación solar, entre otros factores. Lo anterior, además del manejo agronómico, como fertilización, quema controlada, riego y avenamiento, generan diferencias en la

concentración de sacarosa y por ende en la producción de azúcar (Abarca s.f., Chaves, Bermúdez y Méndez, 2015).

La variable precipitación, tiene efectos directos e indirectos sobre la producción de azúcar, los cuales se representan de mejor manera según la forma funcional cuadrática, para lo que se debe tener en cuenta que la disponibilidad de agua no solo afecta al cultivo por la cantidad, sino que también por la intensidad y frecuencia de esta y por la época del año y el ciclo en que se encuentre el cultivo (Abarca 2009), lo cual afecta el traslado de la cosecha por el difícil acceso y tránsito hacia las fincas, que incide en la corta y entrega a los centros de acopio.

Para este caso, poca precipitación desencadenaría periodos secos más intensos, donde la caña de azúcar es tolerante a estas circunstancias, sin embargo, niveles bajos de precipitación en la fase de maduración, favorecen al cultivo en la acumulación de sacarosa y por ende la producción de caña de azúcar, así como el rendimiento industrial.

Así mismo, el exceso de lluvias afecta la calidad industrial de la caña ya que aumenta la probabilidad de encharcamiento en suelos con problemas de drenaje o anegación, la presencia de anoxia radicular o falta de oxígeno en los tejidos de la planta, lo cual provoca daños estructurales en los tallos. Otros factores que inciden en el cultivo, por el aumento exacerbado en los patrones de lluvia, son el volcamiento, incremento en la producción de cachaza, pudrición y pérdida de tallos industrializables y proliferación de plagas y enfermedades e incrementos en la floración por presencia de nubosidad (Abarca s.f., Chaves, Bermúdez y Méndez, 2015).

Cabe resaltar, que el valor calculado del coeficiente estimado de la constante  $\alpha$ , contempla la respuesta a otros factores no utilizados en el modelo, tales como los cambios tecnológicos y aspectos socioculturales.

Considerando la influencia de datos climáticos y del valor del rendimiento de la caña de azúcar del periodo anterior, estos logran explicar en términos estadísticos el 41,44% el rendimiento del cultivo, establecido por el coeficiente de determinación, donde dicho modelo

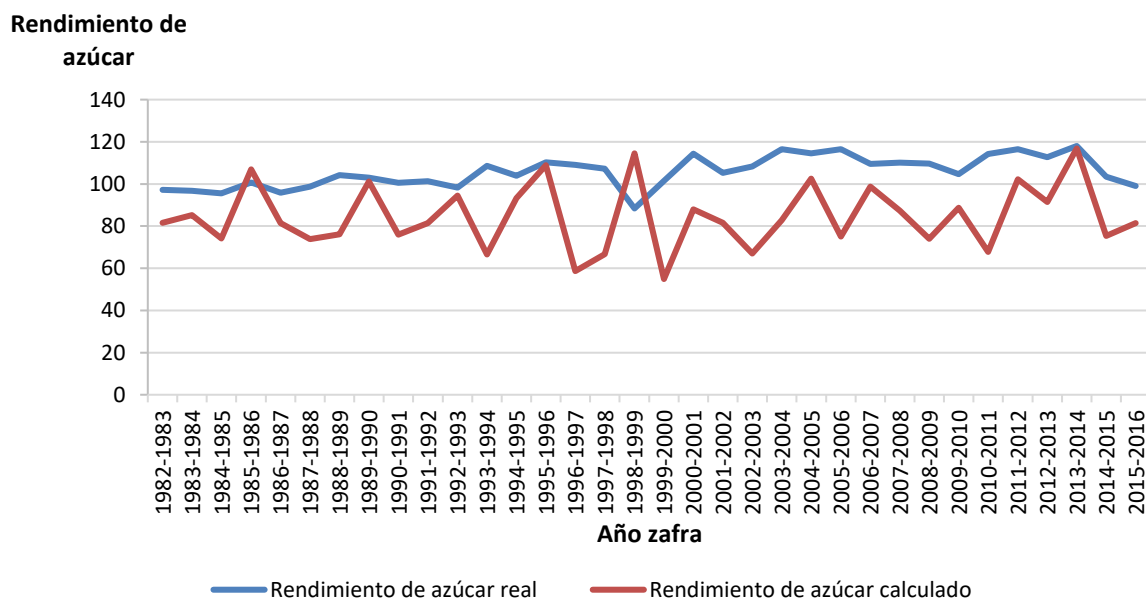
puede utilizarse para explicar la influencia de las variables regresivas sobre la regresora; sin embargo, para propósitos de predicción se deben construir diversos escenarios que permitan evaluarlo.

Estos escenarios servirán de herramientas claves para la caracterización del posible comportamiento de las variables climáticas y de mercado, teniendo en cuenta la presencia de cambios en el clima, volatilidad en los precios y los riesgos e implicaciones políticas y administrativas del ingenio. Además, debe tenerse en cuenta que el establecimiento de dichos escenarios está basado en supuestos que deben contemplar criterios técnicos y la experiencia de personas expertas en el tema, lo cual tendrá mayor validez al establecerlos, pero no disminuirá su incertidumbre.

Gráfico 7. 6

### **Turrialba: Rendimiento de azúcar real y calculado de la zona del Ingenio Atirro según año zafra, para el periodo 1981-1982 a 2015-2016**

(en kilogramos de azúcar por tonelada métrica de caña)



Fuente: Elaborado a partir de datos de LAICA.

El gráfico 7.6, refleja el rendimiento de azúcar real del Ingenio Atirro, en contraste con el rendimiento calculado mediante el uso del modelo propuesto. Como se puede observar, en el rendimiento real, existen menores fluctuaciones que en el rendimiento calculado, donde se presentan diferencias de hasta 50,51 kg/TMC para la zafra 1996 -1997; sin embargo, para las zafras 1989-1990 y 2013-2014 se encuentran en puntos prácticamente iguales con diferencias mínimas de 1,89 y 1,17 kg/TMC respectivamente.

Para poder optimizar el uso de esta herramienta, se requiere incorporar una mayor cantidad de años en la serie de tiempo, que permita mejorar su ajuste y a la vez, agregar nuevas variables que logren mejorar la estimación del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y con ello poder explicar con mayor certeza el comportamiento del rendimiento de azúcar.

### **7.3.3.2 PRUEBAS AL MODELO PROPUESTO**

Para validar la consistencia del modelo descrito anteriormente, se realizaron pruebas cuantitativas y cualitativas para evaluar el supuesto de normalidad, además de la presencia de multicolinealidad, heterocedasticidad y autocorrelación. Para ello, se realiza una descripción de los factores que inciden en la presencia de cada una de ellas, así como su efecto en las estimaciones y en el análisis de los resultados obtenidos para el modelo propuesto.

#### **7.3.3.2.1 NORMALIDAD**

Para los análisis econométricos se establece el supuesto de normalidad, el cual consiste en que los residuos del modelo siguen la distribución normal con media cero y varianza constante.

Para determinar dicha normalidad se realizaron diversas pruebas, entre las cuales destacan el análisis a partir del histograma, que como lo indica la figura 7.3, los residuos siguen una distribución normal; al igual que destaca la figura 7.4, que corresponde al gráfico

probabilístico normal, el cual permite visualizar la distribución de los datos y compararlos con la distribución normal.

Figura 7.2

### Histograma de la distribución normal de los residuos del modelo propuesto

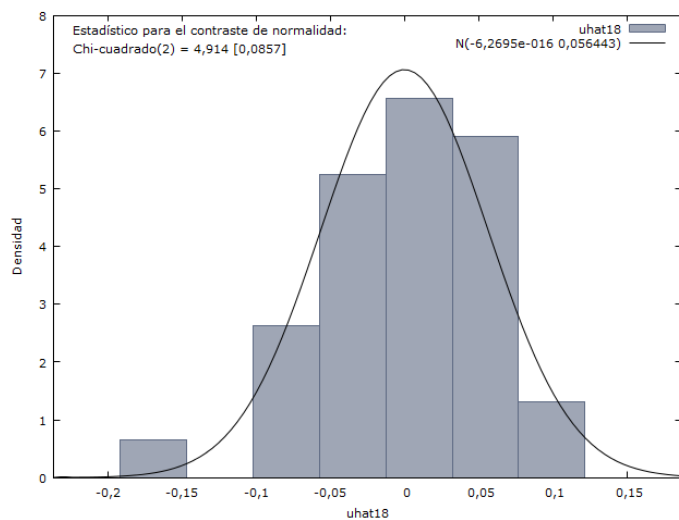
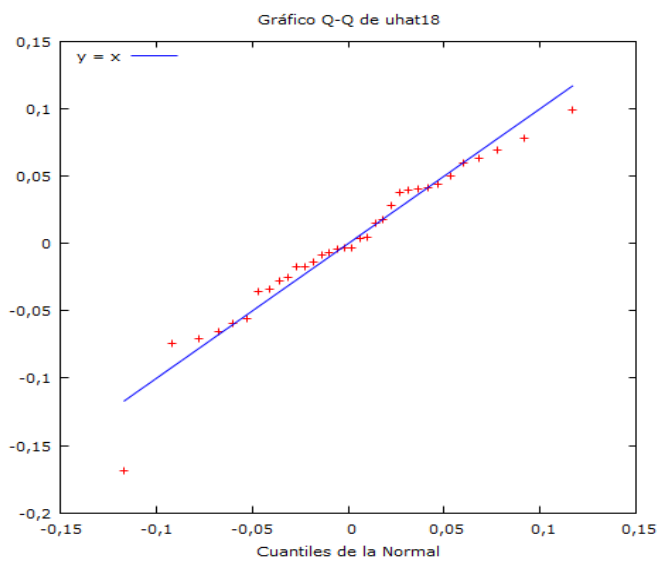


Figura 7.3

### Gráfico de probabilidad normal del modelo propuesto



Por otra parte, se calculó el contraste de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk (W), el cual es de 0,959563 con valor p de 0,236123, donde la hipótesis nula es que los residuos siguen probabilidad normal y, según los resultados de la prueba, se concluye que no se rechaza la hipótesis nula. Se utiliza esta prueba y no la de Jarque-Bera (JB) de normalidad, pues esta se puede utilizar para muestras pequeñas (menores a 50), mientras que la última se utiliza para muestras grandes.

### **7.3.3.2.2 MULTICOLINEALIDAD**

La multicolinealidad se refiere a las relaciones lineales entre las variables explicativas, donde los coeficientes de regresión son determinados, pero con errores estándar grandes, por lo cual estos no pueden ser determinados con exactitud. Esto puede ocurrir por restricciones en el modelo o en la población sujeta a muestreo, errores de especificación del modelo, métodos inadecuados en la recolección de los datos y tener más variables explicativas que datos, lo cual sobredetermina el modelo.

Las estimaciones en presencia de multicolinealidad perfecta permanecen indeterminadas y sus errores estándar son infinitos, sin embargo, en los modelos de regresión la multicolinealidad no es perfecta y es posible la estimación de los coeficientes de regresión. Entre los factores que afectan la multicolinealidad son la presencia de varianzas y covarianzas grandes, que con intervalos de confianza amplios dificultan realizar estimaciones precisas, además de presentar estadísticos t no significativos y en algunos casos presentar coeficientes de determinación elevados.

Para detectar la presencia de multicolinealidad, se analiza el  $R^2$  con las t, las cuales son significativas e indican que esta no es severa; además, se genera la matriz de correlación donde, para el modelo propuesto, se comparan los coeficientes de las regresiones auxiliares, los cuales deben ser menores con respecto al coeficiente de determinación del modelo. Con base en lo anterior, se obtiene como resultado una correlación baja entre el ln del rendimiento



de azúcar y las variables lineal y cuadrática de precipitación; sin embargo, como se esperaba, se presenta una alta correlación entre estas.

Cuadro 7. 25

#### **Matriz de correlación para las variables regresoras del modelo propuesto**

<i>Variable</i>	<i>lnY</i>	<i>P</i>	<i>P<sup>2</sup></i>
$\ln Y_{t-1}$	1		
P	0,12811137	1	
$P^2$	0,11175513	0,99556452	1

#### **7.3.3.2.3 HETEROCEDASTICIDAD**

Los modelos econométricos pueden tener presencia de heterocedasticidad por diversas razones, entre las cuales se encuentran la deficiencia en la recolección de los datos, la presencia de datos atípicos o extremos, la cual puede afectar mayormente el análisis si la muestra es pequeña. Cabe destacar que para el caso de la producción de azúcar, no deben presentarse dichos datos atípicos, pues este proceso arroja datos reales de producción y rendimiento, propios del proceso agroindustrial.

Aunado a lo anterior, otras razones por las que los análisis econométricos pueden tener heterocedasticidad son el error de especificación, el cual se debe a la omisión de variables importantes en el modelo y los residuos de la regresión pueden dar la clara impresión de que la varianza del error no es constante; además del uso de una forma funcional inadecuada, donde modelos lineales sean los correctos y se asignen modelos logarítmicos o viceversa (Gujarati 2010).

La presencia de heterocedasticidad afecta los intervalos de confianza siendo estos límites innecesariamente grandes y dificulta probar las hipótesis con el estadístico  $t$ , al presentar valores muy bajos y por ende ser considerados coeficientes estadísticamente no

significativos, afectando directamente las inferencias o conclusiones que se deriven del modelo, las cuales pueden subestimar o sobrestimar los resultados.

En el análisis de series de tiempo, es menos común tener problemas de esta índole, debido a que las variables tienden a ser de magnitudes similares, teniendo presente la variabilidad que pueda tener cada una de ellas. Sin embargo, siempre deben realizarse las pruebas respectivas para asegurar que el modelo no cuenta con heterocedasticidad.

Es por lo anterior que se realizó la prueba de *White*, donde los resultados indicaron que, según la hipótesis nula de que no existe heterocedasticidad, no se puede rechazar. Los estadísticos según la prueba de *White* son de 4,4468 para todo el modelo y 2,05843 para los cuadrados, con un chi cuadrado de 0,814731 y 0,841002, respectivamente; mediante lo cual se confirma que dichos valores de chi cuadrado no superan a los estadísticos de prueba, lo cual permite concluir que no existe heterocedasticidad.

#### **7.3.3.2.4 AUTOCORRELACIÓN**

Para el caso de los modelos de series de tiempo, las observaciones pueden mostrar intercorrelaciones debido a que estos siguen un ordenamiento respecto al tiempo, sobre todo si el intervalo es corto. Tal y como lo define Tintner (citado por Gujarati 2010), esta correlación rezagada de una serie consigo misma, rezagada por un número de unidades de tiempo se denomina autocorrelación.

La autocorrelación puede estar presente en los modelos econométricos debido a diversos factores, entre los cuales se destacan la inercia, donde las observaciones sucesivas pueden ser interdependientes producto de algún ciclo económico, el sesgo de especificación, el llamado fenómeno de telaraña el cual consiste en la influencia de los valores rezagados de algunas variables explicativas, como por ejemplo la influencia del precio de la cosecha anterior sobre la oferta de los productos agrícolas.

Otras posibles razones de la presencia de autocorrelación son la manipulación de los datos, la cual consiste en promediar valores diarios o mensuales para trimestralizarlos o anualizarlos, además de la interpolación o extrapolación donde estos procedimientos pueden inducir un patrón sistemático en las perturbaciones. Los modelos autorregresivos, los cuales consisten en que la variable dependiente rezagada uno o varios periodos sea una variable explicativa del modelo de regresión, también pueden presentar autocorrelación.

En presencia de autocorrelación, los estimadores dejan de tener varianza mínima y por ende no son eficientes, además de que las pruebas  $t$ ,  $F$  pueden no ser válidas. Es por lo anterior que se realizó la prueba cualitativa del método gráfico, que examina el comportamiento de los residuos del modelo, donde estos no deben tener un patrón determinado.

Por otra parte, se efectuaron pruebas cuantitativas como la prueba de rachas o de Geary, la cual analiza los cambios de signos de los residuos, estableciendo cada uno de estos como una racha. La prueba indica que si existen muchas rachas es debido a que los residuos cambian frecuentemente de signo y existe una correlación serial negativa, contrariamente pocas rachas pueden indicar autocorrelación positiva. Bajo esta premisa, se establece una hipótesis nula de que los residuos sucesivos son independientes y el número de rachas sigue una distribución normal y se tiene como resultado de que no se presenta autocorrelación en el modelo, ya que el número de rachas es  $R=17,9$  y se encuentra entre el intervalo 12,33 y 23,55, según los resultados de la prueba.

Para el caso de la prueba Durbin-Watson, el estadístico de Durbin  $h$  para modelos de series de tiempo, presenta un valor de 1,569085, lo que indica que no existe presencia de autocorrelación.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### 8.1 CONCLUSIONES

- El cambio climático es un determinante de la seguridad alimentaria y nutricional de los pueblos, donde incide directamente en producción de alimentos, la calidad del agua y el comercio de alimentos, siendo la niñez, las mujeres y las personas en estado de pobreza las que son más vulnerables.
- El crecimiento poblacional y los patrones actuales de consumo ejercen una presión sobre los recursos naturales y establecen una economía alta en emisiones de carbono, generando presión sobre los ecosistemas, las fuentes de agua y el suelo; además de incrementar los efectos del cambio climático.
- El sector Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés) es el segundo emisor de gases de efecto invernadero y, dentro de este, la ganadería y la producción agrícola son los subsectores que producen mayor cantidad de gases de efecto invernadero, ya que no solamente producen grandes cantidades de metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (NO<sub>2</sub>), sino que presentan un alto potencial de calentamiento de 21 y 310, respectivamente; sin embargo, es el único sector que también es receptor de CO<sub>2</sub>, lo cual le otorga un potencial alto de mitigación. Lo anterior toma mayor relevancia, pues según datos del VI Censo Agropecuario 2014, las actividades agropecuarias ocupan el 47,1% del territorio nacional.
- La variabilidad anual de las temperaturas puede ser explicada en gran parte por la presencia del ENOS, el cual presenta un comportamiento atípico producto del cambio climático, donde cada nuevo año Niña (fase fría) es tan caliente como un año Niño (fase cálida) de 10 a 15 años antes.
- Las políticas realizadas por el país responden en gran medida a la necesidad de mitigar los gases de efecto invernadero producidos por las actividades económicas,

y a la vez, adaptarse a la variabilidad producida por el cambio climático, donde el éxito de estas está en la adecuada transferencia a las personas y empresas encargadas de la producción agrícola, de la mano con el financiamiento y capacitación adecuada para su puesta en práctica.

- El fenómeno del cambio climático afecta los patrones de lluvia, los cuales presentan variaciones en intensidad y periodicidad, además de incrementar los valores de temperatura, lo cual afecta la estabilidad de las especies de flora y fauna e influye en los procesos económicos como la producción agrícola de cultivos, como la caña de azúcar.
- La caña de azúcar es uno de los cultivos más antiguos del mundo y de gran importancia socioeconómica, ya que genera empleo, desarrollo de actividades derivadas como la producción de dulce y el procesamiento agroindustrial para la producción de azúcar, teniendo un peso específico importante en el consumo nacional y en la oferta exportable de productos agrícolas con valor agregado.
- El cultivo de caña de azúcar es sensible a diversos factores climáticos como las temperaturas máximas y mínimas, variaciones en los patrones de precipitación, humedad y radiación solar; así como el paquete tecnológico utilizado, la inversión en tecnología agrícola, los costos de producción y el mercado, los cuales determinan primeramente la cantidad de área sembrada y posteriormente, el rendimiento agroindustrial de la industria azucarera. Esto puede afectar de manera positiva o negativa, según sea el grado de utilización y la fase del cultivo en el que se presente.
- La incorporación del análisis cuantitativo, mediante técnicas econométricas se describe como una herramienta clave para la planificación agrícola, la cual permitirá adaptarse a las condiciones cambiantes del clima y a la variabilidad de este. Es por lo anterior, que para evaluar el fenómeno del cambio climático se debe de utilizar análisis de datos reales y los modelos econométricos son fundamentales para poder caracterizar las interacciones y los efectos entre el clima, las variables de mercado, los aspectos socioproductivos y la producción agropecuaria.

- El modelo propuesto para el Ingenio Atirro, ubicado en la zona cañera de Turrialba, con las variables regresoras logaritmo natural del rendimiento industrial de la zafra anterior, precipitación lineal y cuadrática, describen el rendimiento de azúcar de la zafra actual en 41,44%, donde todos los estadísticos t son significativos y posee una probabilidad  $\alpha= 10\%$ . Dichos resultados podrían mejorar al incluir otras variables como el precio del azúcar y aumentar la serie de datos, lo cual le proporcionaría mayor robustez al análisis propuesto.
- Sin embargo, aunque la relación del rendimiento de azúcar con las variables establecidas como regresoras, sea solo del 41,44%, la ecuación establecida puede ser utilizada para realizar proyecciones que permitan estimar el comportamiento futuro del rendimiento agroindustrial. Esta estimación debe tomar en cuenta el sesgo que contiene el modelo y además incorporar en el análisis la creación de escenarios que permitan evaluar el posible comportamiento de las variables climáticas y de mercado sobre el rendimiento.
- Cabe destacar que el análisis empleado presenta diversas limitaciones entre las que se encuentran la cantidad de datos disponibles y algunas variables no presentan series históricas lo suficientemente grandes para incluirlas en la ecuación. Por otra parte, las variables climáticas están disponibles en forma diaria y mensual, mientras que las variables de mercado como la producción y los precios solamente se encuentran de forma anual, lo cual obliga a convertir, mediante el cálculo de promedios anuales, los datos climáticos. Es por esto que se reduce el efecto de la variabilidad climática sobre los rendimientos de azúcar, introduciendo de esta manera sesgo al análisis.
- Los supuestos utilizados en el modelo y el manejo de las variables, responden a la disponibilidad de los datos, ya que para el análisis no se encontraban de manera satisfactoria en cantidad y la temporalidad requerida. Esta característica dificultó el uso de la información, donde se debió utilizar variables proxy, como los precios internacionales del azúcar para capturar el efecto del pago de la cuota y extracuota a los productores y productoras de caña de azúcar. Lo anterior adicionó nuevamente

sesgo en el modelo, ya que dicha información se refiere al azúcar crudo tranzado en la Bolsa del Café y el Azúcar de New York y la Bolsa del Azúcar de Londres.

- Se debe tener en cuenta que el asumir la homogeneidad de la producción en una zona donde se produce en terrenos con distintas pendientes, manejo de las plantaciones, dificultades para el traslado del producto hasta el ingenio, diversidad en el tamaño de las fincas y el uso de tecnologías; aumenta de manera significativa el sesgo del modelo.

## **8.2 RECOMENDACIONES**

- Las políticas del sector agropecuario deben ser acuerpadas con el análisis de las variables climáticas y la implementación del análisis científico. Esto generará acciones concretas para fomentar el desarrollo económico bajo en carbono y con enfoque a la adaptación; lo cual permitirá la sostenibilidad de los ecosistemas y de las actividades antropogénicas.
- Es necesario incorporar el análisis económico de las causas y los efectos del cambio climático en la construcción de políticas nacionales, el cual permitirá generar tecnologías bajas en emisiones, medidas de mitigación y estrategias adaptativas a la variabilidad climatológica, que contemplen la inclusión social y el desarrollo sostenible como pilares.
- La caña de azúcar es un cultivo con gran potencial de mitigación y adaptación al cambio climático, debido a sus características edáficas y fisiológicas; sin embargo, se deben ampliar los estudios que analicen el efecto de la variabilidad climática sobre el cultivo, en factores como la temperatura, la luz, el viento y la precipitación, los cuales inciden en la floración de la planta y esta, a la vez, afecta la concentración de sacarosa y por ende los rendimientos industriales del cultivo.
- El valor real del modelo propuesto es el establecimiento de la metodología de análisis, el cual adquiere mayor relevancia al ser validado en otras regiones cañeras e inclusive en otras actividades agrícolas, teniendo en cuenta las características fisioedáficas de

cada cultivo y las zonas agroecológicas donde se encuentren. Dicho modelo debe contemplar otras variables que logren explicar el proceso de producción y agroindustria del azúcar, el cual es multifactorial y se realiza en regiones y condiciones heterogéneas, ya que varía según tamaño de la finca, manejo de la plantación, tecnología empleada en la plantación y extracción de azúcar, entre otros factores.

- La cantidad y calidad de los datos es determinante para realizar análisis econométricos y estadísticos, herramientas que son claves para la planificación agrícola y el establecimiento de los costos de mitigación y adaptación a la variabilidad climática, los cuales podrán ser significativamente menores a las pérdidas en las cosechas o en la calidad industrial, por lo cual resulta necesaria la recolección de datos climáticos y productivos de las actividades agrícolas que se requieran analizar. Esta información debe ser representativa y estable en el tiempo, la cual asegure su medición en el futuro y permita seguir monitoreando las interacciones con la producción azucarera.
- Se recomienda analizar la incidencia de la variabilidad climática sobre el desarrollo de las actividades agrícolas mediante la implementación de diseños experimentales, que permitan analizar la respuesta de los cultivos en cada una de sus etapas fenológicas ante la variabilidad climática y sus efectos en cada una de ellas.
- Por otra parte, el estudio de los efectos del cambio climático sobre la producción y los rendimientos agroindustriales, se analizan de mejor manera con datos históricos. Esto permite establecer ecuaciones econométricas que permitan evaluar en un horizonte mayor la incidencia real de las variables que se incluyan como regresoras con la regresada.
- Para el establecimiento de nuevos modelos, se deben incorporar variables intrínsecas de la producción como manejo tecnológico, fertilización de los suelos, uso de riego, vías de acceso a las fincas y otras características determinantes que incidan de manera directa o indirecta en la producción de azúcar. Lo anterior se establece como un reto,



ya que su incorporación requiere de dicotómicas que capturen el efecto del uso o presencia de alguna tecnología o práctica agronómica, o en su efecto su ausencia.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Abarca, S. 2009. Cambio Climático: Variación agro-ecológica de Turrialba (en línea). Consultado 12 nov. 2016. Disponible en <https://sites.google.com/site/asaturrialba/cambio-climatico-turrialba>
- Abarca, S. s.f. Cambio climático y algunos aspectos a considerar en el cultivo de la caña de azúcar (en línea). Consultado 11 ene 2016. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca/>
- Abarca, S. s.f. Cuantificando la variación del clima en Turrialba en el último medio siglo (en línea). Consultado 12 nov. 2016. Disponible en <https://sites.google.com/site/asaturrialba/cambio-climatico-turrialba>
- Acuña, G. 2004. Diagnóstico, La agroindustria de la Caña de Azúcar en Costa Rica: características, organización y condiciones laborales. San José, CR, ASEPROLA. 33 p.
- Aggarwal, P; Mall, R. 2002. Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India: II. Effect of uncertainties in scenarios and crop models on impact assessment (en línea). *Climatic Change* 52 (3): 331–343. Consultado 13 jun. 2012. Disponible en: [link.springer.com](http://link.springer.com)
- Aguilar, M. 2011. Impactos del cambio climático en la agricultura de América Central y en las familias productoras de granos básicos (en línea). s.l. Consultado 18 may. 2014. Disponible en [http://bvsan.uni.edu.ni:8080/70/1/impacto\\_camb\\_climatic.pdf](http://bvsan.uni.edu.ni:8080/70/1/impacto_camb_climatic.pdf)
- Alexander, P.; Bahret, M.; Chaves, J; D'Alessio. 1992. *Biología*. New Jersey, Estados Unidos, Prentice Hall. 717 p.
- Alonso, R; Rodríguez, JE. 1982. Análisis de las variables que inciden en la oferta de productos agrícolas: una aplicación al cultivo de la remolacha azucarera en Andalucía.

- Revista de Estudios Agrosociales 31 (119): 81-115. Consultado 17 ago. 2016. Disponible en [http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf\\_reas/r119\\_04.pdf](http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_reas/r119_04.pdf)
- Arias, R. 2009. Turrialba: Una Economía Local Entre la Crisis y el Desarrollo (en línea). Revista Ciencias Económicas 27 (1) 209-231. Consultado 19 oct. 2016. Disponible en <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/economicas/article/viewFile/7128/6812>
- 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.
- Armenta, A. 2007. Modelo insumo-producto: integración de la matriz insumo-producto. Tabasco, México, Universidad Autónoma de Tabasco. p. 359.
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. 1998. Ley n.º 7818, Ley Orgánica de la Agricultura e Industria de la Caña de Azúcar. Diario Oficial La Gaceta 184 (5). 22 set.
- Azqueta, D; Delacámara, G; Sotelsek, D. 2006. Degradación ambiental, endeudamiento externo y comercio internacional (en línea). Cuadernos Económicos de Información Comercial Española (71): 115-132. Consultado 19 may. 2014. Disponible en [http://www.revistasice.com/CachePDF/CICE\\_71\\_115-132\\_\\_108C5BB39F6046103954B3D07788475F.pdf](http://www.revistasice.com/CachePDF/CICE_71_115-132__108C5BB39F6046103954B3D07788475F.pdf)
- Banco Mundial. 2016. GEM (Global Economic Monitor) Commodities. Consultado 01 nov. 2016. Disponible en [http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=Global-Economic-Monitor-\(GEM\)-Commodities](http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=Global-Economic-Monitor-(GEM)-Commodities)
- Barragán, J. 1970. Estudio comparativo del punto de compensación de luz de varias plantas tropicales. Tesis Mag. Turrialba, Costa Rica, Instituto Interamericano de Ciencias

- Agrícolas de la OEA. 82 p. Consultado 30 oct. 2016. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A3090e/A3090e.pdf>
- Bertsch, F; Mata, R; Henríquez, C. 1993. Características de los principales órdenes de suelos presentes en Costa Rica. In Congreso Nacional Agropecuario y de Recursos Naturales (9., 1993, San José, Costa Rica). San José, Costa Rica, Colegio de Ingenieros Agrónomos. Consultado 30 nov. 2016. Disponible en [http://www.mag.go.cr/congreso\\_agronomico\\_ix/A01-1277-15.pdf](http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_ix/A01-1277-15.pdf)
- Binbol, N.; Adebayo, A.; Kwon-Ndung, E. 2006. Influence of climatic factors on the growth and yield of sugar cane at Numan, Nigeria (en línea). *Climate Research*, 32 (3): 247-252. Consultado 13 jun. 2012. Disponible en: <http://www.int-res.com/articles/cr2006/32/c032p247.pdf>
- Black, E.; Vidale, P., Verhoef, A., Vianna, S.; Osborne, T.; Hoof, C. van den. 2012. Cultivating C4 crops in a changing climate: sugarcane in Ghana (en línea). *Environmental Research Letters*. 7 (4): 1-10. Consultado 13 jun. 2012. Disponible en: <http://wrn.digitalunited.co.uk/publications/cultivating-c4-crops-in-a-changing-climate-sugarcane-in-ghana.html>
- Bolaños, J. 2015. Situación actual del control de malezas en el cultivo de la caña de azúcar en Costa Rica. In Congreso Tecnológico del Departamento de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA) (6, 2015, Alajuela, Costa Rica). San José, Costa Rica, LAICA. Consultado 23 jul. 2016. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca>
- Bonilla, A; Rosales, R; Maldonado, J. 2003. El valor económico de la predicción del fenómeno El Niño Oscilación del Sur “ENOS” para el sector azucarero colombiano. Bogotá, Colombia, Uniandes. 43 p.

- Bravo-Mosqueda, E; Medina, G; Ruíz, A; Báez, D; Mariles, V. 2012. Cambio Climático y su impacto potencial en el sistema producto caña de azúcar en el área de abasto del Ingenio Adolfo López Mateos (en línea). Consultado 18 may. 2014. Disponible en [clima.inifap.gob.mx/siccamex/publicaciones/CAMBIO\\_CLIMATICO.pdf](http://clima.inifap.gob.mx/siccamex/publicaciones/CAMBIO_CLIMATICO.pdf)
- Calderón, G. 2013. Impacto de los costos de cosecha en la rentabilidad del cultivo de la caña de azúcar en la región de Turrialba y Jiménez, Costa Rica. *In* Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica ATACA (19, 2013, San José, Costa Rica). San José, Costa Rica, LAICA. Consultado 23 jul. 2016. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca>
- Calvo, S; Visintini, A y Robledo, W. 2005. El modelo de expectativas adaptativas como mejor método para estimar la variable precio del grano en el modelo de equilibrio. *Revista de Economía y Estadística*, Cuarta Época 43 (2): 87-107. Consultado 17 ago. 2016. Disponible en <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/REyE/article/view/3819>
- Campbell, N; Reece, J. 2007. *Biología*. 7 ed. Madrid, España, Editorial Médica Panamericana. p. 196.
- Cárdenas, G; Cárdenas, J. 2009. Agricultura, urbanización y agua (en línea). Costa Rica, IICA. Consultado 18 mayo 2014. Disponible en [http://www.eclac.org/publicaciones/xml/8/41908/2010-913\\_Sintesis-Economia\\_cambio\\_climatico-COMPLETO\\_WEB.pdf](http://www.eclac.org/publicaciones/xml/8/41908/2010-913_Sintesis-Economia_cambio_climatico-COMPLETO_WEB.pdf)
- Castro, AM. 2015. Fichero Cantonal 2016 (en línea). San José, Costa Rica, Instituto de Formación y Estudios en Democracia. 115 p. Consultado 7 ago. 2016. Disponible en [http://www.tse.go.cr/pdf/ficheros\\_municipal2016/fichero\\_completo.pdf](http://www.tse.go.cr/pdf/ficheros_municipal2016/fichero_completo.pdf)
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Italia). 2010a. La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe (en línea). Santiago, Chile. 113 p. Consultado 7 may. 2011. Disponible en <http://www.cepal.org/es/publicaciones/2974-la-economia-del-cambio-climatico-en-america-latina-y-el-caribe-sintesis-2010>

- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Italia). 2010b. Costa Rica: efectos del cambio climático sobre la agricultura (en línea). San José, Costa Rica, CEPAL. Consultado 7 mayo 2011. Disponible en <http://www.cepal.org/es/publicaciones/25921-costa-rica-efectos-del-cambio-climatico-sobre-la-agricultura>
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Trinidad y Tobago). 2011. An assessment of the economic impact of climate change on the agriculture sector in Guyana (en línea). Puerto Príncipe, Trinidad y Tobago, CEPAL. Consultado 11 ene. 2016. Disponible en <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/3/45293/LCARL.323.pdf>
- Chaves, MA. 1999a. El nitrógeno, fósforo y potasio en la caña de azúcar. In Congreso Nacional de Técnicos Azucareros (ATACORI) (8, 1999, Guanacaste, Costa Rica). San José, Costa Rica, ATACORI. Consultado 23 jul. 2014. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca>
- Chaves, MA. 1999b. Nutrición y fertilización de la caña de azúcar en Costa Rica. In Congreso Nacional Agronómico (11), Congreso Nacional de Suelos (3, 1999 San José, Costa Rica). San José, Costa Rica, DIECA. Consultado 16 jun. 2014. Disponible en [www.mag.go.cr/congreso\\_agronomico\\_xi/a50-6907-III\\_193.pdf](http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_xi/a50-6907-III_193.pdf)
- Chaves, MA. 1999c. Productividad agrícola de la caña de azúcar en 21 cantones de Costa Rica durante 1997. In Congreso Nacional Agronómico y de Recursos Naturales (11, 1999 San José, Costa Rica). San José, Costa Rica, DIECA. Consultado 16 jun. 2014. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca>
- Chaves, MA. 2010. Resumen del desarrollo histórico de la caña de azúcar en Costa Rica (en línea). Consultado 16 oct. 2016. Disponible <https://www.laica.co.cr/biblioteca>
- Chaves, MA. 2011. Impacto de la lluvia y las inundaciones sobre la caña de azúcar en Costa Rica (en línea). Consultado 30 set. 2012. Disponible en <http://www.laica.co.cr/biblioteca>

- Chaves, MA; Barrantes, JC; Angulo, A; Rodríguez, M; Villalobos, C; Bolaños, J; Calderón, G; Araya, A. 2008. Análisis de la disminución de la producción agroindustrial de azúcar en Costa Rica: Zafra 2007-2008. Consultado el 30 nov. 2012. Disponible en: <http://www.laica.co.cr/biblioteca>
- Chaves, MA; Bermúdez, AZ. 2006a. Consideraciones para la Quema Tecnificada de una Plantación Comercial de Caña de Azúcar en Costa Rica (en línea). *In* Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 16, Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI) (17, 2006, Heredia, Costa Rica). P. 254-260. San José, Costa Rica, ATACORI. Consultado 03 dic. 2016. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca>
- Chaves, MA; Bermúdez, AZ. 2006b. Motivos y Razones para Quemar las Plantaciones de Caña de Azúcar en Costa Rica (en línea). *In* Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 16, Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI) (17, 2006, Heredia, Costa Rica). P. 248-253. San José, Costa Rica, ATACORI. Consultado 03 dic. 2016. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca>
- Chaves, MA; Bermúdez, AZ. 2006c. Quema Regulada de Plantaciones para la Cosecha de la Caña de Azúcar en Costa Rica: Consideraciones Legales (en línea). *In* Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 16, Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI) (17, 2006, Heredia, Costa Rica). P. 267-271. San José, Costa Rica, ATACORI. Consultado 03 dic. 2016. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca>
- Chaves, MA; Bermúdez, AZ. 2006d. Regulaciones internacionales sobre Quema de la caña de azúcar (en línea). *In* Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 16, Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI) (17, 2006, Heredia, Costa Rica). P. 261-266. San José, Costa

- Rica, ATACORI. Consultado 03 dic. 2016. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca>
- Chaves, MA; Bermúdez, L; Méndez, D. 2015. Resultados de la zafra 2014 -2015 (en línea). Boletín Conexión 2015-9: 1-31. Consultado 13 jul. 2016. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca>
- Chaves, MA; Chavarría, E. 2013. ¿Cómo se distribuye y dónde se cultiva territorialmente la caña destinada a la fabricación de azúcar en Costa Rica? (en línea). In Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Centroamérica (ATACA), 19, Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI) (20, 2013, Heredia, Costa Rica). Memoria. T. 1. P. 179-203. San José, Costa Rica, ATACORI. Consultado 24 jul. 2014. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca>
- Chaves, MA; Barrantes, JC; Bolaños, J; Angulo, A; Rodríguez, M; Villalobos, C; Calderón, G; Araya, A. 2013. Censo de variedades de caña de azúcar sembradas en Costa Rica, año 2010. Consultado 06 dic. 2016. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca/>
- Chaves, MA; Rodríguez, M; Villalobos, C; Angulo, A; Marchena, G; Calderón, G; Alfaro, R; Rodríguez, JM. 2001. Censo de variedades de caña de azúcar de Costa Rica (en línea). Consultado 16 jun. 2014. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca/>
- Cifuentes, M. 2010. ABC del Cambio Climático en Mesoamérica (en línea). Turrialba, Costa Rica. 71 p. Consultado 14 mayo 2011. Disponible en <http://www.sidalc.net/repdoc/a3718e/a3718e.pdf>
- Collinet, J. 1997. Potencialidades y limitantes de algunos suelos en San Miguel La Palotada, Petén, Guatemala. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 51 p.
- Díaz, L; Portocarrero, E. 2002. Manual de producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) Tesis Lic. Tegucigalpa, Honduras, Universidad Zamorano. 131 p.



- Durán, J; Oviedo, M. 2012. Perspectivas de las Variedades Introducidas a Costa Rica en la Última Década. (en línea). Consultado 16 jun. 2014. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca/>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia). 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (en línea). Roma, Italia. Consultado 11 may. 2014. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia). 2009. Perfil para el cambio climático (en línea). Roma, Italia. Consultado 11 may. 2014. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/012/i1323s/i1323s00.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia). 2013a. Base de datos de emisiones de FAOSTAT (en línea, base de datos). Roma, Italia, FAO. Consultado 28 nov. 2004. Disponible en <http://faostat3.fao.org/faostat-download-js/PDF/ES/GE.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia). 2013b. Gestión del riesgo agroclimático en América Latina (en línea, curso). San José, Costa Rica. Consultado 03 dic. 2014. Disponible en [www.fao.org/alc/cursos/clima2/](http://www.fao.org/alc/cursos/clima2/)
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia). 2014a. Dirección de Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura FAOSTAT (en línea, base de datos). Roma, Italia, FAO. Consultado 28 nov. 2004. Disponible en <http://faostat3.fao.org/>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia). 2014b. Agricultura Familiar en América Latina y el Caribe: Sector clave para la seguridad alimentaria. Gestión del riesgo agroclimático en América Latina (en línea, curso). San José, Costa Rica. Consultado 03 dic. 2014. Disponible en [www.fao.org/alc/cursos/af/](http://www.fao.org/alc/cursos/af/)

- GGW (Golden Gate Weater Services, Estados Unidos). 2016. El Niño and La Niña Years and Intensities (en línea, sitio web). Consultado 17 oct. 2016. Disponible en <http://ggweather.com/enso/oni.htm>
- Greenland, D. 2005. Climate Variability and Sugarcane Yield in Louisiana (en línea). *Journal of Applied Meteorology*, 4 (1): 1655–1664. Consultado 13 jun. 2012. Disponible en: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JAM2299.1>
- Guerrero, A. 1999. *Cultivos Herbáceos Extensivos*. 6 ed. España, Madrid, Mundi-Prensa Libros. p. 350-351.
- Gujarati, D.; Porter, D. 2010. *Econometría*. 5 ed. México DF, Mc Graw Hill. 946 p.
- Hernández, J. 2012. *Caracterización fitosanitaria a roya café (Puccinia melanocephala) y carbón (Ustilago scitaminea) de 63 clones de caña de azúcar, en fases avanzadas de selección en México*. Tesis Mag. Sc. Tabasco, México, Campus Tabasco. 101 p.
- Hoover Institute Press. 2003. *Politicizing Science: The Alchemy of Policymaking*. California, US. 315 p.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, Costa Rica). 2012. *Impacto del cambio climático en la agricultura* (en línea). Consultado 17 may. 2014. Disponible en <http://www.iica.int/Esp/dg/Documents/Nota%20Tecnica%2003-12.pdf>
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica). 2013. *Series de brillo solar en Costa Rica*. (en línea). Consultado 06 dic. 2016. Disponible en <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Series+de+Brillo+Solar+en+Costa+Rica>
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica). 2000. *I Comunicación Nacional ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático* (en línea). Consultado 18 may. 2014. Disponible en <http://unfccc.int/resource/docs/natc/corncl.pdf>

- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica). 2009a. Estrategia Nacional de Cambio Climático. San José, Costa Rica, Editorial Calderón y Alvarado S. A. 109 p.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica). 2009b. Inventario Nacional de gases con efecto invernadero y absorción de carbono en Costa Rica en el 2000 y en el 2005 (en línea). Consultado 17 ago. 2014. Disponible en [http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/inventario\\_gases\\_efecto\\_invernadero.pdf](http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/inventario_gases_efecto_invernadero.pdf)
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica). 2009c. Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (en línea). Consultado 17 ago. 2014. Disponible en <http://unfccc.int/resource/docs/natc/cornc2.pdf>
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica). 2014a. Factores de emisión GEI. 4 ed. (en línea). Consultado 18 may. 2014. Disponible en <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/factores-de-emision-gei-cuarta-edicion>
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica). 2014b. Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 1 ed. San José, CR, IMN/PNUD. 110 p.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional, Costa Rica). 2014c. Seguridad alimentaria y el cambio climático en Costa Rica. Granos básicos (en línea). San José, Costa Rica. 96 p. Consultado 03 dic. 2014. Disponible en [http://www.cr.undp.org/content/costarica/es/home/library/environment\\_energy/seguridad-alimentaria-y-cambio-climatico-en-costarica.html](http://www.cr.undp.org/content/costarica/es/home/library/environment_energy/seguridad-alimentaria-y-cambio-climatico-en-costarica.html)
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, Costa Rica). 2016a. Guía para la presentación de información estadística (en línea). San José, Costa Rica, INEC. 92 p. Consultado 17 oct. 2016. Disponible en <http://www.inec.go.cr/metodologias>

- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, Costa Rica). 2016b. Estimaciones y proyecciones de población (en línea). San José, Costa Rica, INEC. 92 p. Consultado 17 oct. 2016. Disponible en <http://www.inec.go.cr/poblacion/estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion>
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, Costa Rica). 2015a. Anuario Estadístico 2012-2013. San José, Costa Rica, INEC. 476 p.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos, Costa Rica). 2015b. VI Censo Nacional Agropecuario: Cultivo Agrícolas, Forestales y Ornamentales. San José, Costa Rica, INEC. 285 p.
- INFOCOOP (Instituto Nacional de Fomento Cooperativo). s.f. Resolución 1281 (en línea). Consultado 03 dic. 2016. Disponible en <http://201.192.54.110/WebLink8/0/doc/224/Page31.aspx>
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Suiza). 2001. Cambio climático 2001: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Tercer Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza, IPCC. 398 p.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Suiza). 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza, IPCC. 104 p.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Suiza). 2014. Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza, IPCC. 151 p.

- ISO (International Sugar Organization).2013. Cambio climático y cultivos azucareros. (en línea). Consultado 03 dic. 2016. Disponible en [http://www.conadesuca.gob.mx/documentos%20de%20interes/MECAS\(13\)07%20-%20Climate%20Change%20and%20Sugar%20Crops%20-%20Spanish.pdf](http://www.conadesuca.gob.mx/documentos%20de%20interes/MECAS(13)07%20-%20Climate%20Change%20and%20Sugar%20Crops%20-%20Spanish.pdf)
- Jiménez, M; Tapia, A; Riggioni, R; Coto, E. 2015. Estadísticas relevantes de Turrialba: situación del cantón al 2012 (en línea). Turrialba, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 104 p. Consultado 17 oct. 2016. Disponible en [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8404/Estadsticas\\_relevantes\\_de\\_Turrialba.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8404/Estadsticas_relevantes_de_Turrialba.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Kempkes, Y. 1998. Costo de Producción de caña de azúcar en Guanacaste, Costa Rica (en línea). Consultado 26 ene. 2013. Disponible en: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A6074E/A6074E.PDF>
- Knox, J.; Rodríguez, J.; Nixon, D.; Mkhwanazi, M. 2010. A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland (en línea). *Agricultural Systems* no.103: 63–72. Consultado 13 mayo 2013. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X09001048>
- Kumawat, L; Prasad, K. 2012. Supply Response of Sugarcane in India: Results from All-India and State-Level Data. *Indian Journal of Agricultural Economics* 67 (4): 585-599. Consultado 17 ago. 2016. Disponible en <http://ageconsearch.umn.edu/handle/204839>
- Larrahondo, JE; Villegas, F. 1995. Control y características de maduración (en línea). *In* Cassalett, D; Torres, J; Isaacs, C. (eds.). El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Valle del Cauca, Colombia, CENICANÑA. p 297-313. Consultado 22 jul. 2012. Disponible en [http://www.cenicana.org/pdf/documentos\\_no\\_seriados/libro\\_el\\_cultivo\\_cana/libro\\_p297-313.pdf](http://www.cenicana.org/pdf/documentos_no_seriados/libro_el_cultivo_cana/libro_p297-313.pdf)

- León, J; Arroyo, N. 2010. Desarrollo Histórico del sector Agroindustrial de la caña de azúcar en el siglo XX (en línea). Consultado 16 oct. 2016. Disponible [www.iice.ucr.ac.cr/Informe%20Caña%20\\_Doc%20de%20trabajo\\_.pdf](http://www.iice.ucr.ac.cr/Informe%20Caña%20_Doc%20de%20trabajo_.pdf)
- Lerma, H. 2003. Metodología de la Investigación: Propuesta, Anteproyecto, y Proyecto. Bogotá, CO, Ecoe Ediciones. 166 p.
- López, A; Medina, G; Ruiz, JA; Báez, AD. 2009. Caracterización climática y edáfica del área de abastecimiento del Ingenio Pujilic, Chiapas (en línea). Consultado 11 ene. 2016. Disponible en <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/handle/123456789/2087>
- López, A; Rodríguez, R; Acuña, W; Quesada, LF; Martínez, O; Seas, A; Calderón, G; Castro, R; Brenes, F; Cubero, JC; Quesada, J. 2009. Proyecto de reactivación de la actividad cañera de Turrialba y Jiménez (en línea). Consultado 12 nov. 2016. Disponible en <https://sites.google.com/site/asaturrialba/cambio-climatico-turrialba>
- Luo, Q.; Belloti, W.; Williams, M.; Bryan, B. 2005. Potential impact of climate change on wheat yield in South Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132 (3): 273–285. Consultado el 13 ene. 2012. Disponible en: [www.elsevier.com/locate/agrformet](http://www.elsevier.com/locate/agrformet)
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, Costa Rica). 1991. Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. San José, Costa Rica, Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola del Ministerio de Agricultura y Ganadería. 560 p.
- Marin, F.; Jones, J.; Royce, F.; Suguitani, C.; Donzeli, J.; Pallone, W.; Nassif, D. 2011. Parameterization and Evaluation of Predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian Sugarcane (en línea). *Agronomy Journal*, no.103: 304–315. Consultado 13 mayo 2013. Disponible en: <https://www.agronomy.org/publications/aj/articles/103/2/304>

- Marti, B. 2000. The influence of climate change on maize production in the semi-humid-semi-arid areas of Kenya. *Journal of Arid Environments*, no.46: 333-344. Consultado 13 mayo 2013. Disponible en: [www.idealibrary.com](http://www.idealibrary.com)
- MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica). 2014. Plan de Acción Estrategia Nacional de Cambio Climático (en línea). Consultado 24 jul. 2014. Disponible en <http://climateobserver.org/wp-content/uploads/2015/06/Action-Plan-for-the-Climate-Change-strategy.pdf>
- Ministerio de Medio Ambiente, CO. 2002. Guía ambiental para el subsector de caña de azúcar. Consultado 02 ene. 12. Disponible en: [http://www.minambiente.gov.co/documentos/GUIA\\_~1A.PDF](http://www.minambiente.gov.co/documentos/GUIA_~1A.PDF)
- Montenegro, J. 2010. Cambio climático y la actividad cafetalera en Costa Rica (en línea). Consultado 11 oct. 2011. Disponible en [http://www.icafe.go.cr/icafe/anuncios/cafe\\_cambio\\_climatico/ICAFE-Marzo10-2011-F.pdf](http://www.icafe.go.cr/icafe/anuncios/cafe_cambio_climatico/ICAFE-Marzo10-2011-F.pdf)
- Montenegro, J; Abarca, S. 2001. Importancia del sector agropecuario costarricense en la mitigación del calentamiento global. San José, Costa Rica, MAG-IMN. 137 p
- Montenegro, J; Chaves, M. 2011. Contribución del Sector Cañero a la Mitigación del Cambio Climático (en línea). *In* Congreso Azucarero Nacional de la Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica (ATACORI) (XVIII, 2011, San José, Costa Rica). Memoria. San José, Costa Rica, ATACORI. Consultado 24 jul. 2014. Disponible en [http://www.infoagro.go.cr/Documents/Contribucion\\_Sector\\_Caifero\\_a\\_la\\_Mitigacion\\_del\\_Cambio\\_Climatico.pdf](http://www.infoagro.go.cr/Documents/Contribucion_Sector_Caifero_a_la_Mitigacion_del_Cambio_Climatico.pdf)
- Montenegro, J; Chaves, M. 2013. La quema en el cultivo de la caña de azúcar y su impacto en la emisión de gases con efecto invernadero en Costa Rica (en línea). *Tópicos meteorológicos y oceanográficos* 12 (2): 35-51. Consultado 24 jul. 2014. Disponible en <http://www.imn.ac.cr/publicaciones>

- Moya, T. et al. (1997) Microclimate in open top chambers: implications for predicting climate change effects on rice production (en línea). Transactions of the ASAE, 40 (3): 739-747.
- Nebel, B; Wright, R. 1999. Ciencias ambientales: ecología y desarrollo sostenible. México D.F., México, PEARSON Educación. p 214.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, Estados Unidos). 2016. Historical El Nino/ La Nina episodes (1950-present) (en línea, sitio web). Consultado 17 oct. 2016. Disponible en [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)
- Olzyk, D.; Centeno, H., Ziska, L.; Kern, J; Matthews, R. 1999. Global climate change, rice productivity and methane emissions; comparison of simulated and experimental results (en línea). Agricultural and Forest Meteorology, 97 (2): 87–101. Consultado 13 jun. 2012. Disponible en: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- OMM (Organización Meteorológica Mundial, Estados Unidos). 2009. El Niño y la Niña (en línea). Consultado 17 oct. 2016. Disponible en [https://www.wmo.int/youth/sites/default/files/field/media/library/atlas\\_13\\_el\\_nino\\_y\\_la\\_nina.pdf](https://www.wmo.int/youth/sites/default/files/field/media/library/atlas_13_el_nino_y_la_nina.pdf)
- ONU (Organización de las Naciones Unidas, Estados Unidos). 1992a. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (en línea). Consultado 18 may. 2014. Disponible en [https://unfccc.int/files/essential\\_background/background\\_publications\\_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf](https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf)
- ONU (Organización de las Naciones Unidas, Estados Unidos). 1992a. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (en línea). Consultado 18 feb. 2017. Disponible en <http://proteo2.sre.gob.mx/tratados/ARCHIVOS/CONVENIO-AZUCAR.pdf>



- Osorio, G. 2007. Manual Técnico: Buenas Prácticas Agrícolas -BPA- y Buenas Prácticas de Manufactura -BPM-en la Producción de Caña y Panela. Antioquia, Colombia, FAO. 200 p.
- Perucca, L. y Paredes, J. 2005. Peligro de aluviones en el departamento Pocito, provincia de San Juan. *Revista Asociación Geológica de Argentina* 60 (1): 64-71. Consultado 30 set. 2015. Disponible en [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0004-48222005000100007](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48222005000100007)
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Costa Rica). 2012. Escenarios costo-efectividad de medidas de mitigación: Caña de Azúcar. Informe Final (en línea). Consultado 16 jun. 2014. Disponible en <https://www.laica.co.cr/biblioteca>
- Quintero, R. 1995. Fertilización y nutrición (en línea). In Cassalett, D; Torres, J; Isaacs, C. (eds.). *El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Valle del Cauca, Colombia, CENICAÑA.* p 297-313. Consultado 22 jul. 2012. Disponible en [http://www.cenicana.org/pdf/documentos\\_no\\_seridados/libro\\_el\\_cultivo\\_cana/libro\\_p153-177.pdf](http://www.cenicana.org/pdf/documentos_no_seridados/libro_el_cultivo_cana/libro_p153-177.pdf)
- Quiroz, M. 2011. Anexo del Informe Técnico: Elaboración de un boletín con información hidroclimática de los mares de México. (en línea). Consultado 17 oct. 2016. Disponible en <http://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/publicaciones/BOLETINES/hidroclimatico/INDICES-CLIMATICOS.pdf>
- Raven, S; Evert, R; Eichhorn, S. 1992. *Biología de las plantas.* Barcelona, España, Editorial Reverté. v 2. 402 p.
- Retana, J. 2000. Relación entre algunos aspectos climatológicos y el desarrollo de la langosta centroamericana (*Schistocerca piceifrons piceifrons*) en el Pacífico Norte de Costa Rica durante la fase cálida del fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENOS). *Tópicos*

- Meteorológicos y Oceanográficos 7 (2): 64-73. Consultado 17 ago. 2016. Disponible en <http://www.bio-nica.info/biblioteca/retana2000acrididae.pdf>
- Ribeiro, J; Sentelhas, PC; Thomazella, S; Cabral, M. 2009. Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical southern Brazil (en línea). *Scientia Agricola* 66 (5): 593-605. Consultado 13 may. 2013. Disponible en: <http://www.scielo.br/pdf/sa/v66n5/03.pdf>
- Ritcher, G.; Semenov, M. 2005. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks (en línea). *Agricultural Systems* 84 (2005) 77-97. Consultado el 10 ene. 2012. Disponible en: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- Rojas, O; Eldin, M. 1983. Zonificación agroecológica para el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en Costa Rica. San José, Costa Rica, LAICA-IICA. (Serie publicaciones misceláneas, 398)
- Rojas, S. 2010. Análisis de caracteres y descripción floral de los géneros más representativos de la subclase Asteridae (Magnoliopsida) presentes en Colombia. Tesis Lic. Colombia, Pontificia Universidad Javeriana. Escuela Biología. 105 p.
- Sánchez, E. 2011. Efecto de la sombra y del manejo del café sobre la dinámica poblacional de (*Hypothenemus hampei* Ferrari) en frutos nuevos y remanentes en Turrialba. Tesis Mag. Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 82 p. Consultado 30 oct. 2016. Disponible en [https://agritrop.cirad.fr/562215/1/document\\_562215.pdf](https://agritrop.cirad.fr/562215/1/document_562215.pdf)
- Sánchez, E. 2011. Efecto de la sombra y del manejo del café sobre la dinámica poblacional de (*Hypothenemus hampei* Ferrari) en frutos nuevos y remanentes en Turrialba. Tesis Mag., Turrialba, Costa Rica, CATIE. 106 p.

- Semenov, M. 2007. Development of high-resolution UKCIP02-based climate change scenarios in the UK (en línea). *Agricultural and Forest Meteorology* 144 (2007) 127–138. Consultado el 10 ene. 2012. Disponible en: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria, Costa Rica). 2011. Política de estado para el sector agroalimentario y el desarrollo rural costarricense 2010-2021. San José, Costa Rica, SEPSA/MAG. 84 p.
- Singels, M. *et al.* 2008. DSSAT v4.5 - Canegro Sugarcane Plant Module. Scientific documentation (en línea). Consultado 3 mayo 2013. Disponible en [http://sasri.sasa.org.za/misc/DSSAT%20Canegro%20SCIENTIFIC%20documentation\\_20081215.pdf](http://sasri.sasa.org.za/misc/DSSAT%20Canegro%20SCIENTIFIC%20documentation_20081215.pdf)
- Sirieda, I. 1979. Problemas de Química. Barcelona, España, Editorial Reverté. p 45.
- Soestrisno, N. 1984. Supply response of sugar cane in Indonesia. *Philippine Review of Economics and Business* 21 (3 & 4): 239-265.
- Subirós, F. 2000. El cultivo de la caña de azúcar. San José, Costa Rica, EUNED. 448 p.
- TEC (Tecnológico de Costa Rica). 2015. Provincia de Cartago (en línea). Consultado 18 may. 2014. Disponible en <http://www.tec.ac.cr/sitios/Vicerrectoria/vie/cooperacion/Paginas/Entretenimiento/provinciacartago.aspx>
- Torriente, D. 2004. Recomendaciones ecológicas para la aplicación de biofertilizantes en la caña de azúcar (en línea). Consultado 18 may. 2014. Disponible en <http://avanzada.idict.cu/index.php/avanzada/article/view/86/96>
- USDA. 2006. Claves para la taxonomía de suelos. Washington D. C. Estados Unidos, USDA-NRCS. 339 p.
- Vargas, G. 2011. Botánica General: desde los musgos hasta los árboles. San José, Costa Rica, EUNED. p 441.

- Victoria, J; Guzmán, M; Ángel, J. 1995. Enfermedades de la caña de azúcar en Colombia. (en línea). *In* Cassalet, D; Torres, J; Isaacs, C. (eds.). El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Valle del Cauca, Colombia, CENICAÑA. p 265-293. Consultado 22 jul. 2012. Disponible en [http://www.cenicana.org/pdf\\_privado/documentos\\_no\\_seriados/libro\\_el\\_cultivo\\_cana/libro\\_p265-293.pdf](http://www.cenicana.org/pdf_privado/documentos_no_seriados/libro_el_cultivo_cana/libro_p265-293.pdf)
- Villalobos, R; Retana, J. 1999. Efecto del Cambio Climático en la Agricultura: Experiencias en Costa Rica (en línea). *In* Congreso Nacional Agronómico (11), Congreso Nacional de Suelos (3, 1999, San José, Costa Rica). San José, Costa Rica, IMN. Consultado 16 jun. 2014. Disponible en [www.mag.go.cr/congreso\\_agronomico\\_XI/a50-6907-III\\_367.pdf](http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_XI/a50-6907-III_367.pdf)
- Villers, L.; Trejo, I. 1998. Impacto del cambio climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México (en línea). Interciencia. Consultado el 20 de mar. 2013. Disponible en: [http://www.interciencia.org/v23\\_01/villers.pdf](http://www.interciencia.org/v23_01/villers.pdf)
- Yuri, J.A. *et al.* 2002. Inducción floral. En: Pomáceas. Boletín técnico, 4 p. Consultado el 02 ene. 12. Disponible en: <http://pomaceas.atalca.cl>

## **APÉNDICES**

Cuadro A. 1.

**Turrialba: Producción de caña de azúcar del Ingenio Atirro según año zafra, 1981-1985 a 2015-2016**

<b>Zafra</b>	<b>Toneladas métricas de caña molida</b>	<b>Azúcar: Rendimiento (Kg/TMC)</b>	<b>Bultos 96° de Polarización</b>
1981-1982	109.173	95,41	208.324
1982-1983	124.469	97,16	241.873
1983-1984	160.281	96,69	309.964
1984-1985	189.383	95,47	361.605
1985-1986	159.103	100,65	320.264
1986-1987	159.216	95,86	305.248
1987-1988	129.774	98,67	256.085
1988-1989	130.658	104,23	272.378
1989-1990	123.796	102,98	254.980
1990-1991	111.473	100,51	224.072
1991-1992	112.484	101,25	227.775
1992-1993	92.503	98,25	181.772
1993-1994	118.171	108,58	256.616
1994-1995	160.578	103,89	333.658
1995-1996	200.415	110,24	441.854
1996-1997	170.558	109,10	372.171
1997-1998	168.101	107,19	360.376

Continúa...

... Continuación del Cuadro A.1.

<b>Zafra</b>	<b>Toneladas métricas de caña molida</b>	<b>Azúcar: Rendimiento (Kg/TMC)</b>	<b>Bultos 96° de Polarización</b>
1998-1999	166.152	88,36	293.623
1999-2000	139.894	101,53	284.061
2000-2001	114.444	114,35	261.743
2001-2002	99.043	105,17	208.336
2002-2003	97.334	108,23	210.686
2003-2004	97.121	116,52	226.323
2004-2005	94.620	114,47	216.616
2005-2006	114.164	116,53	266.068
2006-2007	103.680	109,47	226.997
2007-2008	123.896	110,17	273.005
2008-2009	94.649	109,58	207.437
2009-2010	70.166	104,61	146.796
2010-2011	79.668	114,27	182.075
2011-2012	87.056	116,44	202.741
2012-2013	86.502	112,75	195.064
2013-2014	83.735	118,01	197.633
2014-2015	73.732	103,41	152.493
2015-2016	63.621	99,01	125.975

Fuente: Elaborado a partir de datos de DIECA (LAICA).

Cuadro A. 2.

**Turrialba: Variables climáticas según año, 1942-2015**

Año	Variables climáticas				
	Temperatura <sup>1/</sup>			Precipitación <sup>2/</sup>	Radiación <sup>3/</sup>
	Mínima	Media	Máxima	Promedio anual	Promedio anual
1942	-	-	-	2292,1	-
1943	-	-	-	2486,9	-
1944	-	-	-	3952,6	-
1945	-	-	-	2092,8	-
1946	-	-	-	2500,2	-
1947	-	-	-	1763,8	-
1948	-	-	-	2127,8	-
1949	-	-	-	3322,9	-
1950	-	-	-	3025,2	-
1951	-	-	-	3210	-
1952	-	-	-	2334,7	-
1953	-	-	-	2283,1	-
1954	-	-	-	2895,7	-
1955	-	-	-	2261,5	-
1956	-	-	-	3215	-
1957	-	-	-	2363,9	-
1958	14,78	22,94	30,69	1986,6	-
1959	13,03	22,18	29,95	2106,8	-
1960	14,02	22,58	30,12	2177,6	-
1961	14,27	22,38	29,92	2373,5	-
1962	14,99	22,19	28,93	2809,8	-
1963	14,43	22,03	29,00	2507,5	-

Continúa...



... Continuación del Cuadro A.2.

Año	Variables climáticas				
	Temperatura <sup>1/</sup>			Precipitación <sup>2/</sup>	Radiación <sup>3/</sup>
	Mínima	Media	Máxima	Promedio anual	Promedio Anual
1964	14,33	22,19	29,26	1926,5	-
1965	14,39	21,23	28,73	2947,8	-
1966	15,59	21,73	29,00	3494,8	-
1967	15,08	21,17	28,38	2870,5	-
1968	15,28	20,99	28,62	3134,8	15,81
1969	15,98	21,88	29,30	2823	18,74
1970	15,63	21,43	28,70	4169,6	17,93
1971	14,48	20,98	28,45	2250,9	19,75
1972	15,59	21,48	28,93	2713,5	18,72
1973	15,53	21,57	28,96	2541,3	18,74
1974	14,63	21,01	28,29	2616,1	18,71
1975	15,13	20,98	28,48	2942,7	17,75
1976	14,73	21,07	28,58	3293,1	19,77
1977	15,29	21,56	28,83	2128,8	19,45
1978	15,38	21,63	29,03	2288,5	16,87
1979	15,66	21,87	29,71	1977,6	16,03
1980	16,08	21,80	29,41	2478,4	16,12
1981	16,09	21,52	28,99	2953,8	16,33
1982	16,03	21,72	29,32	2476	17,82
1983	16,26	22,38	29,98	2395,5	18,02
1984	14,93	21,43	28,89	2673	17,85
1985	14,65	21,38	28,42	1954	18,02
1986	15,18	21,53	28,62	2269,5	15,31

Continúa...

... Continuación del Cuadro A.2.

<i>Año</i>	<b>Variables climáticas</b>				
	<b>Temperatura <sup>1/</sup></b>			<b>Precipitación <sup>2/</sup></b>	<b>Radiación <sup>3/</sup></b>
	<b>Mínima</b>	<b>Media</b>	<b>Máxima</b>	<b>Promedio anual</b>	<b>Promedio Anual</b>
1987	15,96	22,13	29,68	2599,4	14,82
1988	15,86	21,82	29,17	2763,4	15,23
1989	15,12	21,40	28,85	2266,7	15,45
1990	15,38	21,73	29,13	2624,8	14,77
1991	15,70	21,67	29,19	2643,8	15,64
1992	15,53	21,77	29,34	2309,7	15,90
1993	16,43	22,64	31,59	2900	16,46
1994	15,48	22,13	31,39	2607	16,13
1995	16,27	22,70	31,73	1982	17,16
1996	15,52	21,94	30,83	3186	15,97
1997	15,98	22,17	31,09	3626	16,70
1998	16,63	22,49	31,55	2684	15,98
1999	14,97	21,52	30,73	3446,8	15,57
2000	15,10	21,59	30,63	3082,3	15,58
2001	14,93	21,89	31,29	3132,2	15,60
2002	15,64	22,02	30,97	3526,7	14,43
2003	16,07	22,33	31,71	3382,4	15,78
2004	15,76	21,95	30,95	2850,3	15,06
2005	15,94	22,27	31,33	3159,7	15,55
2006	16,06	22,04	29,16	2760,1	16,49
2007	15,81	22,22	30,80	2678,8	16,18
2008	16,06	21,99	30,70	3028,5	15,28
2009	15,88	21,91	29,04	2834,7	16,16
2010	16,66	22,20	29,36	3274,2	15,38

Continúa...

... Continuación del Cuadro A.2.

<i>Año</i>	<b>Variables climáticas</b>				
	<b>Temperatura <sup>1/</sup></b>			<b>Precipitación <sup>2/</sup></b>	<b>Radiación <sup>3/</sup></b>
	<b>Mínima</b>	<b>Media</b>	<b>Máxima</b>	<b>Promedio anual</b>	<b>Promedio Anual</b>
2011	16,11	21,98	29,23	2740,1	16,93
2012	15,70	21,89	29,12	2638,7	16,60
2013	16,13	22,33	29,35	1944,9	17,02
2014	16,88	23,01	29,75	2658,9	16,08
2015	16,84	22,80	29,6	2702,6	16,8

<sup>1/</sup> En grados centígrados (°C)

<sup>2/</sup> En milímetros (mm)

<sup>3/</sup> En Megajoules por metro cuadrado (MJ/m<sup>2</sup>)

Fuente: Elaborado a partir de datos de la estación meteorológica CATIE.

Cuadro A. 3.

**Mercado mundial: Precios internacionales del azúcar según año zafra, 1981-1982 a 2015-2016**

<b>Zafra</b>	<b>Precio internacional del azúcar, en dólares nominales</b>	<b>Precio internacional azúcar en dólares reales</b>
1981-1982	0,37	0,57
1982-1983	0,19	0,29
1983-1984	0,19	0,30
1984-1985	0,11	0,19
1985-1986	0,09	0,15
1986-1987	0,13	0,19
1987-1988	0,15	0,20
1988-1989	0,22	0,28
1989-1990	0,28	0,35
1990-1991	0,28	0,33
1991-1992	0,20	0,24
1992-1993	0,20	0,24
1993-1994	0,22	0,26
1994-1995	0,27	0,32
1995-1996	0,29	0,32
1996-1997	0,26	0,29
1997-1998	0,25	0,29
1998-1999	0,20	0,24
1999-2000	0,14	0,17
2000-2001	0,18	0,23
2001-2002	0,19	0,25

Continúa...

... Continuación del Cuadro A.3.

<b>Zafra</b>	<b>Precio internacional del azúcar, en dólares nominales</b>	<b>Precio internacional azúcar en dólares reales</b>
2002-2003	0,15	0,20
2003-2004	0,16	0,20
2004-2005	0,16	0,19
2005-2006	0,22	0,25
2006-2007	0,33	0,36
2007-2008	0,22	0,23
2008-2009	0,28	0,27
2009-2010	0,40	0,41
2010-2011	0,47	0,47
2011-2012	0,57	0,53
2012-2013	0,47	0,44
2013-2014	0,39	0,37
2014-2015	0,37	0,35
2015-2016	0,30	0,28

Fuente: Elaborado a partir de datos del Banco Mundial (2016)