



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS VERACRUZ

POSTGRADO EN AGROECOSISTEMAS TROPICALES

EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL
ESTIMADA Y RENDIMIENTO DE CAÑA DE AZÚCAR EN VERACRUZ

JUAN MANUEL HERNÁNDEZ PÉREZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS

TEPETATES, MANLIO F. ALTAMIRANO, VERACRUZ, MÉXICO

2015

La presente tesis, titulada: **Efecto del cambio climático sobre la evapotranspiración real estimada y rendimiento de caña de azúcar en Veracruz**, realizada por el alumno: **Juan Manuel Hernández Pérez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
AGROECOSISTEMAS TROPICALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. CESÁREO LANDEROS SÁNCHEZ

ASESOR:



DR. JUAN PABLO MARTÍNEZ DÁVILA

ASESOR:



DR. GUSTAVO LÓPEZ ROMERO

ASESOR:



DR. ÁNGEL SOL SÁNCHEZ

Tepetates, Manlio F. Altamirano, Veracruz, 29 de octubre de 2015.

EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL ESTIMADA Y RENDIMIENTO DE CAÑA DE AZÚCAR EN VERACRUZ

Juan Manuel Hernández Pérez, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2015

La caña de azúcar es uno de los principales cultivos en las zonas tropicales y subtropicales, las cuales presentan poca variación climática; sin embargo, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), afirma que la agricultura en zonas tropicales sufrirá grandes cambios en los próximos 100 años por efecto del cambio climático. En el estado de Veracruz, México, la precipitación media anual es alrededor de 1 500 mm y una temperatura promedio anual de 23 °C. No obstante, en los últimos 30 años se han registrado alteraciones en el ciclo hidrológico dentro del Distrito de Riego 035 La Antigua, Veracruz, como resultado del fenómeno del cambio climático, impactando significativamente los patrones de precipitación (Pp), evaporación (Ev) y temperatura (T) de la zona. El objetivo del presente trabajo fue valorar la evapotranspiración real estimada (ETR) de la caña de azúcar, como resultado del incremento en la tasa de evaporación y temperatura, y cambios en los patrones de precipitación registrados en un periodo de 30 años (1980-2010); así como la correspondencia entre la ETR con los rendimientos de caña de azúcar observados en dicho periodo en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, como resultado del cambio climático. La ETR se calculó mediante el uso de los métodos semiempíricos Penman-Monteith FAO, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani y el Tanque Evaporímetro Tipo A. Se encontró que existe una alta correlación entre los métodos Penman-Monteith FAO y Hargreaves-Samani ($r^2=0.9307$). No se observó correspondencia entre la ETR estimada y el rendimiento en campo registrado en la zona de abasto de los ingenios referidos. Finalmente, se observó que existe una alta correlación entre la ETR estimada y la temperatura máxima derivada de los métodos de Penman-Monteith FAO ($r^2=0.9445$) y Hargreaves-Samani ($r^2=0.7773$).

Palabras clave: Impacto del cambio climático, Penman-Monteith FAO, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Tanque Evaporímetro Tipo A.

CLIMATE CHANGE EFFECT ON ESTIMATED REAL EVAPOTRANSPIRATION AND SUGARCANE YIELD IN VERACRUZ

Juan Manuel Hernández Pérez, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2015

The sugarcane is one of the main crops of the tropical and subtropical zones, which present small climate variation. However, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) pronounces that agriculture in tropical zones will experience important changes in the next 100 years due to climate change. In the state of Veracruz, Mexico, the annual rainfall is about 1 500 mm with a mean annual temperature of 23 °C. In the last 30 years, changes in the hydrological cycle in the Irrigation District 035 La Antigua, Veracruz, have also occurred as a result of the climate change, which have had a significant influence on precipitation (Pp), evaporation (Ev) and temperature (T) patterns in the zone. Thus, the objective of this study was to appraise the estimated real evapotranspiration (ETR) of sugarcane as a result of an increase of evaporation and temperature rate and changes in precipitation patterns recorded in a period of 30 years (1980-2010), as well as the relationship between the ETR and the sugarcane yields registered in this period in the sugarcane fields of the sugar factories La Gloria and El Modelo, Veracruz, due to the climate change. The ETR was calculated using the semiempirical methods of Penman-Monteith FAO, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani and a Class A Evaporation Pan. It was found a high correlation between ETR values calculated using Penman-Monteith FAO and Hargreaves-Samani methods ($r^2=0.9307$). There was no relationship between ETR and sugarcane yield recorded in the referred sugarcane fields. Finally, it was observed a high correlation between the maximum temperature and the ETR calculated by using Penman-Monteith FAO ($r^2=0.9445$) and Hargreaves-Samani ($r^2=0.7773$).

Keywords: Climate Change Impact, Penman-Monteith FAO, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Class A Evaporation Pan.

Dedicatoria

Dedico esta tesis especialmente a mis padres, **Juan Manuel Hernández Cortez** y **Laura María Pérez Cruz**, quienes han sido mi más grande ejemplo y, sobre todo, por el gran apoyo incondicional que me han brindado en todas y cada una de las etapas de mi formación personal, profesional y académica.

A mis hermanos, **Laura de Jesús**, **Carlos Esteban**, **Salvador Andrés** y **Edgar Iván**, por su apoyo fraternal en todo momento.

A mis abuelos **Telesforo[†]**, **María Graciela[†]** y **Manuela[†]**, porque siempre me alentaron a superarme y esforzarme en todas mis actividades.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado a través del sistema de becas de postgrado.

A la Línea Prioritaria de Investigación 8 (LPI8): Impacto y Mitigación del Cambio Climático por el financiamiento de este proyecto de investigación.

Al Dr. Cesáreo Landeros Sánchez por todo su apoyo incondicional durante el proceso de mi formación académica, profesional y personal.

A los Doctores Juan Pablo Martínez Dávila y Gustavo López Romero por sus enseñanzas dentro y fuera de clase, las cuales me permiten reforzar los conocimientos adquiridos durante la maestría.

Al Dr. Ángel Sol Sánchez, quien fungiera como líder de la LPI8, por su apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

A los ingenieros de campo de los ingenios La Gloria y El Modelo por la información proporcionada para la realización de este estudio.

Al personal administrativo y secretarial del Campus Veracruz Colegio de Postgraduados (Faby, Laura, Marisela, Ángeles, Sra. Minerva, Sofi y demás personal de apoyo) por su amable y atenta disposición en todos mis trámites realizados durante mi maestría.

A mis compañeros de generación por su apoyo moral y académico: Natalie, Emmanuel, Gabycarmen, Citlalli, Cuervo, Joheli, Francisco, Luling, Sarahi, Lorena, Jorge, Nelson y Alejandro (Los Gordos).

A mis amigos y compañeros del básquet ball por esos partidos que nos sirvieron de distracción después de las clases y las tareas.

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	4
2.1. Tecnológicos.....	4
2.2. Sociales.....	5
2.3. Ambientales.....	5
2.4. Económicos.....	6
3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	8
4. HIPÓTESIS.....	9
5. OBJETIVO.....	10
6. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	11
6.1. Teoría de los Sistemas.....	11
6.2. Teoría del Calentamiento Global del IPCC.....	12
6.3. Concepto de Cambio Climático.....	13
6.4. Concepto de Agroecosistemas.....	13
6.5. Relación Suelo-Planta-Atmósfera.....	14
6.6. Definición de evapotranspiración.....	15
7. MARCO DE REFERENCIA.....	17
7.1. Métodos tradicionales para la estimación de la evapotranspiración.....	17
7.2. Métodos para estimar la evapotranspiración real (ETR) en zonas tropicales.....	18
7.3. Modelos usados en zonas tropicales para estimar la ETR en caña de azúcar.....	19
7.4. Modelos para estimar el rendimiento de caña de azúcar con base en registros climáticos históricos en zonas tropicales.....	20

7.5. Efecto del cambio climático en la ETR de caña de azúcar en regiones tropicales.....	20
7.6. Adaptación del cultivo de caña de azúcar ante el cambio climático en zonas tropicales.....	21
8. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
8.1. Área de estudio.....	22
8.1.1. Clima.....	24
8.2. Fases de investigación.....	25
8.2.1. Fase 1. Integración de la base de datos climática.....	25
8.2.2. Fase 2. Selección de métodos para calcular la ETR en caña de azúcar.....	28
8.2.2.1. Método Penman-Monteith FAO.....	29
8.2.2.2. Método de Blaney-Criddle.....	30
8.2.2.3. Método Hargreaves-Samani.....	30
8.2.2.4. Método del Tanque Evaporímetro Tipo A.....	31
8.2.3. Fase 3. Cálculo de la ETR.....	32
8.2.4. Fase 4. Integración de la base de datos con la ETR calculada y el rendimiento en campo en caña de azúcar.....	32
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
9.1. Fase 1. Gráficas de precipitación, evaporación y temperatura respecto al tiempo.....	34
9.2. Fase 2. Métodos seleccionados para el cálculo de la ETR en caña de azúcar, con base en el análisis realizado.....	40
9.3. Fase 3. Valores de ETR calculados con los métodos seleccionados.....	40
9.4. Fase 4. Correlación entre la ETR y el rendimiento en campo de caña de azúcar.....	45
10. CONCLUSIONES.....	55
11. LITERATURA CITADA.....	56

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Estaciones Climáticas ubicadas dentro de la zona de estudio.....	26
Cuadro 2. Rendimiento en campo en caña de azúcar en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo durante el periodo de 1980-2010.....	33
Cuadro 3. Correlación de la variable de precipitación entre las estaciones climáticas del Distrito de Riego 035 La Antigua, Ver.....	34
Cuadro 4. Correlación de la variable de evaporación entre las estaciones climáticas del Distrito de Riego 035 La Antigua, Ver.....	35
Cuadro 5. Correlación de la variable de temperatura máxima entre las estaciones climáticas del Distrito de Riego 035 La Antigua, Ver.....	35
Cuadro 6. Correlación de la variable de temperatura mínima entre las estaciones climáticas del Distrito de Riego 035 La Antigua, Ver.....	36
Cuadro 7. Métodos seleccionados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia.....	40
Cuadro 8. Agua total consumida anualmente por el cultivo de caña de azúcar en diferentes localidades productoras de caña de azúcar.....	43

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema de la situación problemática en torno al cultivo de caña de azúcar.....	7
Figura 2. Modelo conceptual de la influencia del efecto del cambio climático en el agroecosistema con caña de azúcar.....	16
Figura 3. Localización del Distrito de Riego 035 La Antigua, Veracruz.....	22
Figura 4. Localización de la zona de abasto del ingenio La Gloria, S.A.....	23
Figura 5. Localización de la zona de abasto del ingenio El Modelo.....	24
Figura 6. Captura de la base de datos de los registros de las estaciones climáticas del Distrito de Riego 035 La Antigua, Ver., mediante el software STATISTICA (medias mensuales por año).....	27
Figura 7. Relación entre precipitación (Pp) y temperatura máxima y mínima (T), registradas durante el periodo de 1980-2010 en las estaciones de: a) José Cardel; b) El Diamante; c) Loma Fina; d) Puente Jula; e) Puente Nacional; f) Rinconada; g) Santa Rosa; h) La Mancha; i) Ídolos; y j) Tamarindo (medias mensuales por año).....	38
Figura 8. Relación entre precipitación (Pp) y evaporación (Ev), registradas durante el periodo de 1980-2010 en las estaciones de: a) José Cardel; b) El Diamante; c) Loma Fina; d) Puente Jula; e) Puente Nacional; f) Rinconada; g) Santa Rosa; h) La Mancha; i) Ídolos; y j) Tamarindo (medias mensuales por año).....	39
Figura 9. Evapotranspiración de referencia promedio en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, para cada año del periodo de 1980-2010.....	41
Figura 10. Evapotranspiración real estimada promedio en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, para cada año del periodo de 1980-2010.....	42

Figura 11. Diagrama de dispersión de ET_0 para el análisis de los métodos Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle y Tanque Evaporímetro Tipo A con respecto al método Penman-Monteith FAO.....	43
Figura 12. Diagrama de dispersión de la ETR para el análisis de los métodos Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle y Tanque Evaporímetro Tipo A con respecto al método Penman-Monteith FAO.....	44
Figura 13. Comportamiento del rendimiento en campo de caña de azúcar en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo en relación con la ETR durante el periodo de 1980-2010.....	46
Figura 14. Correlación entre el rendimiento en campo de caña de azúcar registrado en los ingenios La Gloria y El Modelo y la ETR con el método Penman-Monteith FAO.....	47
Figura 15. Correlación entre el rendimiento en campo de caña de azúcar registrado en los ingenios La Gloria y El Modelo y la ETR con el método Hargreaves-Samani.....	47
Figura 16. Correlación entre el rendimiento en campo de caña de azúcar registrado en los ingenios La Gloria y El Modelo y la ETR con el método Blaney-Criddle.....	48
Figura 17. Correlación entre el rendimiento en campo de caña de azúcar registrado en los ingenios La Gloria y El Modelo y la ETR con el método Tanque Evaporímetro Tipo A.....	48
Figura 18. Correlación entre las variables climáticas de precipitación, evaporación y temperatura máxima y mínima, y la ETR por el método Penman-Monteith FAO (media mensual para cada año del periodo estudiado).....	50
Figura 19. Correlación entre las variables climáticas de precipitación, evaporación y temperatura máxima y mínima, y la ETR por el método Hargreaves-Samani (media mensual para cada año del periodo estudiado).....	51
Figura 20. Correlación entre las variables climáticas de precipitación, evaporación y temperatura máxima y mínima, y la ETR por el	

	método Blanney-Criddle (media mensual para cada año del periodo estudiado).....	51
Figura 21.	Correlación entre las variables climáticas de precipitación, evaporación y temperatura máxima y mínima, y la ETR por el método del Tanque Evaporímetro Tipo A (media mensual para cada año del periodo estudiado).....	52

1. INTRODUCCIÓN

El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2007) definió el cambio climático como un fenómeno que se manifiesta en el aumento de la temperatura a nivel mundial, producto de la emisión de gases de efecto invernadero como el vapor de agua, bióxido de carbono, metano, óxido de nitrógeno, entre otros; sumado a lo anterior, actividades antrópicas como la agricultura, la deforestación y las actividades industriales impactan de forma negativa a los ecosistemas, modificando significativamente las condiciones climáticas de una región (Houghton *et al.*, 1990; Solomon *et al.*, 2007).

México no es la excepción ante este fenómeno, su situación geográfica, condiciones climáticas, orográficas e hidrológicas, entre otros factores, contribuyen a que el país sea una de las zonas más vulnerables a los efectos del cambio climático y otros fenómenos meteorológicos que ocurren a nivel mundial (ENACC, 2007).

El impacto de este fenómeno está presente en la disponibilidad de agua, la cual se destina principalmente para riego y, ésta, generalmente disminuye con al incrementarse la tasa de evaporación, como resultado del aumento en la temperatura, y los cambios en los niveles de precipitación. Sin embargo, no hay evidencia de que el uso del agua haya estado históricamente relacionado con el clima en el pasado. Ello se debe, en parte, a la circunstancia de que responde principalmente a factores no climáticos y a la escasa calidad de los datos sobre el uso de agua, en general, y de los datos cronológicos en particular (IPCC, 2007).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) considera que en el estado de Veracruz la mayor cantidad de agua en volumen se utiliza en la agricultura (55%), seguido de la industria (25%); mientras que el abastecimiento para los asentamientos humanos representa únicamente el 12% en volumen y las termoeléctricas el restante 8% (CONAGUA, 2011).

Con base en lo anterior, se infiere que el cambio climático impacta negativamente en la disponibilidad de agua y la evapotranspiración, los cuales son factores de gran importancia para el desarrollo y obtención de un óptimo rendimiento de los cultivos.

El presente estudio se enfocó al conocimiento del impacto del cambio climático sobre la evapotranspiración real estimada y la relación de ésta con el rendimiento de caña de azúcar utilizándose datos climáticos históricos del periodo de 1980 a 2010, registrados en las estaciones climáticas del Distrito de Riego (DDR) 035 La Antigua, Ver.

A continuación se describe brevemente el contenido de este trabajo de investigación. En la Introducción, se describe un panorama general de los efectos que produce el fenómeno del cambio climático en la disponibilidad de agua y la evapotranspiración en los cultivos, específicamente en el cultivo de la caña de azúcar; la Situación Problemática permitió conocer los problemas en torno al cultivo de caña de azúcar e identificar el impacto que tiene el fenómeno del cambio climático sobre éste; en el Problema de Investigación se describió el problema central de este estudio desde el enfoque de los agroecosistemas tropicales; se enuncia la Hipótesis General a comprobar, y se detallan las hipótesis particulares; así como los Objetivos Generales y Particulares.

En el Marco Teórico Conceptual se mencionaron las teorías y conceptos en los cuales se fundamenta el presente trabajo de investigación; la sección correspondiente a Marco de Referencia incluye investigaciones realizadas previamente para el cálculo de la evapotranspiración real, bajo características similares, a nivel mundial y que sirvieron de apoyo al desarrollo de este trabajo; en Materiales y Métodos se describió la zona de estudio, así como las fases de esta investigación; la sección de Resultados y Discusión muestra los resultados obtenidos en este estudio, tales como la evapotranspiración real estimada por los cuatro métodos seleccionados y la correlación que existe entre ésta y el rendimiento en campo de caña de azúcar; asimismo, se incluye una discusión entre éstos y los resultados obtenidos en otros trabajos de investigación.

Finalmente, se presentan las Conclusiones de esta investigación, con base en las hipótesis de trabajo planteadas.

2. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Moyer (2010) reportó que la producción primaria de caña de azúcar enfrenta serios retos por efecto del cambio climático. México es el segundo país más vulnerable a este fenómeno, solo después de la India y, bajo esta perspectiva, la producción agrícola nacional podría caer en más de un 25% hacia el año 2080.

Considerando lo anterior, el agroecosistema (AES) con caña de azúcar ha mostrado vulnerabilidad ante las variaciones climáticas, como son la distribución errática de las precipitaciones pluviales y los periodos prolongados de sequías, las cuales se traducen en un bajo rendimiento en campo del cultivo.

Otros factores que influyen en los rendimientos que se obtienen en este cultivo son:

2.1. Tecnológicos.

- **Prácticas ineficientes del manejo del cultivo.** El cultivo de caña de azúcar presenta prácticas ineficientes de manejo del cultivo, las cuales se aprecian principalmente durante la preparación del suelo antes de la siembra (soca), al igual que la resiembra (resoca); de igual manera, se puede observar en el proceso de aplicación de fertilizantes nitrogenados e incorporación de materia orgánica, además de otros manejos como el control de plagas y malezas (Moreno-Seceña, 2010).
- **Operación de infraestructura hidroagrícola ineficiente.** La capacitación que se imparte a los técnicos y canaleros de los Módulos de Riego del Distrito de Riego 035 La Antigua, Veracruz, se considera no suficiente y debe ser intensificada, ya que ellos operan la infraestructura hidroagrícola para la aplicación del riego a las parcelas cultivadas con caña de azúcar.
- **Falta de innovación y mantenimiento de la infraestructura hidroagrícola.** Los programas de mantenimiento orientados a la infraestructura hidroagrícola de

los Módulos de Riego arriba referidos no se ejecutan con oportunidad y la frecuencia requerida, debido a los escasos recursos financieros de la mayoría de los productores cañeros. Lo que resulta en bajas eficiencias de riego a nivel parcelario. Esta situación hace necesaria la existencia de programas de apoyo a la agricultura, como es el caso de los cañeros, por parte de los diferentes niveles de gobierno, los cuales puedan resultar en una modernización efectiva de la mencionada infraestructura en las zonas productoras de caña de azúcar (Contreras-Gallardo, 2008).

2.2. Sociales.

- **Falta de organización de productores.** Esto dificulta el acceso a apoyos gubernamentales por parte de los productores de caña de azúcar. Aunado a lo anterior, la mayoría de los productores no cuentan con una administración eficiente de sus recursos financieros. Situación que hace más difícil que éstos puedan tener acceso a los apoyos económicos gubernamentales.
- **Desconocimiento, por parte de los productores y otros actores, del fenómeno de cambio climático y sus impactos en la producción.** Este problema se observa en el deficiente manejo de su cultivo durante la aplicación de fertilizantes nitrogenados y durante la zafra, debido a la desinformación por parte de los productores acerca del tema del cambio climático y, los efectos de este fenómeno en la disponibilidad de agua, causando inundaciones o desabasto de este recurso; además, el incremento de la temperatura, que se puede reflejar en la evapotranspiración del cultivo, así como pueden prolongar las sequías (Guerrero-Carrera, 2013).

2.3. Ambientales.

- **Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante la fertilización del cultivo y la quema de la caña de azúcar.** Las consecuencias de un manejo ineficiente de fertilizantes nitrogenados pueden ser la pérdida del nitrógeno a través de los procesos siguientes: lixiviación hacia el acuífero; transporte

superficial con la escorrentía hacia cuerpos receptores de agua; fijación en partículas del suelo; y volatilización hacia la atmósfera. Además, durante la quema de la caña de azúcar, previa a la cosecha de la misma, se contribuye de manera significativa a la emisión de gases de efecto invernadero como son gases de carbón, azufre y nitrógeno (Cabrera y Zuaznabár, 2010).

- **Contaminación del agua superficial y subterránea por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados.** El principal factor que contribuye a esta problemática es el ineficiente manejo y la incorrecta dosificación de los fertilizantes nitrogenados, que como resultado de las precipitaciones, las escorrentías y el deficiente sistema de riego y drenaje, provoca la lixiviación masiva de éste (Landeros-Sánchez, 2007).

2.4. Económicos.

- Falta de recursos financieros para el mejoramiento o innovación de la infraestructura hidroagrícola como son sistemas de riego, canales de conducción y drenaje. Como se mencionó anteriormente, la falta de organización de los productores cañeros, no permite que ellos puedan acceder a los recursos del gobierno federal para establecer sistemas de riego que les brinden mejores eficiencias de conducción interparcelaria, incrementando de esta forma los rendimientos en campo.

Analizando los problemas en relación con el cultivo de caña de azúcar, muchos de éstos son atribuibles a la organización productores y al manejo que éstos practican en este cultivo. Sin embargo, el problema que concierne a esta investigación se refiere al bajo rendimiento en campo de caña de azúcar, a consecuencia del estrés hídrico, resultado del efecto del cambio climático observado en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo durante el periodo de 1980 a 2010.



Figura 1. Esquema de la situación problemática en torno al cultivo de caña de azúcar.

3.- PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con lo reportado por el Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA, 2012), la superficie de temporal está cada vez más expuesta a los efectos del cambio climático (sequías, inundaciones, entre otros), lo que representa un problema para el cultivo de la caña de azúcar.

Considerando esta premisa, el rendimiento en campo del cultivo de caña de azúcar se ve impactado negativamente como resultado del estrés hídrico al cual se somete este cultivo. Lo anterior, se relaciona con una alta evapotranspiración y una baja disponibilidad de agua debido, entre otras causas, al efecto del cambio climático que se ha venido manifestando en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo.

Por lo que el problema de investigación que se aborda en este estudio se puede enunciar mediante la pregunta siguiente: ¿Cuál es el impacto del cambio climático en la evapotranspiración real estimada y la correspondencia de ésta con los rendimientos del cultivo de caña de azúcar registrados en los ingenios La Gloria y El Modelo, Veracruz, durante el periodo de 1980 a 2010?

4. HIPÓTESIS

4.1. Hipótesis General.

Existe un aumento en la evapotranspiración real estimada (ETR) de la caña de azúcar debido a incrementos en la tasa de evaporación y temperatura, y cambios en los patrones de precipitación registrados en un periodo de 30 años (1980-2010); así como una correspondencia entre la ETR con los rendimientos de caña de azúcar observados en dicho periodo en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, como resultado del cambio climático.

4.2. Hipótesis Particulares.

4.2.1. Las variaciones climáticas en precipitación (P_p), evaporación (E_v) y temperatura (T), como una expresión del cambio climático, influyen en el incremento de la ETR en caña de azúcar.

4.2.2. Existe una correspondencia entre el consumo de agua, determinado por la ETR, y el rendimiento en campo registrado en caña de azúcar en los ingenios La Gloria y El Modelo, como resultado del cambio climático.

5. OBJETIVO

5.1. Objetivo General.

Valorar la evapotranspiración real estimada (ETR) de la caña de azúcar, como resultado del incremento en la tasa de evaporación y temperatura, y cambios en los patrones de precipitación registrados en un periodo de 30 años (1980-2010); así como la correspondencia entre la ETR con los rendimientos de caña de azúcar observados en dicho periodo en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, como resultado del cambio climático.

5.2. Objetivos Particulares.

- 5.2.1. Conocer la correlación que existe entre las variables climáticas tales como precipitación (Pp), evaporación (Ev) y temperatura (T), como una expresión del cambio climático, y la ETR en caña de azúcar.
- 5.2.2. Conocer la correspondencia entre el consumo de agua, determinado por la ETR, y el rendimiento en campo registrado en caña de azúcar en los ingenios La Gloria y El Modelo, como resultado del cambio climático.

6. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

6.1. Teoría de los Sistemas.

Los sistemas siempre han estado presentes en todos lados, desde las células hasta el cuerpo humano, solo que hasta ahora se le ha dado mayor importancia en los estudios (O'Connor y McDermott, 1998).

En la definición más simple se identifica a los sistemas como conjuntos de elementos que guardan estrechas relaciones entre sí, que mantienen al sistema directo o indirectamente unido de modo más o menos estable y cuyo comportamiento global persigue, normalmente, algún tipo de objetivo. Esta definición supone que los procesos sistémicos internos deben ser complementados con una concepción de sistemas abiertos, en donde queda establecida una condición para la continuidad sistémica y el establecimiento de un flujo de relaciones con el ambiente.

Bertalanffy (1976) mencionó que se puede hablar de una filosofía de sistemas, ya que toda teoría científica de gran alcance tiene aspectos metafísicos. De igual manera, señaló que "teoría" no debe entenderse en su sentido restringido, esto es, matemático; sino que la palabra teoría está más cercana, en su definición, a la idea de paradigma de Kuhn. Con base en lo anterior, Bertalanffy consideró que el objeto de estudio de todas las ciencias deberían ser los sistemas.

Otro concepto analizado con respecto a la teoría de sistemas nos permite entender a un sistema como un fenómeno social, como un todo, y a cada uno de los componentes que lo integran. Asimismo, un sistema está compuesto por una estructura de elementos y una organización entre ellos; estos elementos constituyen la estructura y las propiedades del sistema. Lo anterior permite la organización, a fin de realizar actividades y alcanzar un objetivo (Arrascaeta, 2007; Eguiluz, 2007; Vega, 1988).

Autores como Johansen (1993) agregaron características adicionales a estos conceptos, señalando que un sistema es un grupo de partes y objetos que interactúan

y que forman un todo o que se encuentran bajo la influencia de fuerzas en alguna relación definida.

Por tal motivo, la teoría de sistemas nos permite comprender los fenómenos desde una perspectiva holística, de manera que se genere una relación integral y organizada de todos los factores involucrados en la investigación.

6.2. Teoría del Calentamiento Global del IPCC.

El calentamiento global es una teoría que predice, a partir de proyecciones (escenarios) basadas en simulaciones computacionales, un aumento en las temperaturas a futuro, aproximadamente en unos 5 °C o más (IPCC, 2007).

En los últimos 20 000 años el suceso climático más importante sucedió al final de la Edad de Hielo, hace aproximadamente 12 000 años, y el más reciente fue observado durante el siglo XX, en el que la temperatura se incrementó en aproximadamente 0.4 a 0.8 °C. De tal manera que, el tiempo sobre el que el calentamiento global puede observarse varía según el punto de vista. Fue hasta la Revolución Industrial cuando se comenzó a registrar históricamente el cambio global de la temperatura, aunque se menciona que solo existen registros de los últimos 50 años. De acuerdo a lo anterior, se da por hecho que las temperaturas han permanecido relativamente estables.

Para analizar el calentamiento global existe una gran variedad de modelos de acuerdo a las características que se requieran estudiar de este fenómeno. El IPCC utiliza varios modelos de simulación, de los cuales uno de ellos establece un incremento exponencial del CO₂ a razón del 1% anual; otro de los modelos más generales que utiliza, sobre del calentamiento global, es el Modelo de Circulación General Atmosférica y Oceánica (MCGAO). Éste resuelve las ecuaciones de la atmósfera y los océanos aproximadamente mediante el desglose de sus dominios en rejillas volumétricas o cajas, a cada una de las cuales se le asigna un valor promedio para propiedades como velocidad, temperatura, humedad (de la atmósfera) y salinidad (de los océanos).

Es importante considerar que calentamiento global no es sinónimo de cambio climático; sin embargo, es pertinente conocer la relación que existe entre ambos fenómenos.

6.3. Concepto de Cambio Climático.

Se debe entender al 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 (CMNUCC, 1992; IPCC, 2014).

Autores como Miller (2007), sostuvo que el cambio climático global se refiere a las modificaciones en cualquier aspecto del clima del planeta, tales como la temperatura, precipitación e intensidad y las rutas de las tormentas.

Por otra parte, el IPCC (2007) lo definió como un cambio en el estado del clima identificable, mediante análisis estadísticos, a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Lo anterior se refiere a que todo cambio del clima, a lo largo del tiempo, se debe a la variabilidad natural como también si es consecuencia de la actividad humana.

6.4. Concepto de Agroecosistemas.

Primero debemos entender que un agroecosistema puede estar constituido epistemológicamente por la palabra *ager*, que significa tierra o relativo al campo; *eco*, lo relacionado con la ecología, esto es, los seres vivos; y *sistema*, del latín *systema*, proveniente del griego *σύστημα*, como un conjunto de partes o elementos organizadas y relacionadas que interactúan entre sí para lograr un objetivo.

Diversos autores han conceptualizado el agroecosistema, entre ellos, Marten (1988) mencionó que un agroecosistema es un complejo integrado por aire, agua, suelo, plantas, animales, microorganismos y todo lo demás, en una zona delimitada que ha sido modificado por personas a los efectos de la producción agrícola y ganadera.

El enfoque de sistemas aplicado a la producción agrícola implica elementos, interrelación entre ellos, límites, entradas y salidas, procesos de retroalimentación, transformación, comunicación, control y niveles jerárquicos, en donde cada sistema es componente de un suprasistema y este incluye a una serie de subsistemas (Checkland, 1981).

Para Okey (1996) es un conjunto de ecosistemas especializados, que son controlados para la generación de productos agropecuarios.

Soriano y Aguiar (1998), reportaron que un agroecosistema puede ser entendido como un ecosistema que es sometido por el hombre a frecuentes modificaciones de sus componentes bióticos y abióticos. Estas modificaciones afectan prácticamente a todos los procesos estudiados por los ecólogos y abarcan desde el comportamiento de los individuos y la dinámica de las poblaciones hasta la composición de las comunidades y los flujos de materia y energía (Ghersa y Martínez-Ghersa 1991, Hald 1999).

Una vez que el ecosistema natural es modificado y convertido en un agroecosistema, la estabilidad biológica y la elasticidad original se alteran y son reemplazados por una combinación de factores ecológicos y socio-económicos que deberían buscar estabilidad, continuidad y producción.

6.5. Relación Suelo-Planta-Atmósfera.

Se puede considerar el conjunto suelo-planta-atmósfera como un sistema físico uniforme en el que varios procesos de flujo ocurren independientemente como eslabones de una cadena.

Este sistema uniforme se ha denominado C.S.P.A. significando Continuo Suelo Planta Atmósfera (Hillel, 1990) y en él, el flujo de agua se hace desde sitios con alta energía potencial a otros con baja, con el concepto de potencial agua igualmente válido y aplicable tanto en suelo, planta y atmósfera.

Las raíces de la mayoría de las plantas toman el agua de la zona insaturada ya que para respirar requieren un adecuado suministro de oxígeno del aire del suelo.

Para caracterizar físicamente este sistema, es necesario evaluar el potencial energético del agua y su cambio con la distancia y tiempo a lo largo del camino que recorre. Las diferencias de potencial en las distintas partes del sistema son proporcionales a la resistencia al flujo. Esta resistencia generalmente es mayor en el suelo que en la planta y aún superior en la transmisión de las hojas a la atmósfera donde el agua cambia su estado de líquido a vapor y debe salir por difusión (proceso lento).

6.6. Definición de evapotranspiración.

En condiciones naturales evaporación y transpiración son fenómenos interdependientes. El concepto de evapotranspiración se introdujo debido a la dificultad de discriminar evaporación y transpiración.

Así, se entiende que la evapotranspiración es el resultado del proceso por el cual, el agua cambia de estado líquido a gaseoso, y directamente, o a través de las plantas, vuelve a la atmósfera en forma de vapor. Sin embargo, este término solo es aplicable a una determinada área de terreno cubierta por vegetación. Ante la ausencia de vegetación, sólo se puede hablar de evaporación.

De forma conceptual, la evapotranspiración (ET) es el proceso por el cual el agua es transferida desde la superficie terrestre hacia la atmósfera, incluyendo tanto la evaporación de agua en forma sólida como líquida directamente del suelo o desde las superficies vegetales vivas o muertas (rocío, escarcha, lluvia interceptada por la vegetación), así como las pérdidas de agua a través de las superficies vegetales, particularmente las hojas.

La evapotranspiración constituye la transferencia total de agua desde una superficie cubierta con vegetación hacia la atmósfera. A su vez, ésta depende, entre otros, de dos

factores muy variables y difíciles de medir como son el contenido de humedad de suelo y el desarrollo vegetal de la planta.

Con base en las teorías y conceptos descritos en este capítulo, se planteó un modelo conceptual acerca de la influencia del cambio climático sobre la evapotranspiración real y el rendimiento en campo en un agroecosistema con caña de azúcar (Figura 2).

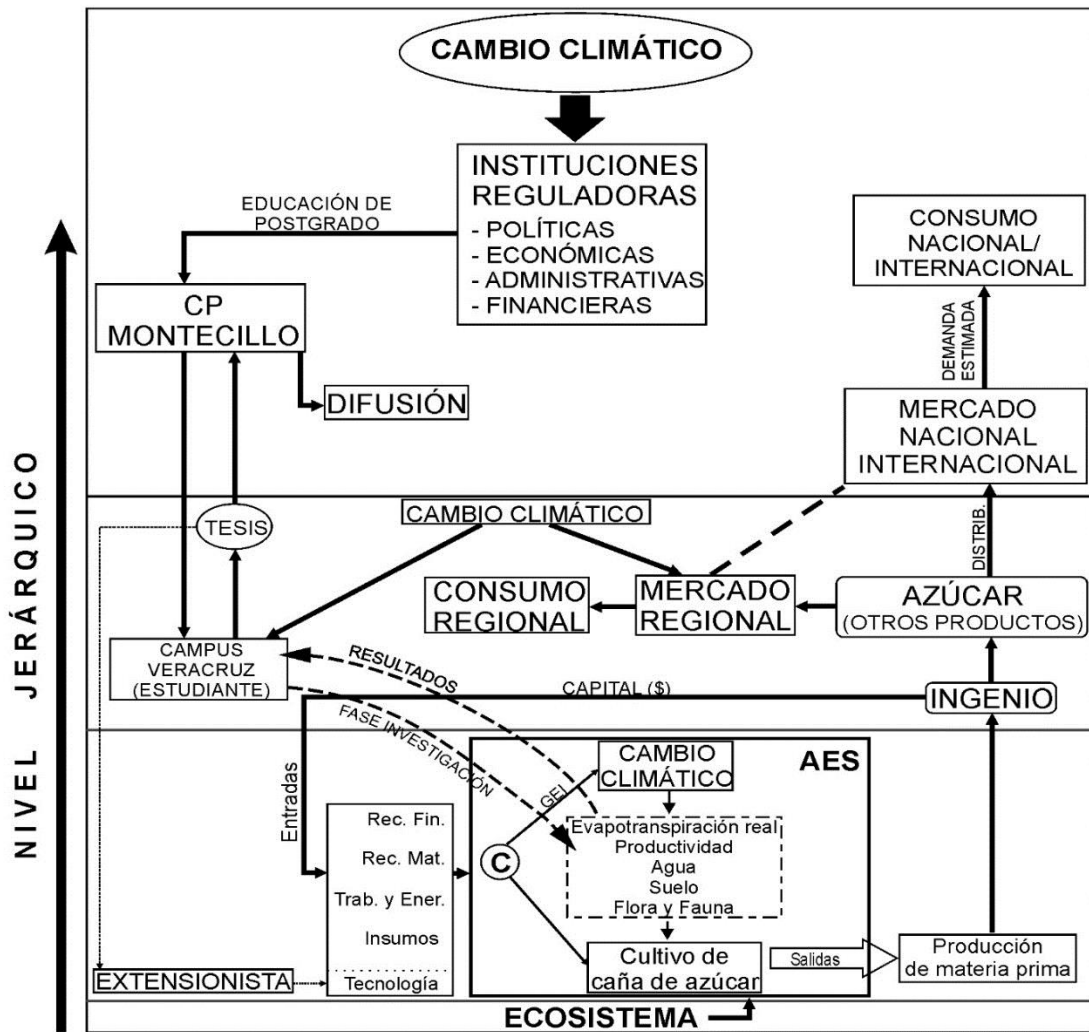


Figura 2. Modelo conceptual de la influencia del efecto del cambio climático en el agroecosistema con caña de azúcar.

7. MARCO DE REFERENCIA

En esta sección se realizó una revisión de literatura referente a los trabajos de investigación relacionados con los métodos y los modelos utilizados para calcular la evapotranspiración real (ETR) por medio de la evapotranspiración potencial de referencia (ET_0), en zonas tropicales; además, se consultó la literatura acerca de los modelos empleados para calcular los rendimientos en campo en caña de azúcar.

Por otra parte, se revisaron trabajos de investigación en los cuales se relaciona el efecto del cambio climático con el agroecosistema (AES) con caña de azúcar.

7.1. Métodos tradicionales para la estimación de la evapotranspiración.

Existen numerosas expresiones empíricas y métodos para la estimación de la evapotranspiración, sin olvidar el muy utilizado y simple método del coeficiente de corrección aplicado al valor de evaporación de tanque.

Entre las fórmulas empíricas se pueden citar las esencialmente “térmicas” como las de Thornthwaite, Blaney-Cridde y Hargreaves; las fórmulas esencialmente “radiactivas” donde la radiación solar medida u estimada es preponderante y otras fórmulas empíricas en donde se propone un ajuste de la evapotranspiración de acuerdo al déficit de saturación de la atmósfera y correcciones mediante funciones de viento para tener en cuenta los efectos aerodinámicos. La fórmula más conocida es la ecuación de Penman con todas sus modificaciones y mejoras aportadas.

Con base en la cantidad de métodos y modelos disponibles para estimar la evapotranspiración, se pueden agrupar en líneas generales tres grupos a) los que utilizan balances tanto de energía como hídricos; b) los que utilizan ecuaciones empíricas o semiempíricas basadas en relaciones regionales entre la medida de la evapotranspiración y las condiciones climáticas, y que precisan de parámetros y coeficientes que necesitan ser validados para los cultivos y las zonas de estudio; y por último, c) los que reproducen el proceso físico de la evapotranspiración considerando

en detalle las características climáticas y los movimientos del agua desde el suelo y la planta considerando las resistencias involucradas en el mismo.

En agricultura, la evapotranspiración real (ETR) se calcula indirectamente usando la evapotranspiración potencial de referencia (ET_0), la cual es corregida por un coeficiente de cultivo específico para cada especie agrícola. La ETR se puede medir directamente usando los métodos micrometeorológicos (sistemas Bowen y flujos turbulentos) y del balance hídrico (lisímetro de pesada). Estos instrumentos son utilizados en centros de investigación, para desarrollar coeficientes de cultivo y realizar calibraciones de métodos empíricos que relacionan la ETR con una o más variables meteorológicas (De Juan Valero y Martín de Santa Olalla, 1992).

7.2. Métodos para estimar la evapotranspiración real (ETR) en zonas tropicales.

Tal como lo reportado por Jiménez y Hernández (1990), para la década de los 90 existían pocos estudios sobre la ETR en las zonas tropicales, a pesar de su gran importancia en la producción agrícola, tanto a nivel regional como a nivel de finca. Considerando lo anterior, la necesidad de información y la carencia de métodos alternativos de estimación, ocasionaron que, en muchos países tropicales, se hayan usado con frecuencia, y en forma discriminada, fórmulas empíricas sin una adecuada calibración a las condiciones locales, situación que llevó a cálculos imprecisos de la evapotranspiración.

En muchos países el cálculo de la evapotranspiración de los cultivos ha sido objeto de investigación, tal como la búsqueda de un método que se adapte a las condiciones particulares de éstos y, que a la vez, su aplicación sea fácil. Numerosas aproximaciones se realizan para estimar la evapotranspiración (Doorenbos y Pruitt, 1977; Jensen, 1974), sin embargo, cada método presenta sus ventajas y desventajas para ser utilizado desde el punto de vista práctico, pero ninguno es aplicable bajo las mismas condiciones (Hill, 1977; Linsley *et al.*, 1975; Luis *et al.*, 1988).

Varios investigadores han sugerido que la ecuación de Penman-Monteith puede ser utilizada para estimar directamente la ETR de diferentes cultivos bajo diferentes condiciones atmosféricas (Abtew and Obeysekera, 1995; Howell *et al.*, 1995; Ortíz, 1996; Rana *et al.*, 1997). Para esto, el método Penman-Monteith requiere de mediciones simultáneas de temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. Estas variables climáticas pueden ser registradas a través del uso de estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) que son más baratas y fáciles de mantener en comparación con los métodos micrometeorológicos y de balance hídrico.

7.3. Modelos usados en zonas tropicales para estimar la ETR en caña de azúcar.

Como precedente en la construcción de modelos matemáticos para el cálculo de la evapotranspiración en caña de azúcar, Romero (1991) formuló un modelo utilizando resultados experimentales de 10 cosechas de planta de caña y 10 retoños para las diferentes fechas de plantación y corte, tipos de suelo y variedades. Además de lo anterior, se utilizaron variables climáticas como temperatura media del aire (t , °C), precipitación (p , mm), evaporación (E_v , mm), velocidad del viento (V_v , $m\ s^{-1}$), humedad relativa (H_r , %) y horas de iluminación (I).

Otros estudios realizados en países como Cuba, donde el cultivo de caña de azúcar es una de las principales producciones agrícolas, han propuesto modelos que permiten la estimación de la evapotranspiración en caña de azúcar a partir de los grados días acumulados (GD) durante su ciclo de crecimiento monomodal, utilizando datos sobre el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas, así como la evapotranspiración mensual (Lamelas *et al.*, 2008).

Estudios anteriores han propuesto algunos modelos de estimación de la evapotranspiración con base en información satelital del clima, de los cuales se tienen modelos como los que determinan Fracción de Evapotranspiración (EF), Índice de Temperatura de la Cubierta Vegetal (TVCI) y Déficit de Presión de Vapor (DPV).

7.4. Modelos para estimar el rendimiento de caña de azúcar con base en registros climáticos históricos en zonas tropicales.

El modelo Brcane de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) se hizo para predecir el rendimiento potencial bajo escenarios de cambio climático para analizar la sostenibilidad de las nuevas áreas de cultivo. El modelo BRCane es el compost de una serie de ecuaciones que describen el comportamiento fisiológico de la planta en respuesta de las condiciones ambientales.

El modelo BRCANE es compuesto por las ecuaciones que describen el comportamiento fisiológico debido a las condiciones del ambiente térmico promedio de las variables y constantes.

7.5. Efecto del cambio climático en la ETR de caña de azúcar en regiones tropicales.

En zonas menos dotadas de agua, principalmente en los trópicos, el aumento de la temperatura incrementará las pérdidas por evapotranspiración y reducirá los niveles de humedad del suelo. Algunas áreas cultivadas se harán inadecuadas para el cultivo y zonas de pastos tropicales se pueden hacer cada vez más áridas. El aumento de la temperatura también hará que aumente la gama de insectos dañinos para la agricultura e incrementará la capacidad de supervivencia de las plagas durante el invierno, que dañaran los cultivos de primavera (IPCC, 2007).

Temperaturas globales más altas también harán que aumente la precipitación, pero las lluvias no se distribuirán de la misma manera entre las distintas regiones; está previsto que algunas zonas tropicales de Asia meridional y el norte de América Latina, recibirán menos precipitaciones que antes (UNEP/WMO, 1994). La escasez de agua y los períodos de disponibilidad limitarán cada vez más las producciones.

7.6. Adaptación del cultivo de caña de azúcar ante el cambio climático en zonas tropicales.

Una de las medidas de adaptación consideradas para el cultivo de la caña de azúcar es la utilización de máquinas cosechadoras de última generación que ofrecen la capacidad de cosechar áreas sin quemar, con volúmenes altos de producción de manera óptima. Entre los beneficios de la “cosecha en verde”, además de los ambientales, están la conservación de la humedad del suelo, la restitución de nutrientes, un menor requerimiento de herbicidas y el incremento de materia orgánica.

Es posible desarrollar una agricultura cañera con técnicas orgánicas con un mínimo de insumos químicos contaminantes del medio ambiente. Por tanto, La cosecha de la caña sin quemar constituye un aspecto decisivo para la protección del medio ambiente.

8. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se delimitó el área de estudio comprendida por las zonas de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, ubicadas dentro del Distrito de Riego 035 La Antigua, Veracruz; así como también, se describió el proceso metodológico empleado en el análisis de la información registrada en las estaciones climáticas ubicadas en la referida área de estudio; y además, se realizó una descripción de los métodos seleccionados para el cálculo de la ETR.

8.1. Área de estudio.

La presente investigación se realizó en el área comprendida por la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, ubicados dentro del Distrito de Riego 035 La Antigua, Ver., el cual encuentra en la región central del estado de Veracruz y abarca los municipios de Úrsulo Galván, La Antigua, Puente Nacional, Paso de Ovejas y Actopan (Figura 3).

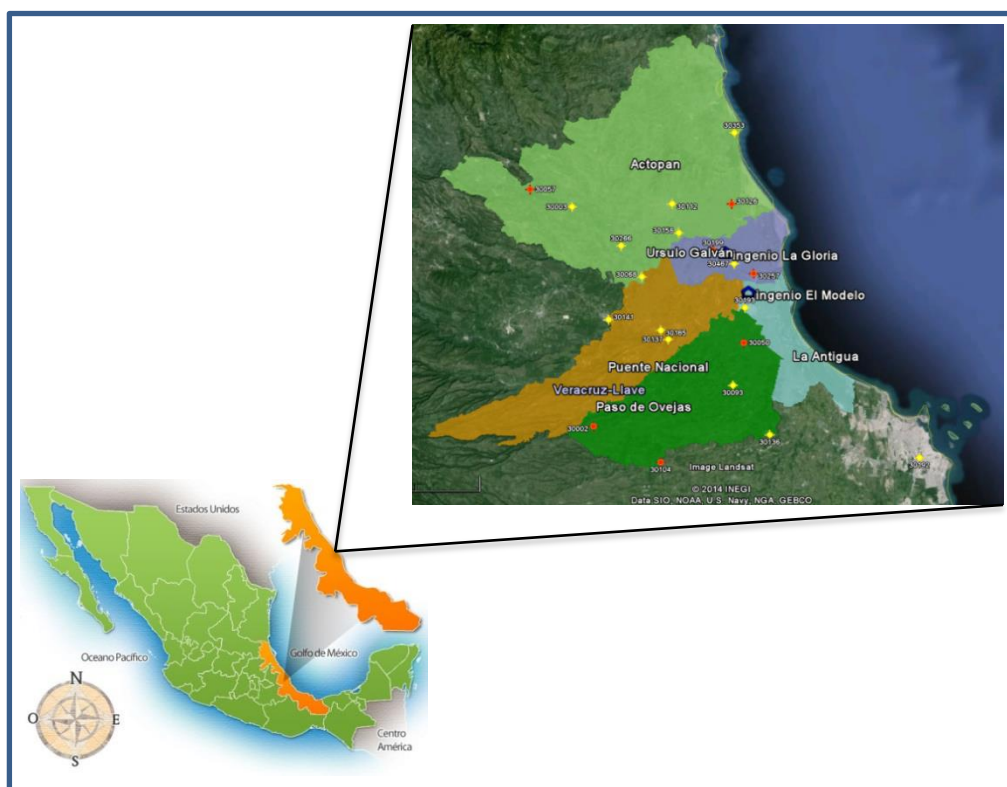


Figura 3. Localización del Distrito de Riego 035 La Antigua, Veracruz.

El referido Distrito de Riego se localiza a 50 km al sureste de la ciudad de Xalapa y a 25 km al noroeste del puerto de Veracruz, dentro de la región conocida como Llanuras de Sotavento, colindando con las Altas Montañas por su parte norte. Geográficamente se localiza entre las coordenadas 19°09"00" y 19°31"48" de Latitud Norte y 96°18"00" y 96°37"12" de Longitud Oeste de Greenwich.

Por otra parte, el Ingenio La Gloria, S.A. se encuentra situado aproximadamente 35 km al noroeste del Puerto de Veracruz, ubicado en el municipio de Úrsulo Galván; el ingenio La Gloria limita al norte con Actopan, al este con el Golfo de México, al sur con Puente Nacional. Se encuentra situado en la zona central costera del estado (Figura 4). Las principales localidades que comprende el ingenio se encuentran San Isidro, Chalahuite, Santa Rosa, Arroyo de Piedra, Jareros, Mata Verde, El Zapotito, Villa Zempoala, La Gloria, Paso del Bobo, El Arenal, El Palmar, Guayabal, La Antigua (PRONAC, 2009).

La Gloria se localiza en la región XIII Costa de Veracruz, situada en la costa del Golfo de México, entre los 19° 15' y 20° 30' latitud norte y los 96° 30' y 97° 30' longitud oeste. Los campos cañeros se localizan entre 10 y 150 msnm. Climas: semiseco a húmedo con deficiencia pluvial hasta de unos 50 cm en invierno y excedentes de más de 15 cm en verano-otoño; cálido, con régimen uniforme de temperatura (Flores, 1994).

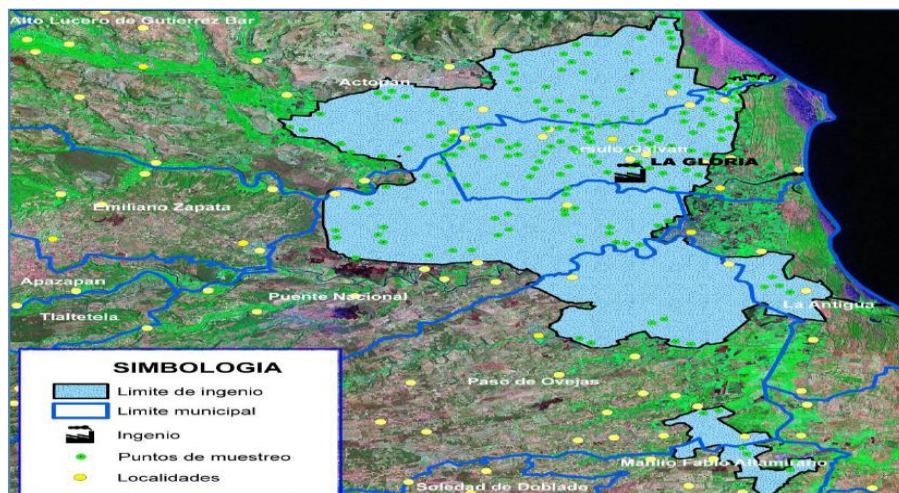


Figura 4. Localización de la zona de abasto del ingenio La Gloria, S.A.

De igual manera, se contempló el área de abastecimiento del ingenio El Modelo, el cual tiene una superficie de 11 982.5 ha (91% de riego y 9% de temporal) ubicada entre los 96° 17' 54.5" y 96° 33' 26.4" longitud oeste y 19° 09' 48.7" y 19° 39' 45.4" de latitud norte, con zonas de abasto principalmente en los municipios de Úrsulo Galván, Puente Nacional, Actopan, Manlio F. Altamirano, Paso de Ovejas y La Antigua (Figura 5).

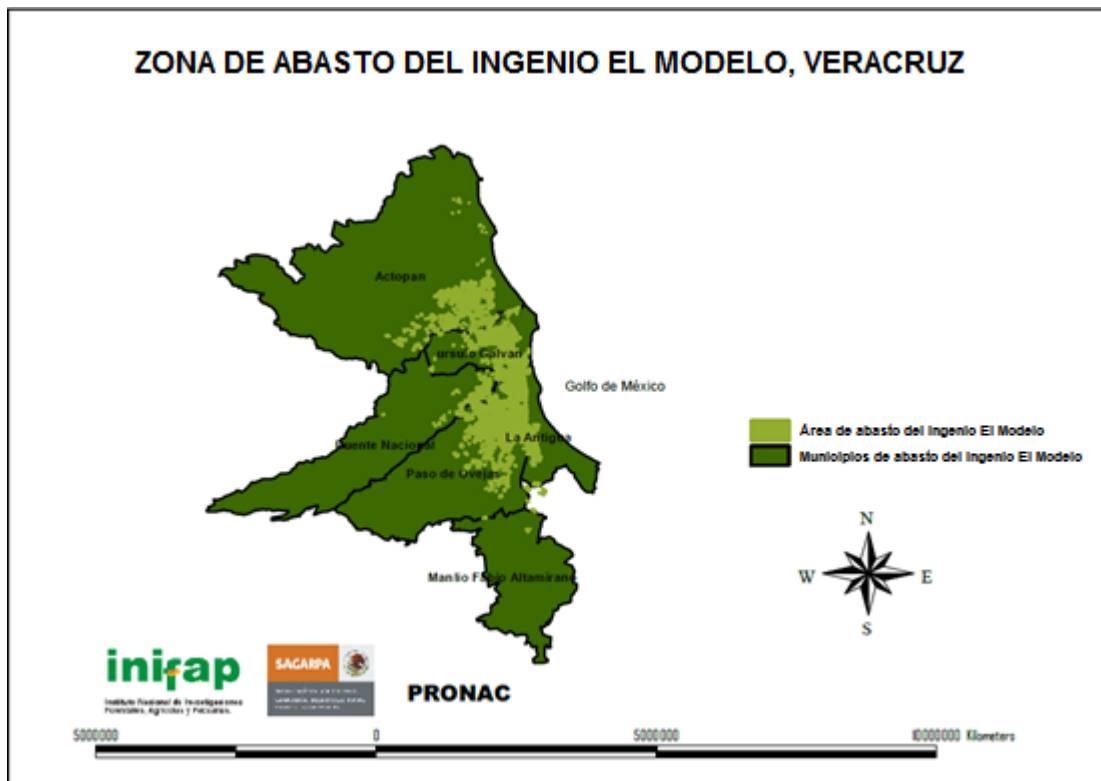


Figura 5. Localización de la zona de abasto del ingenio El Modelo.

8.1.1. Clima.

El clima predominante en el Distrito de Riego 035 La Antigua, Ver., (DR035), de acuerdo con el criterio del segundo sistema de Thornthwaite, con la información observada en la estación climatológica José Cardel y Puente Jula, se clasifica como ligeramente húmedo con invierno seco, con deficiencia de agua invernal, cálido, con régimen normal de calor en verano. La temperatura media anual es de 26 °C; las temperaturas máximas y mínimas extremas son de 43 °C en mayo y 11 °C en febrero; la precipitación media anual, varía entre los 1 637.4 mm a 902.2 mm y ocurre en los meses de mayo a noviembre.

Sin embargo, en el Módulo de Riego III-1 Puente Nacional, se registran precipitaciones por debajo de los 800 mm anuales, en la estación climatológica Tamarindo y se tienen registros de una evaporación media anual alrededor de 1 483.9 mm.

En la zona dominan vientos del norte que alcanzan velocidades de 73.1 km/h que coincide con los meses secos. Ocasionalmente y durante los meses de septiembre y octubre, el distrito sufre los embates de las perturbaciones de los ciclones que se forman en el Golfo de México (SARH, 1982).

8.2. Fases de investigación.

Con la finalidad de alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación, a continuación se describe, en cuatro fases, el proceso metodológico de la misma.

La primera fase consistió en la integración de una base de datos con información de temperatura, evaporación, precipitación y rendimiento de la caña de azúcar durante el periodo 1980-2010 en la zona centro del estado de Veracruz. En la segunda fase se definieron métodos para estimar la evapotranspiración real de la caña de azúcar en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo del estado de Veracruz, con base en datos climáticos históricos registrados en el mismo periodo de tiempo.

Durante la tercera fase se realizaron los cálculos correspondientes de la ETR estimada con base en los modelos seleccionados y las variables climáticas incluidas en la base de datos. Por último, en la cuarta fase, se correlacionó la ETR estimada contra los patrones de temperatura, evaporación, precipitación y rendimiento en campo de caña de azúcar para conocer el impacto del cambio climático en la ETR estimada en el periodo de estudio.

8.2.1. Fase 1. Integración de la base de datos climática.

En la primera fase se integró una base de datos que contenía información de temperatura, evaporación, precipitación y rendimiento de la caña de azúcar durante los últimos 30 años en la zona centro del estado de Veracruz; para esto último se

consultaron las bases de datos de las estaciones climáticas de la Comisión Nacional del Agua.

Se detectaron 19 estaciones climáticas ubicadas dentro del Distrito de Riego 035 La Antigua, Ver., de las cuales 12 permanecen activas y 7 se encuentran suspendidas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estaciones Climáticas ubicadas dentro de la zona de estudio.

Estación Climatológica	Localidad	Condición
30112 Mozombo		
30068 Los Ídolos		
30003 Actopan	Actopan	
30353 La Mancha		
30158 Santa Rosa		
30266 El Diamante		
30467 El Naranjal	Úrsulo Galván	Operando
30165 Tamarindo	Puente Nacional	
30137 Puente Nacional (CFE)		
30141 Rinconada	Emiliano Zapata	
30093 Loma Fina	Paso de Ovejas	
30136 Puente Jula		
30193 José Cardel	La Antigua	
30057 El Zetal (CFE)	Actopan	
30126 Paso Del Cedro		
30199 Zempoala		
30257 E. T. Arroyo 155	Úrsulo Galván	Suspendidas
30050 El Faisán		
30002 Acazónica (CFE)	Paso De Ovejas	
30104 Mata Anona (CFE)	Paso del Macho	

Después de analizar las estaciones climáticas activas, se determinó que solo se utilizarían aquellas que tuvieran registros climáticos del periodo comprendido entre 1980-2010.

Una vez que fueron seleccionadas las estaciones climáticas activas durante el periodo de 1980-2010, ubicadas dentro del Distrito de Riego 035 La Antigua Ver., se procedió a capturar la información estadística correspondiente a las variables climáticas de precipitación, evaporación y temperatura, incluida en cada una de éstas en el software STATISTICA v7.0 (Figura 6).

BASE DE DATOS CLIMÁTICOS DE PRECIPITACIÓN, EVAPORACIÓN, TEMPERATURA MÁXIMA Y TEMPERATURA MÍNIMA PROMEDIO 1980-2010																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Año	José Cardel (Pp)	El Diamante (Pp)	Loma Fina (Pp)	Puente Julia (Pp)	Puente Nacional (Pp)	Rinconada (Pp)	Santa Rosa (Pp)	La Mancha (Pp)	Idolos (Pp)	Tamarindo (Pp)	José Cardel (Ev)	El Diamante (Ev)	Loma Fina (Ev)	Puente Julia (Ev)	Puente Nacional (Ev)	Rinconada (Ev)	Santa Rosa (Ev)	La Mancha (Ev)	
1980	63.6	31.6	109.0	206.0	88.4	65.0	68.0	115.3	60.0	78.5	4.2	4.5	4.3	3.5	3.9	4	4.3	4.5	
2 1981	146.5	83.2	103.0	145.0	118.0	127.0	105.4	152.8	118.5	124.0	4.4	4.5	4.3	3.4	3.8	4.3	4.2	4.5	
3 1982	76.2	103.0	72.5	80.0	65.5	58.0	69.3	50.0	100.0	67.8	4.6	4.8	4.7	2.9	3.9	4.1	4.4	4.6	
4 1983	73.0	63.4	101.1	74.0	125.0	81.0	107.5	42.2	61.8	94.6	4.2	4.4	4.6	3.9	3.6	3.9	4.4	4.5	
5 1984	86.8	86.4	83.0	125.0	93.5	167.0	127.7	107.1	84.7	75.3	4.2	4.2	4	3	3.5	4.5	4.1	4.2	
6 1985	164.0	100.4	87.5	135.5	80.4	77.0	113.5	62.0	119.0	73.2	3.9	4.3	4.1	3.6	3.8	4.7	4.5	4.7	
7 1986	104.0	100.0	21.0	103.0	98.0	102.0	111.5	91.1	137.0	82.0	4.5	3.7	3.8	3.9	3.6	3.9	4.1	4.4	
8 1987	96.5	64.1	1.1	136.0	73.2	65.0	53.5	72.7	65.3	72.6	4.3	4	3.7	4.1	3.4	3.8	3.5	4.5	
9 1988	89.0	180.5	70.5	71.4	108.0	85.5	56.5	57.0	95.6	63.0	4.3	4	2.4	4.3	3.3	4	3.9	4.6	
10 1989	95.4	106.2	85.0	72.4	119.0	62.0	100.0	116.7	104.6	107.6	4.4	4.4	4.5	4.9	3.6	3.9	4.4	5.2	
11 1990	135.5	49.0	77.0	110.3	80.0	63.0	74.8	33.0	103.5	23.2	4.4	3.9	3.9	4.9	3.4	3.7	4	4.7	
12 1991	113.5	87.4	122.0	149.7	86.0	70.0	80.0	106.0	106.8	61.2	4.4	4.1	3.9	5.1	3.4	4.3	4.1	4.9	
13 1992	125.0	117.2	136.0	105.7	154.5	146.0	131.0	151.0	108.7	54.7	4.4	3.4	3.9	4.2	3.2	4.2	3.9	4.3	
14 1993	126.0	84.5	131.0	132.5	114.0	83.0	126.8	144.0	110.5	51.3	4.4	3.8	3.9	3.9	3.6	4.5	4.2	4.7	
15 1994	88.0	53.5	94.0	90.0	60.0	90.0	75.0	85.0	11.4	47.9	4.4	3.7	3.9	3.3	3.5	4	4.3	4.6	
16 1995	98.0	80.5	102.0	131.2	76.2	66.0	64.5	147.5	73.5	44.5	4.3	3.6	3.9	4.2	3.6	4	4.5	4.6	
17 1996	102.5	116.5	169.0	189.9	65.0	73.0	90.0	100.0	69.0	41.0	4.6	3.6	2.9	4.2	3.8	3.2	2.8	4.9	
18 1997	65.0	75.3	70.0	233.7	71.0	47.0	96.6	108.0	61.0	61.2	4.1	3.8	4.1	4	3.8	4.2	3.9	4.4	
19 1998	89.3	68.6	74.0	189.7	62.0	62.0	85.2	87.0	75.0	22.6	4.4	3.8	4.1	4.1	3.6	4.5	4.3	4.3	
20 1999	111.0	95.0	92.0	235.4	204.0	87.0	157.0	76.0	147.0	51.6	4.5	3.8	4.3	3.7	3.5	4.5	4.9	3.9	
2000	80.5	89.0	78.0	216.8	80.0	100.0	75.2	111.0	65.0	190.1	4.6	3.7	4	4	4	4.3	4.8	4	
22 2001	76.8	60.3	54.0	277.3	128.0	30.0	80.0	104.0	62.2	20.1	4.3	3.7	3.8	4.3	4.2	4.2	4.7	3.8	
23 2002	67.0	60.8	88.0	45.6	73.0	60.0	65.0	90.0	68.8	12.1	4.9	4	4.4	4.3	4.2	4.8	5.2	4.1	
24 2003	146.0	50.2	111.0	30.6	60.0	98.0	108.2	85.0	84.2	17.0	4.7	3.7	4.2	4.4	4.7	4.4	4.9	3.9	
25 2004	86.5	76.0	64.0	31.9	72.0	58.0	92.0	85.0	65.4	42.2	4.8	3.5	4.3	4.2	4.4	4.3	4.7	3.9	
26 2005	121.5	100.1	74.0	31.2	80.0	120.0	129.3	117.0	100.8	60.0	4.3	3.2	3.8	4.6	4.1	4	4.5	3.8	
27 2006	105.0	93.2	67.0	108.3	108.0	85.0	98.0	75.0	97.7	101.1	4.7	3.3	4.7	4.5	4.4	4.2	4.8	3.8	
28 2007	83.0	97.0	73.0	31.2	36.0	122.0	100.0	106.0	90.6	6.5	4.4	3.2	4.6	4.4	4.7	4.2	4.9	3.9	
29 2008	111.4	72.3	105.0	108.3	43.0	125.0	87.0	48.0	91.2	100.0	4.6	3.4	4.3	4.6	4.7	4.5	4.9	3.8	
30 2009	110.2	75.4	102.6	108.1	98.6	119.4	89.2	90.6	106.7	80.1	4	3.9	4.1	4.4	4.5	4.4	4.6	4	
2010	125.4	98.4	119.3	117.7	167.8	120.0	113.2	167.4	130.4	120.4	4.2	4.1	4.2	4.3	4.5	4.3	4.4	3.9	

Figura 6. Captura de la base de datos de los registros de las estaciones climáticas del Distrito de Riego 035 La Antigua, Ver., mediante el software STATISTICA (medias mensuales por año).

Aun cuando las estaciones climáticas seleccionadas para esta investigación se encuentran activas, éstas contienen series de datos faltantes y puede ocasionar información poco precisa de acuerdo al procedimiento utilizado para la estimación de éstos; al respecto Cañizares et al. (2004), mencionaron que la elección del procedimiento para el manejo de datos incompletos resulta una tarea compleja, pues un mismo método en determinadas situaciones produce estimaciones precisas y en otras, no, esto sugiere a los investigadores que, cuando manejen datos incompletos,

valoren previamente, el uso de más de una alternativa para tratarlos y realicen un análisis de sensibilidad que les permita una mejor elección del procedimiento a implementar.

El ajuste y estimación de datos mediante regresión es ampliamente utilizada debido a la ventaja de poder emplearse en cualquier variable climática. Pueden estimarse datos faltantes o dudosos de una serie de elementos a partir de otra serie del mismo elemento, en lugares ubicados en una misma zona climática o a partir de otro elemento climático o no climático, pero que entre ellos exista una alta relación (Guevara, 2003).

Sin embargo, el ajuste o estimación por regresión requiere que se cumplan algunos requisitos para su aplicación, entre los más importantes:

- Que el coeficiente de correlación sea estadísticamente significativo, de lo contrario no se debe ajustar ni estimar datos por regresión; y
- Que los datos de cada serie sean independientes entre sí, es decir, que no exista autocorrelación. De lo contrario, el valor de r y r^2 estarán influidos por los mismos datos, exagerando la correlación.

8.2.2. Fase 2. Selección de métodos para estimar la ETR para caña de azúcar.

Como parte de la segunda fase de esta investigación se analizaron cuatro métodos para estimar la evapotranspiración de referencia, la cual se utiliza en el cálculo de la evapotranspiración real; De acuerdo a lo anterior, se consideró el cálculo de la evapotranspiración de referencia por medio de tres métodos empíricos como son Penman-Monteith FAO, Blanney-Cridde y Hargreaves-Samani; de igual forma, se consideró utilizar un método experimental de campo como el método del Tanque Evaporímetro Tipo A.

Posteriormente al cálculo de la ET_0 se determinó la ETR para cada método seleccionado aplicando el factor de corrección K_c , el cual corresponde al coeficiente de

cultivo y depende del nivel de humedad del suelo y de las características de cada cultivo.

Este coeficiente K_c , de uso de consumo para los cultivos bajo riego, se encuentra en diferentes literaturas, los mismos son experimentales, y dependen de varios factores como la latitud del sitio de cultivo, de la etapa de crecimiento, de la temperatura y de la estacionalidad; particularmente para el caso del cultivo de la caña de azúcar se propuso un K_c de 0.85 (IMTA, 2013).

8.2.2.1. Método Penman-Monteith FAO.

La ecuación más precisa que existe para el cálculo de la ET_0 es la de Penman-Monteith FAO. Las variables utilizadas en esta ecuación son la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento a 2 m de altura sobre la superficie del suelo (Allen *et al.*, 1998). La ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)}$$

donde:

ET_0 : evapotranspiración de referencia (mm d^{-1});

R_n : radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

G : densidad del flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

T : temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$);

u_2 : velocidad del viento registrada a 2 m de altura (m s^{-1});

e_s : presión de vapor de saturación (kPa);

e_a : presión de vapor (kPa);

$e_s - e_a$: déficit de presión de vapor de saturación (kPa);

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); y

γ : constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

8.2.2.2. Método de Blaney-Criddle.

Este es el método más simple para evaluar la evapotranspiración de una zona en particular, debido a que solo depende de la temperatura promedio de la zona y del porcentaje de horas diurnas anuales de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$ET_0 = p(0.46T + 8.13)$$

donde:

ET_0 : evapotranspiración del cultivo de referencia (cm día^{-1});

T: temperatura media diaria del mes ($^{\circ}\text{C}$); y

p: porcentaje medio de horas de sol diarias en función del total anual (%).

Se recomienda que el período de medición no sea menor a un mes para asegurar representatividad en los datos, ya que estos sufren grandes variaciones a lo largo del año, sobre todo el valor de p.

8.2.2.3 Método de Hargreaves-Samani.

El método de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985) solo requiere la temperatura como variable predictiva y su ecuación se establece de la siguiente manera:

$$ET_0 = 0.0023 (T_{\text{med}} + 17.78) R_0 (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0.5}$$

donde:

ET_0 : Evapotranspiración potencial diaria (mm día^{-1});

T_{med} : Temperatura media diaria ($^{\circ}\text{C}$);

R_0 : Radiación solar extraterrestre (mm día^{-1});

$T_{\text{máx}}$: Temperatura máxima diaria ($^{\circ}\text{C}$); y

$T_{\text{mín}}$: Temperatura mínima diaria ($^{\circ}\text{C}$).

Este método requiere datos climáticos como la temperatura del aire y la radiación solar extraterrestre (Hargreaves y Samani, 1985), lo que representa una opción importante

para intentar procesar información climática histórica, donde la radiación solar es un dato frecuentemente no disponible en las redes de estaciones climáticas del país. Sin embargo, por la misma razón que utiliza pocas variables, es necesario evaluar su utilidad a nivel regional y local.

8.2.2.4 Método del Tanque Evaporímetro Tipo A.

Los datos diarios de evaporación observados en el Tanque Evaporímetro Tipo A pueden expresarse en datos de ET_0 mediante la siguiente expresión:

$$ET_0 = K_p E_{\text{pan}}$$

donde

E_{pan} : evaporación observada en el tanque (mm d^{-1}); y

K_p : coeficiente del tanque evaporímetro.

El K_p fue determinado a partir de la ecuación propuesta por Cuenca (1989), la cual considera la cobertura del suelo y los alrededores donde se ubica el tanque, así como la velocidad del viento y las condiciones de humedad relativa.

El uso de este método ha probado su valor práctico y ha sido utilizado con éxito para calcular la ET_0 , dado que la medida de la evaporación integra el efecto de la radiación, del viento, la temperatura y la humedad para un lugar específico. En algunos trabajos experimentales, los valores de evaporación medidos en el Tanque Evaporímetro Tipo A, afectados por sus correspondientes factores de corrección, se han utilizado para calcular el volumen de agua de riego a reponer en los cultivos (Godoy y López, 1997; Tijerina, 2000; González y Hernández, 2000).

En muchos casos, por razones prácticas, financieras o teóricas, no es posible medir directamente la evapotranspiración (Delegido y Caselles, 1993); sin embargo, determinar la ET resulta muy importante para programar riegos, diseñar sistemas de riego, planificar recursos hídricos y usos de la tierra y, en general, para la producción

de especies agrícolas y forestales (Castillo y Castelvi, 1996), buscando así el uso y manejo del agua de forma eficiente para mejorar los rendimientos de los cultivos en campo.

8.2.3. Fase 3. Cálculo de la ETR.

Durante la tercera fase se realizaron los cálculos correspondientes de la ETR estimada con base en los métodos seleccionados y las variables climáticas incluidas en la base de datos.

Para realizar algunos de estos cálculos, se utilizaron hojas de cálculo del programa Excel de la paquetería Microsoft Office, considerando que no solo se realizarían dichos cálculos sino que además se guardaría un registro de éstos.

8.2.4. Fase 4. Correlación entre la ETR y el rendimiento en campo de caña de azúcar.

En esta fase de investigación se compararon las ETR estimadas en las zonas de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo con los patrones de temperatura, evaporación, precipitación y rendimiento en caña de azúcar, en ambos ingenios, para correlacionar el efecto del cambio climático contra la ETR estimada en el periodo de estudio.

En esta etapa de la investigación se solicitó a los ingenios La Gloria y El Modelo, a través de los superintendentes de campo, la información referente al rendimiento en campo en caña de azúcar registrado durante el periodo de 1980-2010; lo anterior, permitió conocer el comportamiento del rendimiento en campo en la zona de abasto de los ingenios antes mencionados para dicho periodo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Rendimiento en campo en caña de azúcar en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo durante el periodo de 1980-2010.

Año	Ingenios	
	La Gloria	El Modelo
1980	78.345	80.2
1981	78.856	80.06
1982	78.197	82.76
1983	78.241	80.74
1984	74.787	80.14
1985	86.895	90.6
1986	84.906	88.4
1987	77.276	78.27
1988	85.671	89.45
1989	83.538	90.24
1990	88.169	100.49
1991	89.879	108.39
1992	102.849	107.16
1993	92.213	103.37
1994	105.999	115.77
1995	95.765	101.3
1996	96.002	102
1997	103.664	109.98
1998	93.844	103.46
1999	90.041	98.45
2000	99.334	103.3
2001	90.203	87.3
2002	93.696	100.54
2003	96.241	103.74
2004	89.032	94.57
2005	101.565	101.38
2006	86.558	94.63
2007	91.547	94.41
2008	81.846	81.74
2009	87.09	90.94
2010	75.999	74.52

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se analizaron los resultados correspondientes a las fases de investigación indicadas anteriormente y la discusión de la hipótesis general, así como las hipótesis particulares, planteadas en este estudio.

9.1. Fase 1. Integración de la base de datos climática.

Se realizó una correlación entre estaciones climáticas para la variable de precipitación y se observó que el coeficiente de correlación entre cada una de éstas no fue estadísticamente significativa para una $p < 0.05$ (Cuadro 3).

Cuadro 3. Correlación de la variable de precipitación entre las estaciones climáticas del Distrito de Riego 035 La Antigua, Ver.

Estaciones	JC	ED	LF	PJ	PN	R	SR	LM	I	T
José Cardel	1.00	0.13	0.28	-0.16	0.19	0.36	0.44	0.13	0.60	0.05
El Diamante	0.13	1.00	0.07	-0.16	0.25	0.25	0.17	0.08	0.44	0.18
Loma Fina	0.28	0.07	1.00	0.05	0.16	0.24	0.26	0.36	0.07	-0.01
Puente Jula	-0.16	-0.16	0.05	1.00	0.29	-0.30	-0.01	0.17	-0.06	0.17
Puente Nacional	0.19	0.25	0.16	0.29	1.00	0.15	0.54	0.31	0.53	0.25
Rinconada	0.36	0.25	0.24	-0.30	0.15	1.00	0.51	0.29	0.34	0.31
Santa Rosa	0.44	0.17	0.26	-0.01	0.54	0.51	1.00	0.28	0.57	0.05
La Mancha	0.13	0.08	0.36	0.17	0.31	0.29	0.28	1.00	0.14	0.17
Ídolos	0.60	0.44	0.07	-0.06	0.53	0.34	0.57	0.14	1.00	0.18
Tamarindo	0.05	0.18	-0.01	0.17	0.25	0.31	0.05	0.17	0.18	1.00

JC: José Cardel; ED: El Diamante; LF: Loma Fina; PJ: Puente Jula; PN: Puente Nacional; R: Rinconada; SR: Santa Rosa; LM: La Mancha; I: Ídolos; y T: Tamarindo.

De igual manera, no existió una correlación estadística significativa ($p < 0.05$) entre cada una de las estaciones climáticas con respecto a la variable de evaporación (Cuadro 4).

Cuadro 4. Correlación de la variable de evaporación entre las estaciones climáticas del Distrito de Riego 035 La Antigua, Ver.

Estaciones	JC	ED	LF	PJ	PN	R	SR	LM	I	T
José Cardel	1.00	-0.30	0.15	0.16	0.26	0.02	0.27	-0.23	-0.13	-0.37
El Diamante	-0.30	1.00	0.17	-0.45	-0.32	0.03	-0.15	0.53	0.49	0.64
Loma Fina	0.15	0.17	1.00	-0.12	0.42	0.42	0.64	-0.28	0.04	-0.15
Puente Jula	0.16	-0.45	-0.12	1.00	0.21	-0.14	0.08	-0.07	0.09	-0.30
Puente Nacional	0.26	-0.32	0.42	0.21	1.00	0.31	0.60	-0.69	-0.13	-0.48
Rinconada	0.02	0.03	0.42	-0.14	0.31	1.00	0.69	-0.44	-0.08	-0.16
Santa Rosa	0.27	-0.15	0.64	0.08	0.60	0.69	1.00	-0.62	-0.19	-0.43
La Mancha	-0.23	0.53	-0.28	-0.07	-0.69	-0.44	-0.62	1.00	0.40	0.64
Ídolos	-0.13	0.49	0.04	0.09	-0.13	-0.08	-0.19	0.40	1.00	0.48
Tamarindo	-0.37	0.64	-0.15	-0.30	-0.48	-0.16	-0.43	0.64	0.48	1.00

JC: José Cardel; ED: El Diamante; LF: Loma Fina; PJ: Puente Jula; PN: Puente Nacional; R: Rinconada; SR: Santa Rosa; LM: La Mancha; I: Ídolos; y T: Tamarindo.

Por tal motivo, para estas variables climáticas no fue posible estimar los datos faltantes por medio de la regresión lineal, sin embargo, se eligió la estimación de datos faltantes por el método de sustitución por promedio.

Por último, se realizó una correlación para las variables de temperatura máxima y mínima (Cuadro 5 y 6), donde se pudo observar que algunas estaciones si mostraron un coeficiente de correlación estadísticamente significativo ($p < 0.05$) para la variable de temperatura máxima pero no para la temperatura mínima.

Cuadro 5. Correlación de la variable de temperatura máxima entre las estaciones climáticas del Distrito de Riego 035 La Antigua, Ver.

Estaciones	JC	ED	LF	PJ	PN	R	SR	LM	I	T
José Cardel	1.00	-0.11	0.22	-0.28	0.17	0.17	0.53	0.23	0.13	0.54
El Diamante	-0.11	1.00	0.44	0.38	0.54	0.26	0.01	0.13	-0.11	-0.20
Loma Fina	0.22	0.44	1.00	0.29	0.61	0.37	-0.02	0.18	0.12	0.35
Puente Jula	-0.28	0.38	0.29	1.00	0.37	0.32	-0.12	0.23	0.13	-0.08
Puente Nacional	0.17	0.54	0.61	0.37	1.00	0.82	-0.15	0.33	-0.04	0.03
Rinconada	0.17	0.26	0.37	0.32	0.82	1.00	-0.16	0.49	-0.22	0.02
Santa Rosa	0.53	0.01	-0.02	-0.12	-0.15	-0.16	1.00	0.19	0.03	0.16
La Mancha	0.23	0.13	0.18	0.23	0.33	0.49	0.19	1.00	-0.55	0.42
Ídolos	0.13	-0.11	0.12	0.13	-0.04	-0.22	0.03	-0.55	1.00	0.09
Tamarindo	0.54	-0.20	0.35	-0.08	0.03	0.02	0.16	0.42	0.09	1.00

JC: José Cardel; ED: El Diamante; LF: Loma Fina; PJ: Puente Jula; PN: Puente Nacional; R: Rinconada; SR: Santa Rosa; LM: La Mancha; I: Ídolos; y T: Tamarindo.

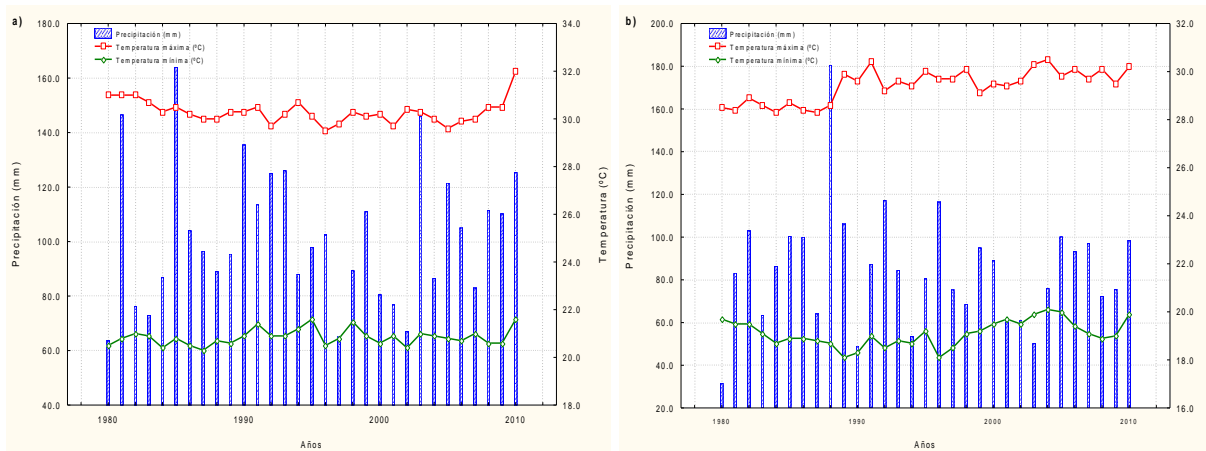
Cuadro 6. Correlación de la variable de temperatura mínima entre las estaciones climáticas del Distrito de Riego 035 La Antigua, Ver.

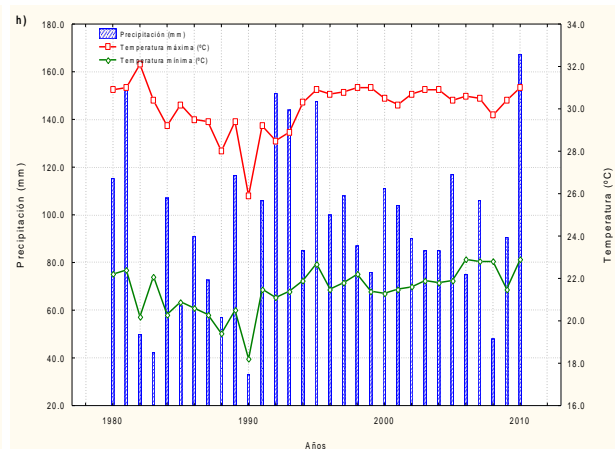
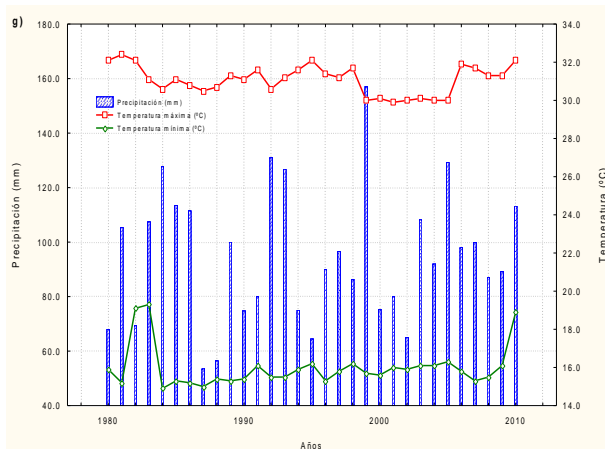
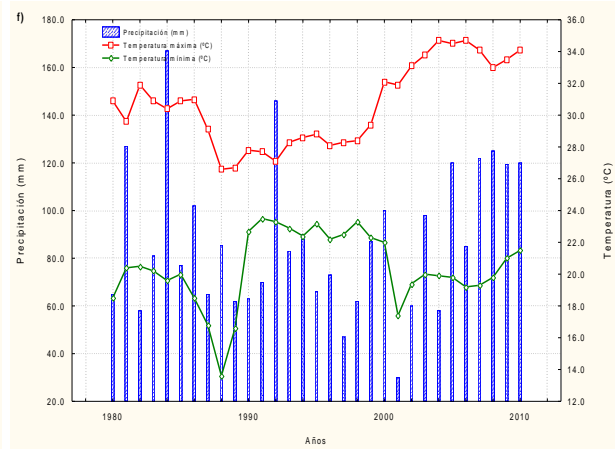
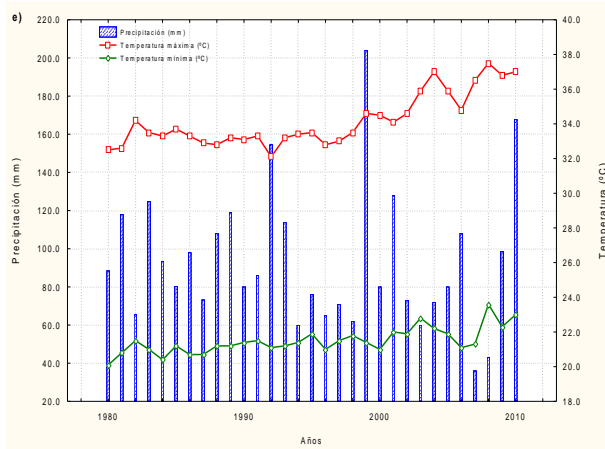
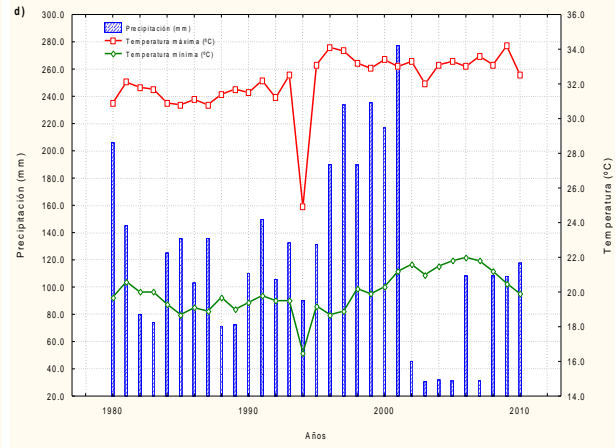
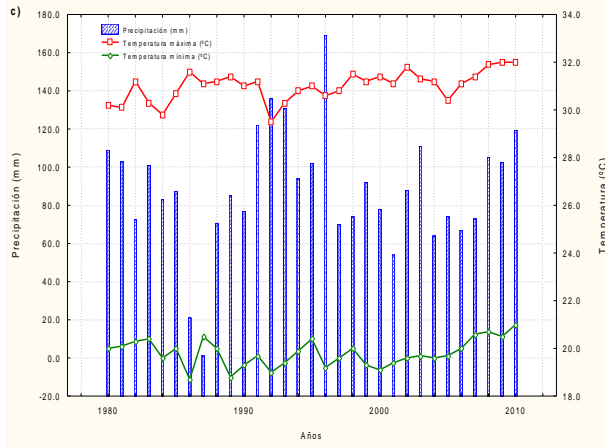
Estaciones	JC	ED	LF	PJ	PN	R	SR	LM	I	T
José Cardel	1.00	0.23	0.31	-0.07	0.40	0.53	0.46	0.34	0.29	0.20
El Diamante	0.23	1.00	0.31	0.63	0.34	-0.08	0.40	0.47	0.13	0.09
Loma Fina	0.31	0.31	1.00	0.19	0.38	-0.06	0.45	0.44	0.33	0.05
Puente Jula	-0.07	0.63	0.19	1.00	0.38	-0.21	0.11	0.36	0.29	-0.21
Puente Nacional	0.40	0.34	0.38	0.38	1.00	0.15	0.30	0.35	0.19	0.21
Rinconada	0.53	-0.08	-0.06	-0.21	0.15	1.00	0.15	0.24	0.07	0.22
Santa Rosa	0.46	0.40	0.45	0.11	0.30	0.15	1.00	0.22	0.39	0.32
La Mancha	0.34	0.47	0.44	0.36	0.35	0.24	0.22	1.00	-0.12	0.40
Ídolos	0.29	0.13	0.33	0.29	0.19	0.07	0.39	-0.12	1.00	-0.25
Tamarindo	0.20	0.09	0.05	-0.21	0.21	0.22	0.32	0.40	-0.25	1.00

JC: José Cardel; ED: El Diamante; LF: Loma Fina; PJ: Puente Jula; PN: Puente Nacional; R: Rinconada; SR: Santa Rosa; LM: La Mancha; I: Ídolos; y T: Tamarindo.

Solo para el caso de las estaciones climáticas de Puente Nacional y Rinconada fue considerada la estimación de datos faltantes por medio de la regresión lineal. Sin embargo, la cantidad de datos faltantes no era significativa, por lo tanto, se seleccionó la estimación de datos faltantes por el método de sustitución por promedio.

El comportamiento de las variables climáticas, tales como precipitación (Pp), evaporación (Ev) y temperatura máxima y mínima (T) registradas en las estaciones climáticas, ubicadas dentro del Distrito de Riego 035 La Antigua, Ver., durante el periodo de 1980-2010, se muestra en las Figuras 7 y 8. Los datos de estas gráficas son las medias mensuales de cada año.





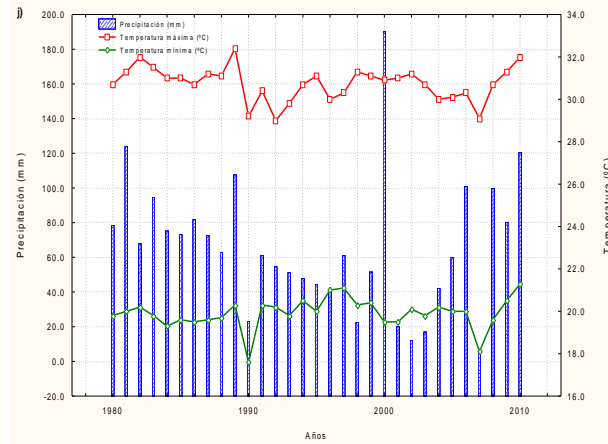
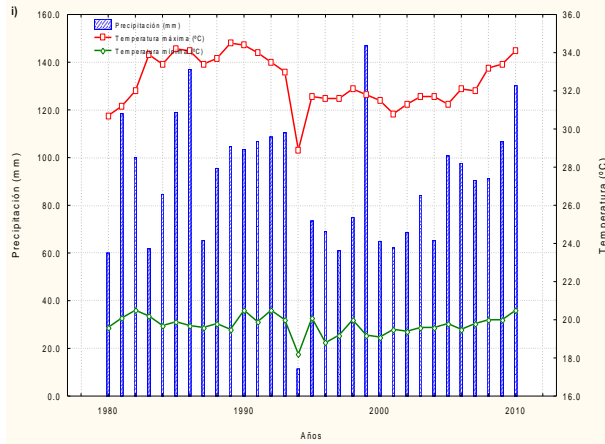
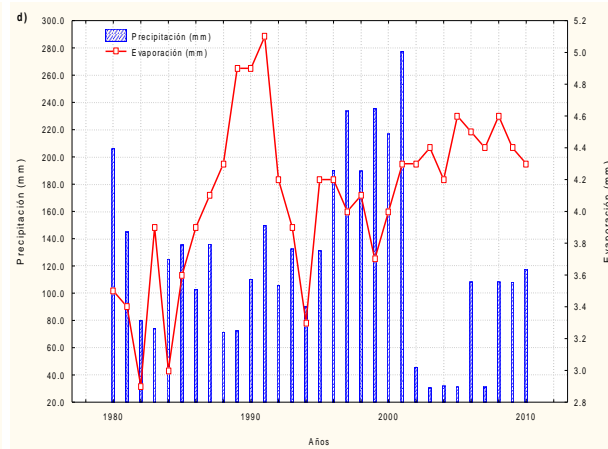
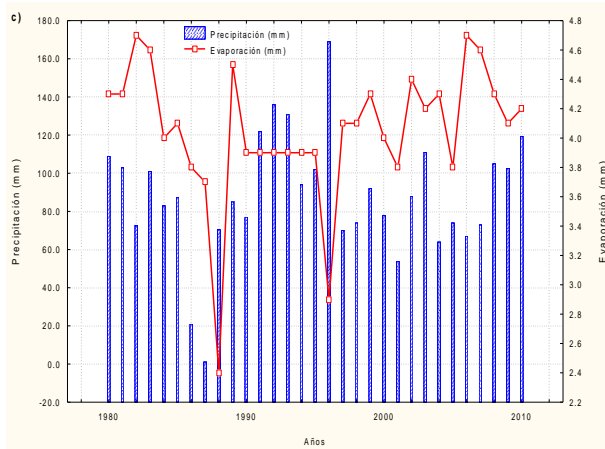
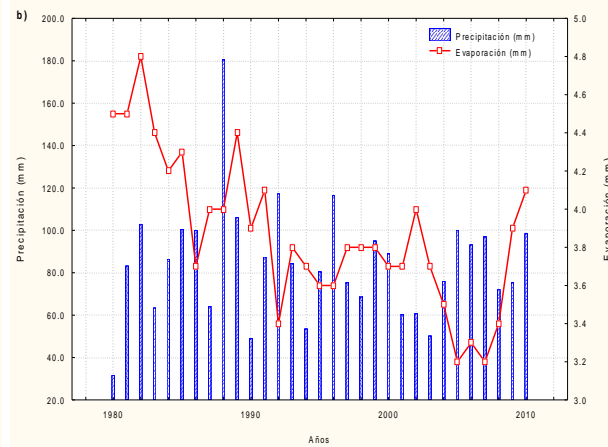
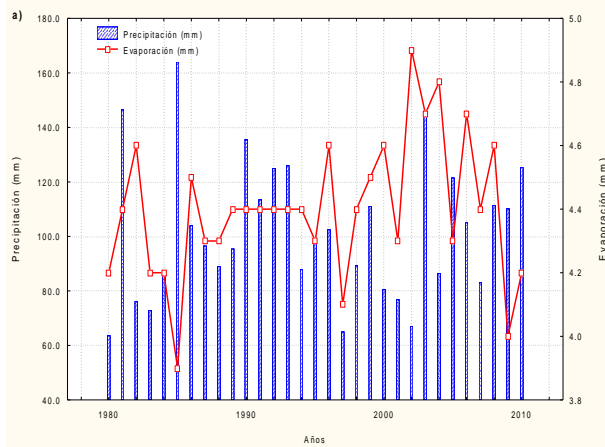


Figura 7. Relación entre precipitación (Pp) y temperatura máxima y mínima (T), registradas durante el periodo de 1980-2010 en las estaciones de: a) José Cardel; b) El Diamante; c) Loma Fina; d) Puente Jula; e) Puente Nacional; f) Rinconada; g) Santa Rosa; h) La Mancha; i) Ídolos; y j) Tamarindo (medias mensuales por año).



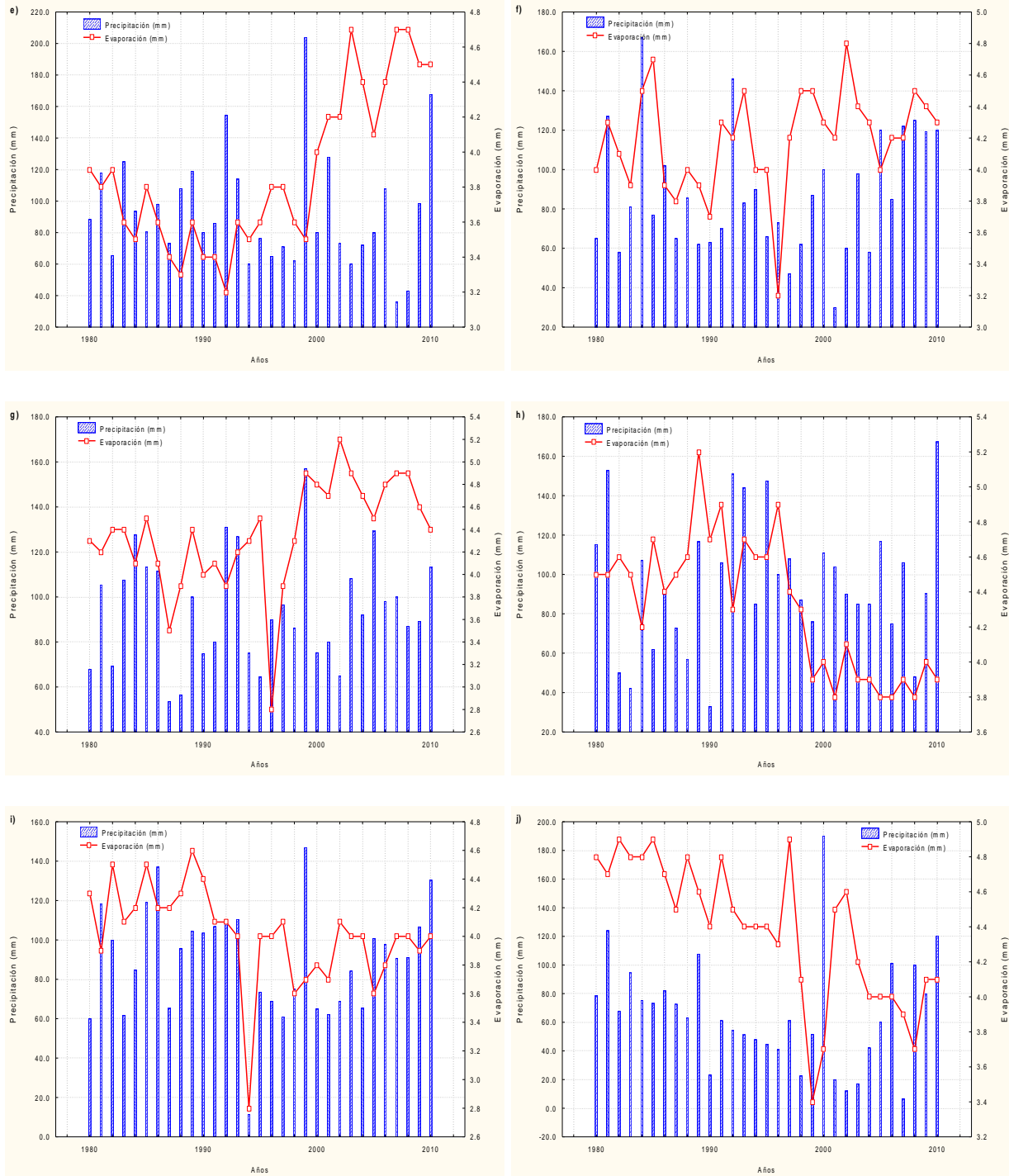


Figura 8. Relación entre precipitación (P_p) y evaporación (E_v), registradas durante el periodo de 1980-2010 en las estaciones de: a) José Cardel; b) El Diamante; c) Loma Fina; d) Puente Jula; e) Puente Nacional; f) Rinconada; g) Santa Rosa; h) La Mancha; i) Ídolos; y j) Tamarindo (medias mensuales por año).

9.2. Fase 2. Métodos seleccionados para el cálculo de la ETR en caña de azúcar, con base en el análisis realizado.

De los métodos descritos en la sección de Materiales y Métodos para determinar la evapotranspiración de referencia (a partir de la cual se pudo calcular la ETR), de acuerdo a la literatura consultada y a los resultados obtenidos en este estudio, se tomó la decisión de utilizar los métodos descritos en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Métodos seleccionados para el cálculo de la evapotranspiración de referencia.

Método	Fórmula
Penman-Monteith FAO	$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34u_2)}$
Blaney-Criddle	$ET_0 = p(0.46 T + 8.13)$
Hargreaves-Samani	$ET_0 = 0.0023 (T_{med} + 17.78) R_0 (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0.5}$
Tanque Evaporímetro Tipo A	$ET_0 = K_p E_{pan}$

Es importante considerar que algunos de los métodos utilizados para calcular la evapotranspiración de referencia causan una sobreestimación o subestimación de la misma debido a la cantidad de información climática que manejen éstos, y la sensibilidad de la técnica con la que hayan sido utilizados los valores tabulados para las variables climáticas de las que no se tienen registro de manera experimental.

9.3. Fase 3. Valores de ETR calculados con los métodos seleccionados.

En esta fase de investigación se calculó la evapotranspiración potencial de referencia (ET_0) y la evapotranspiración real estimada (ETR) dentro de la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo (Figura 9 y 10).

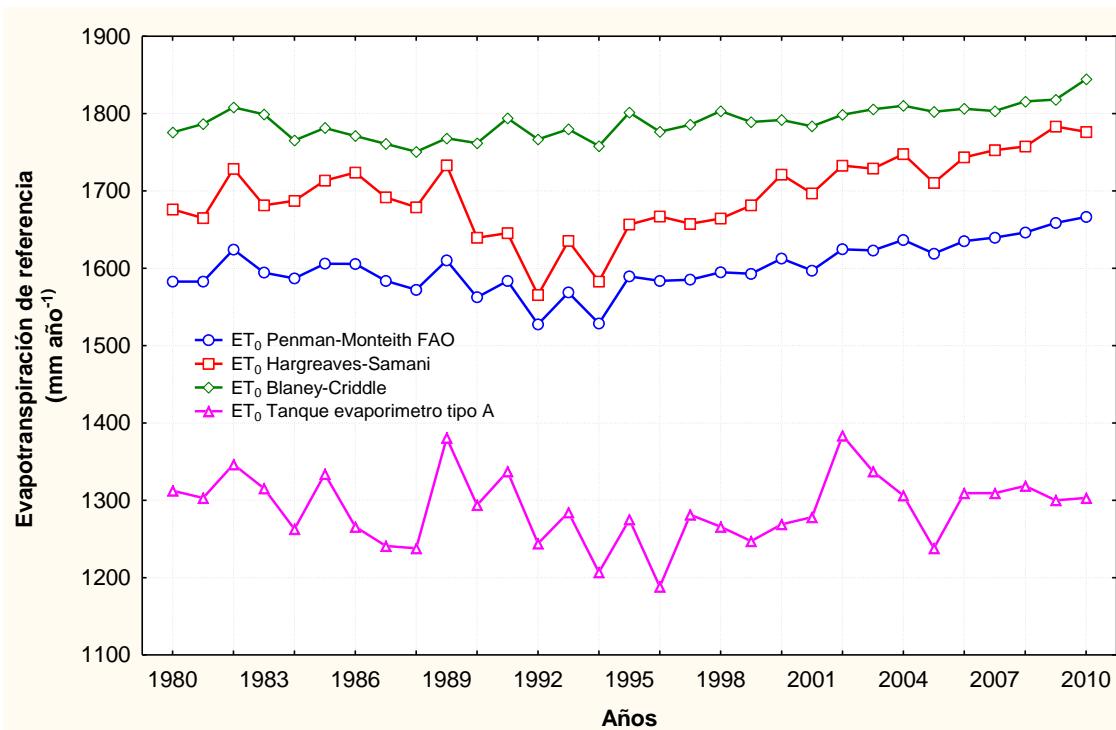


Figura 9. Evapotranspiración de referencia promedio en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, para cada año del periodo de 1980-2010.

En la Figura 9 se describe el comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ET_0), en el cual se observó una ligera sobreestimación de datos para los métodos de Hargreaves-Samani y Blaney-Cridde, y una subestimación de datos para el método de Tanque Evaporímetro Tipo A.

En la Figura 10 se observa el comportamiento de la ETR dentro de la zona de abasto de los ingenios antes referidos, durante el periodo de 1980-2010.

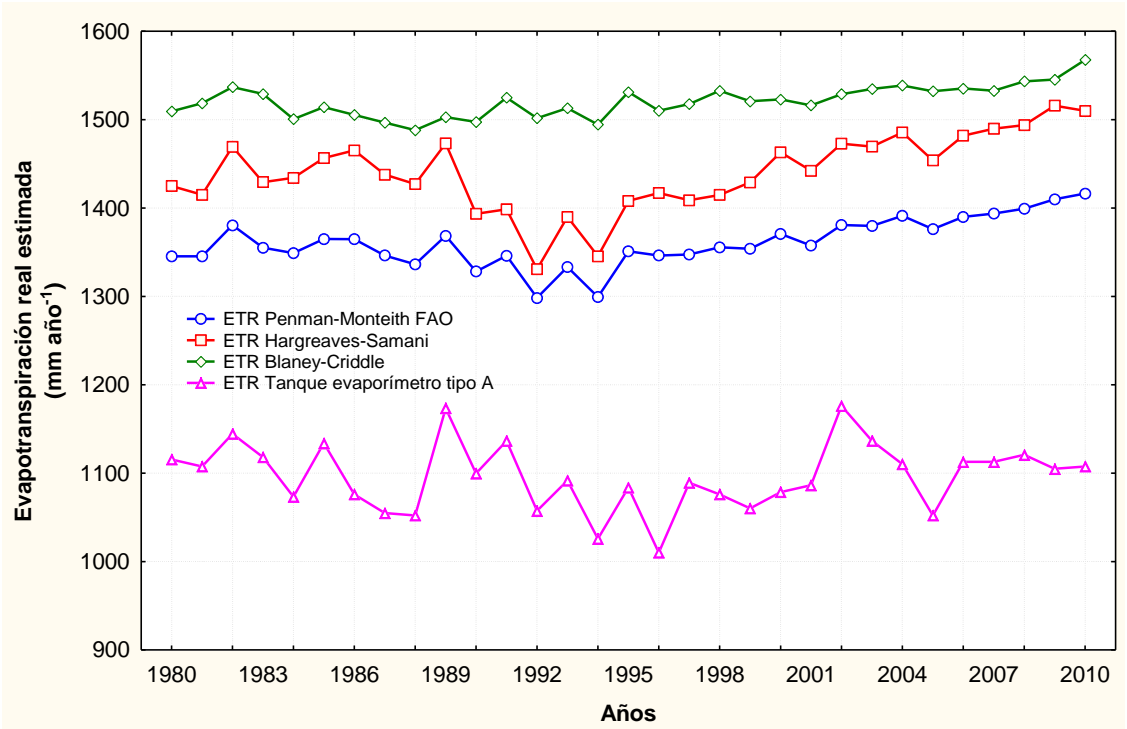


Figura 10. Evapotranspiración real estimada promedio en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, para cada año del periodo de 1980-2010.

Como se observa en la Figura 10, es notorio el incremento de la ETR en los últimos 15 años como resultado de la reducida precipitación y el incremento de la temperatura observada en la zona de estudio.

El consumo anual de agua por parte del cultivo de la caña de azúcar varía entre 1 350 y 1 420 mm año⁻¹ para la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo; lo anterior se puede comparar con lo registrado por Cassalet et al. (1995), quienes indicaron que el consumo total de agua de la caña de azúcar en los diferentes países varía en forma amplia (Cuadro 8). Por lo general, este consumo oscila entre 1 200 y 1 500 mm por año de cultivo, siendo mayor en las zonas subtropicales que se caracterizan por épocas secas más prolongadas y por una evaporación mayor que en las zonas tropicales.

Cuadro 8. Agua total consumida anualmente por el cultivo de caña de azúcar en diferentes localidades productoras de caña de azúcar.

País	Evapotranspiración (ET)	Fuente
Australia	1522 mm	Thompson, 1976
Rep. Mauricio	1449 mm	
Sudáfrica	1267 - 1555 mm	
Cuba	1618 y 2113 mm en planta 1193 y 1670 mm en socas	Fonseca y García, 1987
Florida	1322 mm con riego por goteo 1275 mm con subirrigación	Shih, 1989
Colombia	1100 - 1200 mm	Yang <i>et al.</i> , 1985

Por medio de un diagrama de dispersión, se evaluó la correlación de la ETR calculada entre cada uno de los métodos seleccionados (Figura 11).

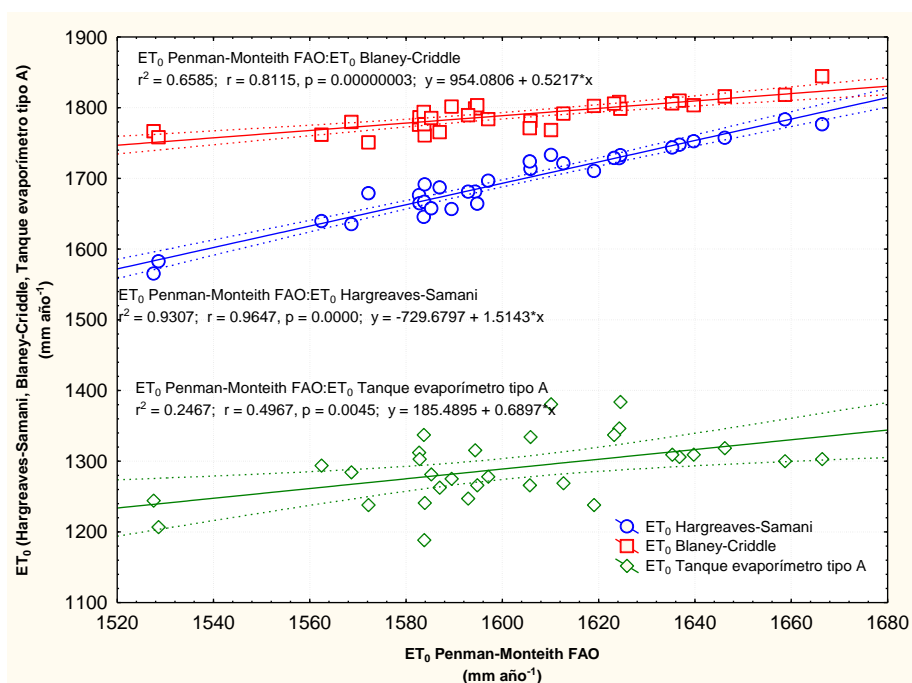


Figura 11. Diagrama de dispersión de ET_0 para el análisis de los métodos Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle y Tanque Evaporímetro Tipo A con respecto al método Penman-Monteith FAO.

Como se puede observar en la Figura 11, el método que tiene una buena correlación con respecto al método Penman-Monteith FAO fue Hargreaves-Samani con un

coeficiente de determinación (r^2) de 0.9307, seguido del método Blaney-Criddle con una $r^2=0.6585$ y finalmente el método del Tanque Evaporímetro Tipo A con una $r^2=0.2467$.

Este comportamiento se ha observado en estudios anteriores donde los valores de evaporación en Tanque Evaporímetro Tipo A fueron menores que los de ET_0 calculados con la ecuación Penman-Monteith FAO. Esto supone una subestimación de los valores de evaporación diaria así como de las estimaciones de ET_0 correspondientes al método del Tanque Evaporímetro Tipo A (López y Dennett, 2005). Lo anterior, fue señalado por Cohen et al. (2002) quienes la atribuyeron el efecto de salpique del agua desde la tina hacia el suelo, en días con lluvia.

De igual forma se analizó la correlación de la ETR, calculada a partir de la ET_0 , entre cada uno de los métodos seleccionados (Figura 12).

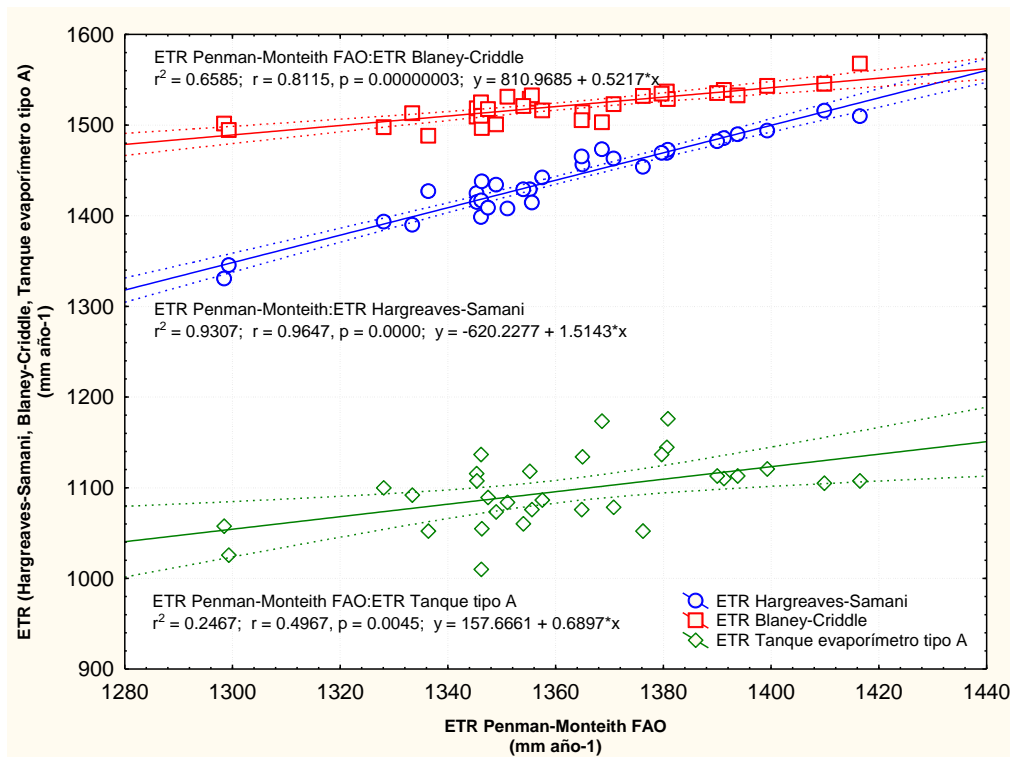


Figura 12. Diagrama de dispersión de la ETR para el análisis de los métodos Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle y Tanque Evaporímetro Tipo A con respecto al método Penman-Monteith FAO.

En la Figura 12 se observa que para la ETR calculada, el método Hargreaves-Samani tiene un alto coeficiente de determinación ($r^2=0.9307$), con respecto al método Penman-Monteith FAO.

9.4 Fase 4. Correspondencia entre la ETR y el rendimiento en campo de caña de azúcar.

En esta última fase de la investigación se analizó y valoró el comportamiento de la ETR estimada contra los rendimientos en campo registrados durante el periodo de 1980-2010 por los ingenios La Gloria y El Modelo. Esta valoración también se realizó contra las variables climáticas de precipitación (Pp), evaporación (Ev) y temperatura (T), para evaluar la correlación que existe entre éstas y la evapotranspiración. Lo anterior permitió conocer si existió una relación entre éste y la ETR durante el periodo de 1980-2010.

Principalmente se observó el comportamiento del rendimiento registrado en la zona de abasto de los ingenios mencionados anteriormente a la par que los métodos seleccionados para calcular la ETR dentro de la misma zona durante el periodo de 1980-2010 (Figura 13).

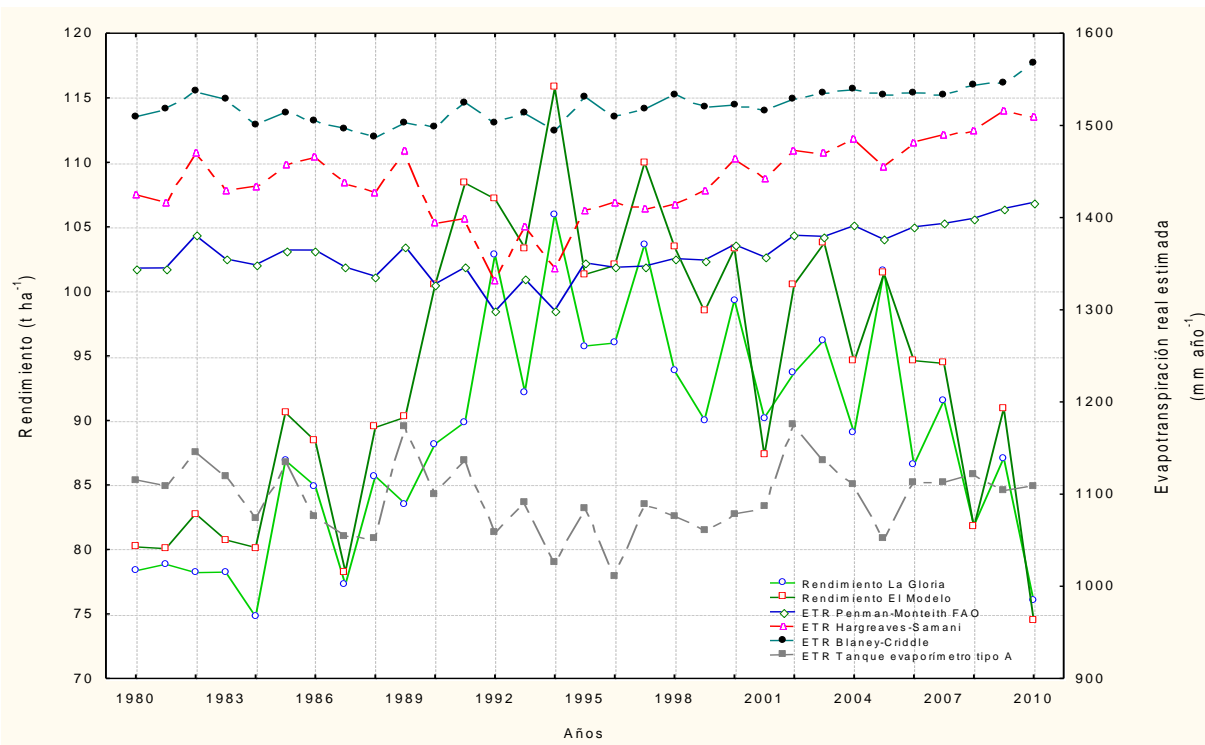


Figura 13. Comportamiento del rendimiento en campo de caña de azúcar en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo en relación con la ETR durante el periodo de 1980-2010.

De la figura anterior se puede analizar que, aun cuando existe una tendencia casi lineal de la ETR durante 1980-2010, el rendimiento en campo observado no fue constante para este mismo periodo. Esto último podría ser resultado de la escasa precipitación registrada en años anteriores a 1990 y posteriores al 2000; Sumado a lo anterior, se supondría un mal manejo agrícola por parte de los productores cañeros de la zona.

Investigaciones realizadas en otros países han demostrado que, para una condición climática específica dentro de una región, existe una relación lineal entre la producción de caña de azúcar y el consumo de agua.

Por otra parte, en las Figuras 14, 15, 16 y 17 se describe la correspondencia entre el rendimiento en campo registrado en los ingenios arriba mencionados contra los métodos Penman-Monteith FAO, Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle y Tanque Evaporímetro Tipo A, demostrándose que existe una baja correspondencia entre el rendimiento y la ETR.

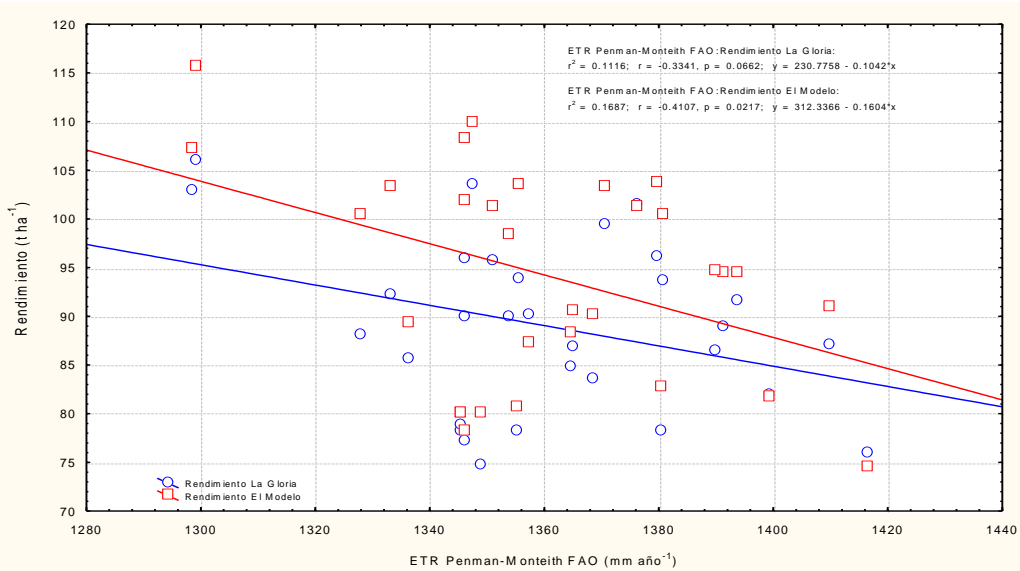


Figura 14. Correlación entre el rendimiento en campo de caña de azúcar registrado en los ingenios La Gloria y El Modelo y la ETR con el método Penman-Monteith FAO.

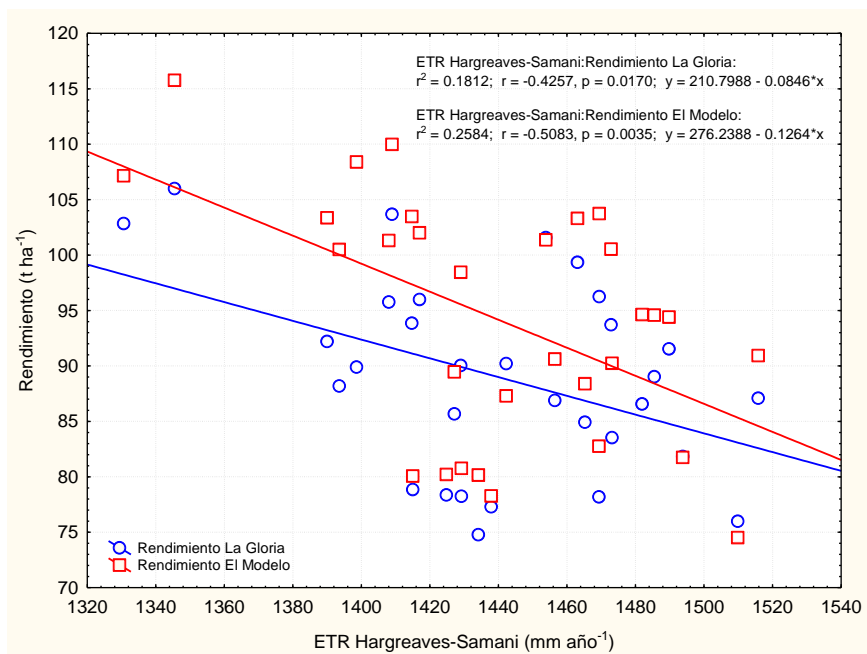


Figura 15. Correlación entre el rendimiento en campo de caña de azúcar registrado en los ingenios La Gloria y El Modelo y la ETR con el método Hargreaves-Samani.

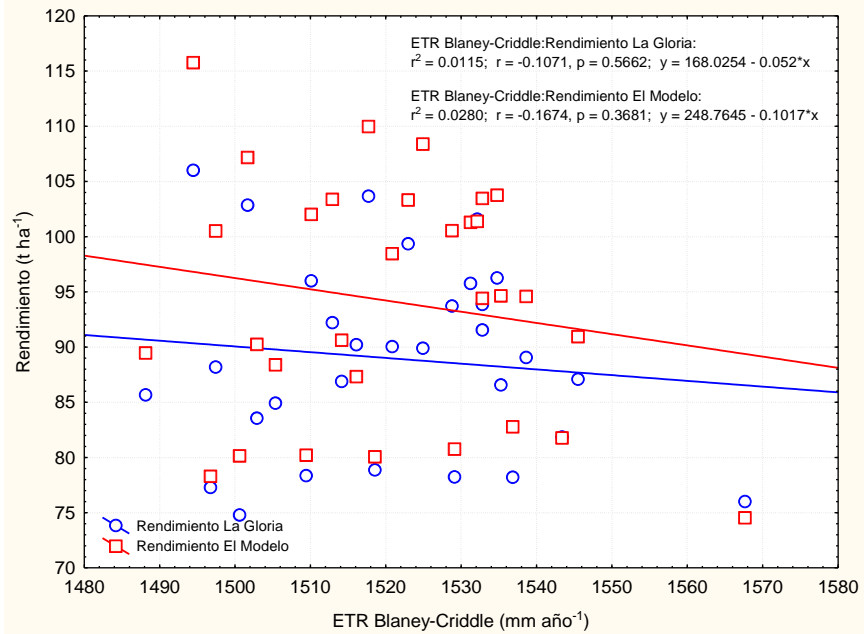


Figura 16. Correlación entre el rendimiento en campo de caña de azúcar registrado en los ingenios La Gloria y El Modelo y la ETR con el método Blaney-Criddle.

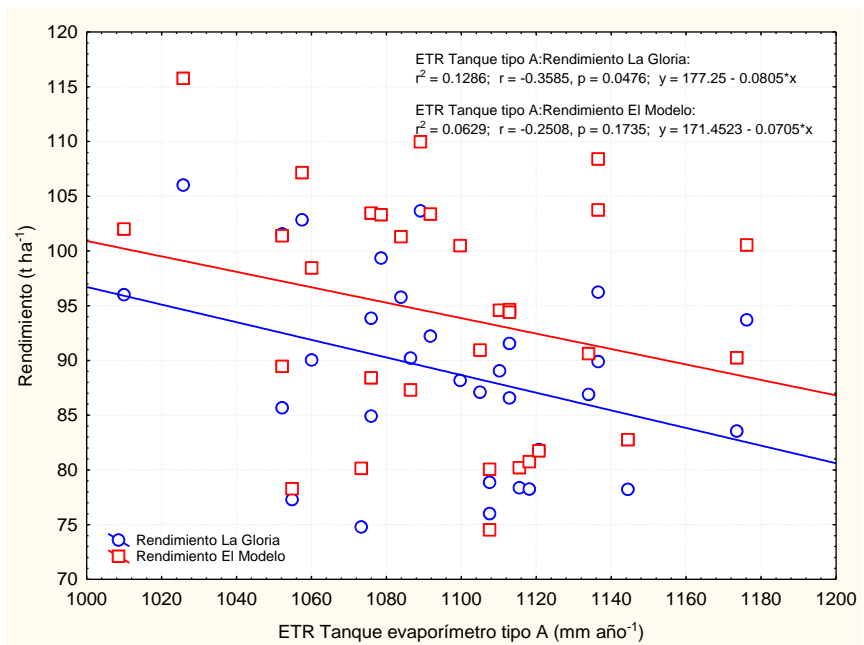


Figura 17. Correlación entre el rendimiento en campo de caña de azúcar registrado en los ingenios La Gloria y El Modelo y la ETR con el método Tanque Evaporímetro Tipo A.

El anterior análisis permitió identificar que el rendimiento registrado en campo, por los ingenios La Gloria y El Modelo, no contó con la disponibilidad de agua requerida, para cubrir el consumo de agua por parte del cultivo, determinado por la ETR. Con relación a

lo anterior, Humbert (1953), mencionó que existe mayor producción de caña de azúcar en lugares donde las necesidades de agua son mejor atendidas; concluyendo que el riego es necesario cuando las precipitaciones anuales se encuentran por debajo de 1500 mm; además, que con precipitaciones mayores, también se presentan periodos largos de sequías, los cuales retrasan el crecimiento.

Experimentos realizados en suelos arcillosos (Pacheco *et al.*, 1977), dedicados al cultivo de la caña de azúcar, reportaron un consumo total de agua de 1410 mm en caña planta, obteniendo un rendimiento agrícola de 116.64 t ha⁻¹. Esto demuestra que aun cuando se tiene registro de una alta evapotranspiración en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, se debe contar con una buena planificación de riego que cubra las necesidades hídricas del cultivo, considerando la disminución en los periodos de precipitación y periodos más prolongados de sequías con base en lo reportado por los escenarios climáticos del IPCC (2007).

Por otra parte, se realizó una correlación entre las variables climáticas como precipitación, evaporación, temperatura máxima y temperatura mínima, el rendimiento en campo de los ingenios La Gloria y El Modelo contra la ETR, calculada por los cuatro métodos seleccionados (Figura 18).

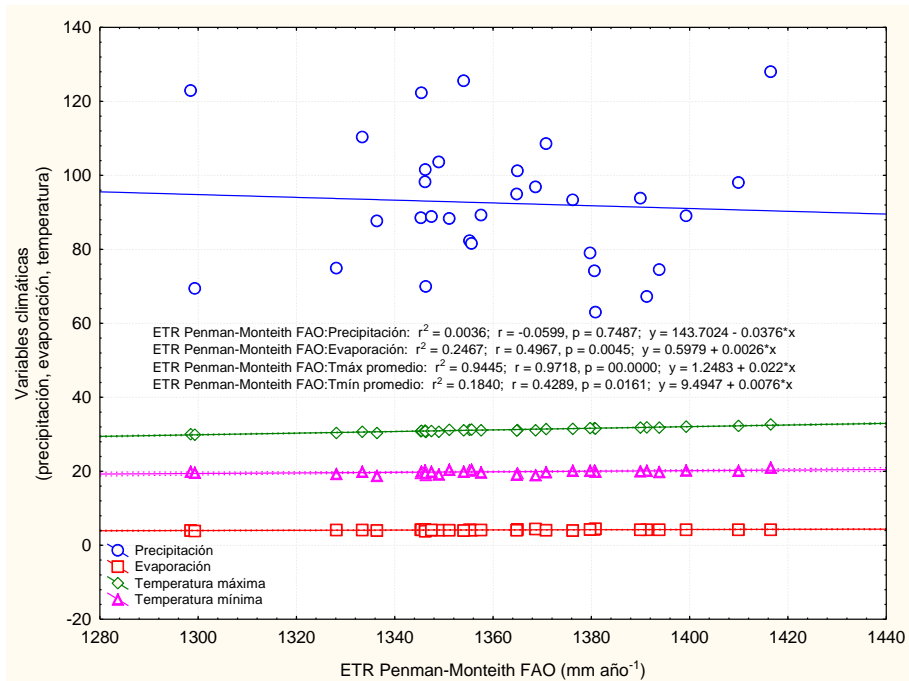


Figura 18. Correlación entre las variables climáticas de precipitación, evaporación y temperatura máxima y mínima, y la ETR por el método Penman-Monteith FAO (media mensual para cada año del periodo estudiado).

De este análisis se puede enfatizar que existe una alta correlación entre la temperatura máxima y la ETR estimada, tanto como para el método de Penman-Monteith FAO como para los métodos Hargreaves-Samani y Blaney-Criddle (Figura 19 y 20); para el método del Tanque Evaporímetro Tipo A, éste presenta una alta correlación con la variable climática de la evaporación (Figura 21).

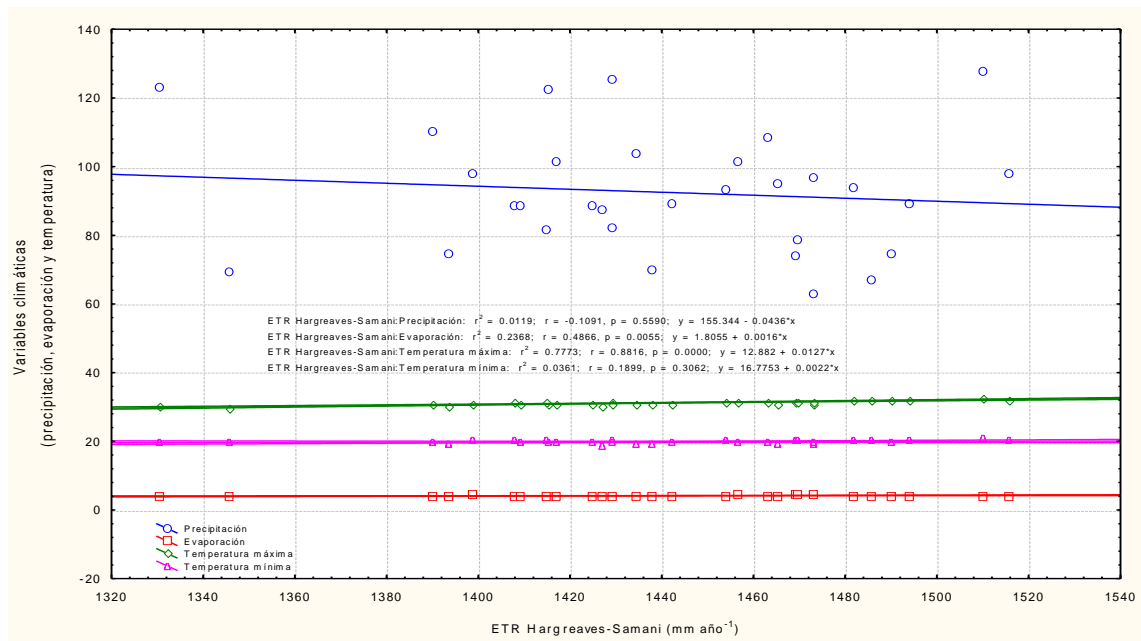


Figura 19. Correlación entre las variables climáticas de precipitación, evaporación y temperatura máxima y mínima, y la ETR por el método Hargreaves-Samani (media mensual para cada año del periodo estudiado).

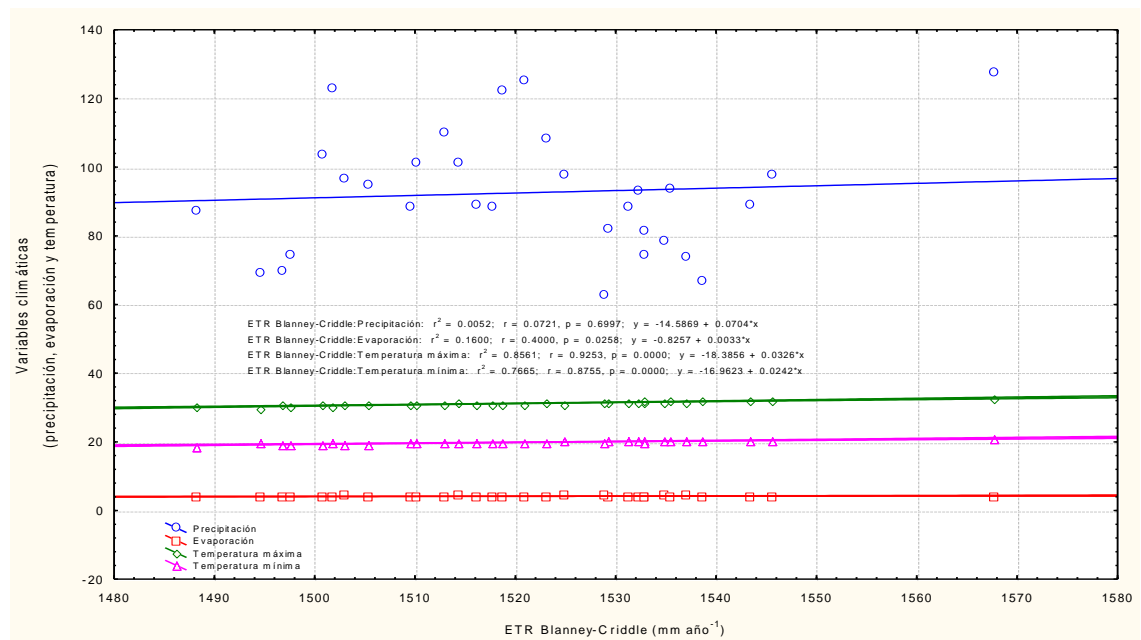


Figura 20. Correlación entre las variables climáticas de precipitación, evaporación y temperatura máxima y mínima, y la ETR por el método Blanney-Criddle (media mensual para cada año del periodo estudiado).

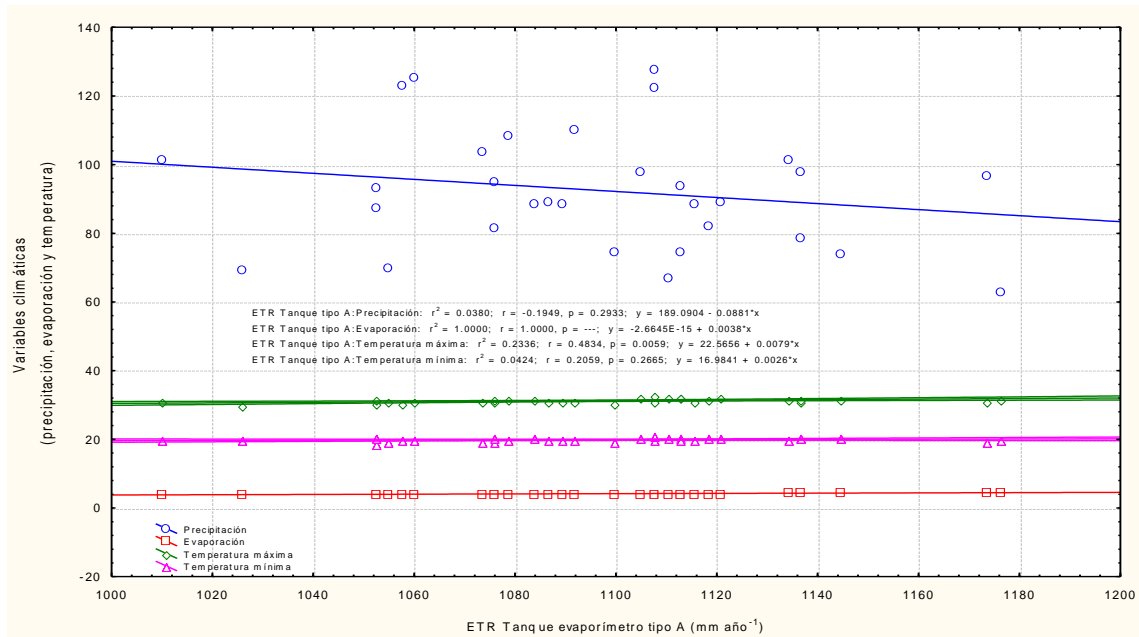


Figura 21. Correlación entre las variables climáticas de precipitación, evaporación y temperatura máxima y mínima, y la ETR por el método del Tanque Evaporímetro Tipo A (media mensual para cada año del periodo estudiado).

Analizando la Figura 21 se observó que la evaporación registrada en las estaciones climáticas, consideradas en este estudio, mostró un comportamiento similar a la evapotranspiración calculada por el método del Tanque Evaporímetro Tipo A. Este mismo comportamiento se ha reportado bajo condiciones de temperatura que oscilan en un rango de 5 a 30° (Wallace et al., 2005).

Como se analizó, en cada uno de los métodos existe una alta correlación entre la evapotranspiración y la temperatura, variable climática de mayor influencia para el cálculo de la misma. Lo anterior, se ha reportado por Blindeman (2000); Khanikar and Nath (1998); y Schmidt et al. (1987), quienes indicaron que la evapotranspiración se correlaciona negativamente con la humedad relativa y la nubosidad, pero de manera positiva con la temperatura del aire, la velocidad del viento, la radiación solar y las horas sol.

Tal como se observó en los resultados, se tiene que:

De la hipótesis particular uno, enunciada como: Las variaciones climáticas en precipitación (Pp), evaporación (Ev) y temperatura (T), como una expresión del cambio climático, influyen en el incremento de la ETR en caña de azúcar.

Respecto a lo anterior, se encontró que existe una alta correlación entre la ETR, calculada por los métodos Penman-Monteith FAO ($r=0.9718$; $p<0.5$), Hargreaves-Samani ($r=0.8816$; $p<0.5$), y Blaney-Cridle ($r=0.9256$; $p<0.5$), y el incremento de la temperatura; asimismo, existe una alta correlación entre la ETR, calculada por el método del Tanque Evaporímetro Tipo A, y la evaporación ($r=1$). De lo anterior se infiere que el cambio climático influye en el incremento de la temperatura y evaporación. Por lo tanto, no se rechaza la hipótesis particular uno.

De la hipótesis particular dos, postulada como: Existe una correspondencia entre el consumo de agua, determinado por la ETR, y el rendimiento en campo registrado en caña de azúcar en los ingenios La Gloria y el Modelo, como resultado del cambio climático.

Se encontró que existe una baja correspondencia entre el consumo de agua, determinado por la ETR, y el rendimiento en campo en caña de azúcar. Por lo tanto, las evidencias encontradas obligan, para esta investigación, a rechazar la hipótesis particular dos. Lo anterior, puede explicarse en términos de factores como: un manejo agronómico ineficiente del cultivo; falta de aplicación de riegos oportunos y con la frecuencia requerida; y patrones erráticos de precipitación, los cuales dan lugar a las variaciones de rendimientos por unidad de superficie registrados en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, Veracruz.

Por otra parte, la hipótesis general enunciada en los términos siguientes: Existe un aumento en la evapotranspiración real estimada (ETR) de la caña de azúcar debido a incrementos en la tasa de evaporación y temperatura, y cambios en los patrones de precipitación registrados en un periodo de 30 años (1980-2010); así como una correspondencia entre la ETR con los rendimientos de caña de azúcar observados en

dicho periodo en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, como resultado del cambio climático.

Con base en lo anterior, se rechaza parcialmente la hipótesis general, debido a que la evaporación y la temperatura, a través de las cuales se manifiesta el cambio climático, influyen directamente en el incremento de la ETR, pero no así el efecto de la precipitación y la ETR en el rendimiento. Finalmente, los bajos rendimientos de caña de azúcar, registrados en el periodo de estudio en la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo, se atribuyen, principalmente, a las prácticas ineficientes de agua, suelo, fertilizantes y control de plagas y enfermedades en este cultivo.

10. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se concluye que los datos registrados para el rendimiento en campo en los ingenios La Gloria y El Modelo, Veracruz, muestran una correlación baja entre éste y la ETR calculada para la zona de abasto de los ingenios referidos anteriormente, por tratarse de información climática muy dispersa.

Aun cuando existió un comportamiento constante de ETR, durante el periodo de 1980-2010, en la mayoría de los años se registraron rendimientos inferiores a 100 t ha^{-1} ; lo anterior pudo ser ocasionado por el mal manejo del cultivo, falta de organización en los planes de aplicación de riego durante los periodos de sequía y baja disponibilidad de agua como consecuencia de periodos cortos de precipitación.

Por otra parte, la temperatura es una variable climática que influye e impacta, en gran medida, la evapotranspiración real estimada en el cultivo de caña de azúcar, el cual es un cultivo C4 con un eficiente sistema fotosintético y de asimilación de CO_2 . Éste puede llegar a beneficiarse de estas características, siempre y cuando sus necesidades hídricas sean cubiertas con oportunidad y suficiencia, a fin de evitar el estrés hídrico del cultivo.

Además, el cambio climático juega un papel importante en la producción agrícola, primordialmente en la zona tropical, ya que se estiman incrementos en la temperatura y disminución en las precipitaciones, lo que puede resultar en pérdidas y bajos rendimientos en los cultivos. Por lo anterior y, con base en los resultados observados en esta investigación, la zona de abasto de los ingenios La Gloria y El Modelo pueden llegar a sufrir grandes afectaciones debido a este fenómeno, si no se aplican medidas de adaptación que hagan posible la obtención de mejores rendimientos de este cultivo por unidad de superficie.

11. LITERATURA CITADA

- Abtew, W., and J. Obeysekera. 1995. Lysimeter study of evapotranspiration of Cattails and comparison of three estimation methods. Transactions of the ASAE, 38(1):121-129.
- Arrascaeta, R. 2007. El Enfoque de Sistemas en las Organizaciones, Reflexiones en torno a las organizaciones. Macro Economía, 118(2):21-54.
- Bertalanffy Von, L. Teoría General de los Sistemas. Editorial Fondo de Cultura Económica. México. 1976.
- Blindeman, L. 2000. Effect of air humidity on growth, keeping quality and water management of cut roses. Verbodsnieuws. 44:8-18.
- Cabrera, J. A. y Zuaznabár, R. 2010. Impacto sobre el ambiente del monocultivo de la caña de azúcar con el uso de la quema para la cosecha y la fertilización nitrogenada. I. Balance del carbono. Cultivos Tropicales, 31(1):5-13.
- Cañizares, M.; Barroso, I.; Alfonso, K. 2004. Datos incompletos: Una mirada crítica para su manejo en estudios sanitarios. In: Gac Sanit, 18(1):58-63.
- Cassalett, D. C., Torres, A., Isaacs, E.C.H. (Ed). 1995. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cali, Colombia, CENICAÑA.
- Castillo, F. L., Castellvi S., F. 1996. Agrometeorología. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 517pp.
- Checkland, P. B. 1981. Systems Thinking, Systems Practice. J. Wiley. Chichester Sussex. 330p.
- Cohen, S., lanetz, A., y Stanhill, G. 2002. Evaporative climate at Bet Dagan, Israel, 1964-1998. Agricultural and Forest Meteorology 111: 83-91.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. 2011. Estadísticas del agua en México. Edición 2011. Cd. de México. 182 pp.
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar [CONADESUCA]. 2012. Primer estimado de producción de caña y azúcar zafra 2011-2012. p. 12.
- Contreras-Gallardo, S. 2008. Impacto de los sistemas de riego de baja presión en los agroecosistemas con caña de azúcar del municipio de Actopan, Veracruz. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados Campus Veracruz.

- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [CMNUCC]. 1992. Organización de las Naciones Unidas, Nueva York. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- De Juan Valero, J.A. y F. Martín de Santa Olalla. 1992. "La Medida de la Evapotranspiración". *Agronomía de Riego* editado por Martín de Santa Olalla, F. y De Juan Valero, J.A. Departamento de Producción Vegetal y Tecnología, Universidad de Castilla-La Mancha. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 732 pp.
- Doorenbos, J., y Pruitt, W. O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper, No. 24, FAO, Rome.
- Eguiluz R, L. L. 2007. La Teoría Sistémica, Alternativa para Investigar el Sistema Familiar, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Departamento de Educación Especializada (3ª reimp), México, D.F. 196pp.
- Estrategia Nacional de Acción Climática. [ENACC]. 2007. Respuesta de México ante el cambio climático global. http://www.semarnat.gob.mx/queessemarnat/politica_ambiental/cambioclimatico/Pages/estrategia.aspx
- Flores C., S. 1994. Las Plagas de la Caña de Azúcar en México. Editorial Offset Servicios Gráficos, Orel. México. 347pp.
- Fonseca, J., García, S. 1987. Necesidades de agua de la caña de azúcar para diferentes épocas de plantación y corte en el occidente de Cuba. Resúmenes I Encuentro Investigación y Producción en la agricultura cañera. Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar (INICA). pp221.
- Ghersa, C. M. y Martínez-Ghersa, M. A. 1991. Cambios ecológicos en los agrosistemas de la Pampa ondulada. Efectos de la introducción de la soja. *Ciencia e Investigación*, 5:182-188.
- Guerrero-Carrera, J. 2013. Percepción y adaptación de agricultores cañeros ante el cambio climático en Veracruz. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados Campus Veracruz.
- Guevara D., J. M. 2003. Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 128pp.
- Guevara D, J. M. 2006. La fórmula de Penman-Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETo. *Terra Nueva Etapa*. Vol. XXII, num 31. pp. 31-72.

- Hald A., B. 1999. Weed vegetation (wild flora) of long established organic versus conventional cereal fields in Denmark. *Annals of Applied Biology* 134: 307-314.
- Hill, R. W. 1977. Discussion of consumptive use of water and irrigation requirements by M. E. Jensen. *Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE*, 103 (IR\22):290p.
- Hillel, D. 1990. Role of Irrigation in Agricultural Systems, *Irrigation in Agricultural Crops*. American Society of agronomy.
- Howell T., A., J. L. Steiner, A. D. Schneider, and S. R. Evett. 1995. Evapotranspiration of irrigated winter wheat southern high plains. *Transactions of the ASAE*, 38 (3): 745-759.
- Humbert, R. P. 1953. Basic problems of sugarcane nutrition. II Applying basic facts in sugarcane fertilization. *In: Proceeding of the International Society of Sugar Cane Technology*. 8:71-79.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA]. 2013. Informe Final. Riego presurizado con uso de energía renovable. México, D.F. 24pp
- IPCC [Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático]. 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 976 pp.
- IPCC [Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático]. 2014: Resumen para responsables de políticas. En: *Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlomer, C. von Stechow, T. Zwickel y J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de America.
- Jensen, M. E. 1974. *Consumptive use of water and irrigation water requirements*, ASCE, New York, 215pp.
- Jensen M., E., R. D. Burman, and R. G. Allen. 1990. *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE-Manuals and Reports on Engineering Practice, N° 70.
- Jiménez O, F., y Hernández C, R. 1990. Estudio de la evapotranspiración potencial en Honduras. Secretaría de Recursos Naturales. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 60pp.

- Johansen B, O. 1993. Introducción a la Teoría General de Sistemas, Editorial Limusa, México, D.F., 167pp.
- Khanikar, P. and Nath, K. 1998. Relationship of open pan evaporation rate with some important meteorological parameters. *Journal of the agricultural Science Society of North East India*. 11:46-50.
- Lamelas, C.; Ferrer R, M., Oviedo S, M. T. 2008. La eficiencia biológica y tecnológica en el uso del agua para el riego de la caña de azúcar, *Revista Cuba Caña*, 1:55-59.
- Landeros-Sánchez, C., M. Castañeda-Chávez, R. F. Lango, J. C. Moreno-Seceña y G. M. Palomarez. 2007. Contaminación del Agua por nitrógeno causada por la agricultura en zonas cañeras de Veracruz, México. Memoria del IX Simposio Internacional y IV Congreso Nacional de Agricultura Sostenible, Veracruz, México. pp. 371.
- Linsley, R. L., Kohlev, M. A., Paulhus, J. L. H. 1975. *Hydrology for Engineers*. Ed. McGraw Hill, New York. 508pp.
- López, J. y Dennett, M. 2005. Comparación de dos métodos para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o) en una zona semárida de Venezuela. *Bioagro*. 17(1): 41-46.
- Luis, A., Diaz, M. J., Miranda, M. 1988. Estimación de la evapotranspiración real de la caña de azúcar a partir de los datos de temperatura, *Ingeniería Hidráulica*, IX (2):117-120.
- Marten G., G. 1988. Productivity, Stability, Sustainability, equitability and autonomy as properties for agroecosystem assessment, *Agricultural Systems*, 26:291-316.
- Miller, G., 2007, *Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, un enfoque integral*, 8va edición, Editores Internacional Thomson, México.
- Moreno-Seceña, J. C. 2010. Evaluación del manejo del nitrógeno en el agroecosistema caña de azúcar. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados Campus Veracruz.
- Moyer, M. 2010. How much is left? A graphical accounting of the limits to what one planet can provide, *Scientific American*, 303(3): 74-81.
- O'Connor, J; y McDermott, I. 1998. *Introducción al pensamiento sistémico*. Editorial Urano, Barcelona, España, 304pp.
- Okey B., W. 1996. Systems approaches and properties, and agroecosystem health. *J. Environm. Manage.* 48:187-199 pp.

- Ortíz, C. 1996. Análisis de la Evapotranspiración usando la ecuación de Penman-Monteith, bajo diferentes condiciones atmosféricas y dos niveles de humedad en el suelo. Tesis de Grado. Escuela de Agronomía, Universidad de Talca.
- Pacheco J., N. A y Gutiérrez, A. 1977. Respuesta de la caña de azúcar a diferentes niveles de humedad en el suelo, Universidad Central de Las Villas, Centro Agrícola, 4(1):101-112.
- Rana, G., Katerji, N., Mastrorilli, M., El Moujabber, M., and Brisson, N. 1997. Validation of a model of actual evapotranspiration for water stressed soybeans. *Agricultural and Forest Meteorology*, 86: 215-224.
- Romero C, A. L. 1991. Formulación de los modelos matemáticos para la determinación de los principales elementos que intervienen en el cálculo del régimen de riego en caña planta, Tesis en opción al Grado Científico de Doctor, ISPJAE, Habana, Cuba, 165p.
- Schmidt, G. M., Smajstrla, A. G., and Zazueta, F. S. 1987. Estimating potential evapotranspiration from temperature in a humid region. *Proceedings of the Soil and Crop Science Society of Florida*. 46:17-21.
- Shih, S.F. 1989. "GOES Satellite Data in Rainfall Estimation", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 115(5): 1983-1986", *Reviews of Geophysics*, 25(2):113-118, 839-852.
- Soriano, A., Aguiar, M.R. 1998. Estructura y funcionamiento de agroecosistemas. *Ciencia e Investigación*, 50:63-74.
- Subirós R, F. 1995. El cultivo de la caña de azúcar. Editorial Universidad Estatal a Distancia (EUED), San José, Costa Rica. 448pp.
- Thompson, G.D. 1976. Water use by sugarcane. *South African Sugar Journal*, Durban, v. 60. p593-600.
- Vega M, P. 1998. Teoría de sistemas y evaluación de programas sociales. *Revista Última Década*. No. 9. CIDPA. Viña del Mar, Chile. 151-174pp.
- Wallace, S. D., Nivala, J. A., and Parkin, G. F. 2005. Relationship between evapotranspiration and pan evaporation in cold-climate subsurface-flow constructed wetlands.
- Yang, S. J.; Torres, J. S.; Villegas, F. 1985. Evapotranspiration and irrigation requirements of the sugar cane in the Cauca valley. In: *Inter-American Sugarcane Seminars 1*. Florida, EE.UU. p459-472.