



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS

**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE LA PRODUCCIÓN
DE CAÑA DE AZÚCAR PARA LOS INGENIOS DE LA CUENCA
DEL PAPALOAPAN**

T E S I S



APROBADA

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y
DE LOS RECURSOS NATURALES**

P R E S E N T A:

ÁNGELES SUHGEY GARAY JÁCOME

**BAJO LA SUPERVISIÓN DE: RAMÓN VALDIVIA ALCALÁ, DOCTOR EN
CIENCIAS**



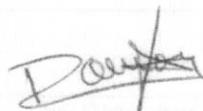
CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO, 2020

ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE LA PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR PARA LOS INGENIOS DE LA CUENCA DEL PAPALOAPAN

Tesis realizada por Ángeles Suhgey Garay Jácome bajo la dirección del Jurado indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

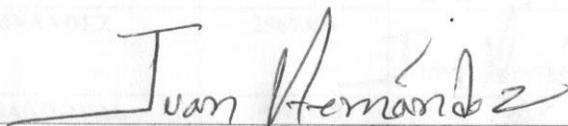
MAESTRA EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE LOS RECURSOS NATURALES

DIRECTOR:



DR. RAMÓN VALDIVIA ALCALÁ

ASESOR:



DR. JUAN HERNÁNDEZ ORTIZ

ASESOR:



DR. FERMÍN SANDOVAL ROMERO

ÍNDICE

LISTA DE CUADROS

LISTA DE FIGURAS

RESUMEN

ABSTRAC

.....	1
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Objetivo General	16
1.3 Objetivos Específicos	16
1.4 Hipótesis	17
1.5 Hipótesis específicas	17
2. REVISIÓN DE LITERATURA	18
3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	24
4. MARCO TEÓRICO	29
4.1 Valoración del agua	29
4.2 Economía de la producción	32
4.2.1 Función de producción	32
4.2.2 Función de costos	38
4.2.3 Función de beneficios	40
4.3 Enfoques usados en el análisis del uso de agua	42
4.3.1 Enfoque de cuenca	42
4.3.2 Gestión integrada de los recursos hídricos GIRH	46
4.4 Gobernanza	47
4.5 Huella hídrica	47
5. METODOLOGÍA	55
6. RESULTADOS	64
6.1. Resultados huella hídrica	64
6.2 Huella hídrica en términos económicos	69
CONCLUSIONES	74
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS	79

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Metodologías que anteceden el desarrollo de la metodología de cuantificación de la huella de agua de acuerdo con ISO 14046.....	18
Cuadro 2. Operación de los ingenios en la Cuenca del río Papaloapan	26
Cuadro 3. Ubicación de los Ingenios.....	27
Cuadro 4. Actividades donde demandan agua para su desarrollo	43
Cuadro 5. Servicios relacionados con el agua	44
Cuadro 6. Marco histórico de la Huella Hídrica	49
Cuadro 7. Huella hídrica.....	51
Cuadro 8. Características geográficas de los ingenios analizados	55
Cuadro 9. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas.....	56
Cuadro 10. Temperatura y precipitación del Ingenio La margarita.....	61
Cuadro 11. Estimación de la huella hídrica	66
Cuadro 12. Rendimiento y superficie de caña de azúcar en el área de los ingenios del Papaloapan	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de los acuíferos sobreexplotados en México.....	24
Figura 2. Ubicación del Estado de Veracruz	25
Figura 3. Ubicación del río Papaloapan.....	25
Figura 4. La producción con un factor variable.....	35
Figura 5. La producción con un factor variable.....	36
Figura 6. La producción con dos factores variables	37
Figura 7. Las curvas de costes de una empresa.....	40
Figura 8. La maximización de los beneficios a corto plazo.....	41
Figura 9. Marco nacional de contabilidad de agua	52
Figura 10. Interfaz inicial de la calculadora ETo de la FAO.....	57
Figura 11. Interfaz de declaración de datos meteorológica de la calculadora de la evapotranspiración de referencia de la FAO	59
Figura 12. Interfaz de captura de la temperatura para la estimación de la Eto	60
Figura 13. Huella hídrica estimada en la cuenca del Río Papaloapan	65
Figura 14. Evapotranspiración.....	67
Figura 15. Huella hídrica y Evapotranspiración en la cuenca Papaloapan.....	68
Figura 16. Huella hídrica por hectárea	70
Figura 17. Ingreso por M ³ de Huella hídrica	71
Figura 18. Valor de la producción por huella hídrica	72

ABREVIATURAS

AEA = Asociación Electrotécnica Argentina

AIE= Agencia Internacional de la Energía

ACV = Análisis de Ciclo de Vida

CNPR = Confederación Nacional de Productores Rurales

CONAGUA= Comisión Nacional del Agua

CONADESUCA= Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña

CLICOM= Base de datos climatológica nacional

CICESE= Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

°C= Símbolo de grados

DR = Distrito de Riego

Eto = Evapotranspiración de referencia

FAO = Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

GIRH Gestión integrada de los recursos hídricos

IDEAM = Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

IICA = Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura

ISO = Organización Internacional de Normalización

M³= metros cúbicos

Mm= Milímetro

OCDE = Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

ONU = Organización de las Naciones Unidas

PIASA= Proveedores de Ingeniería Alimentaria

PNH= Programa Nacional Hídrico

SEMARNAT = Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

UNEP= Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente

UICN= Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza

\$/ha=precio hectárea

DEDICATORIAS

A mis padres Reyna y Francisco

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

A mi madre por ayudarme a construir mis sueños, por estar dispuesta acompañarme cada larga y agotadora noche de estudio y sobre todo por ser una mujer excepcional en todo momento.

A mi padre por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, por cada consejo y cada una de sus palabras que me guiaron durante mi vida.

A mis hermanos

Alan y Brandon porque son la razón de sentirme tan orgullosa de culminar mi meta, gracias a ellos por confiar siempre en mí, y sobre todo sé que contare con su apoyo cuando los necesite.

A mi director y mis asesores

Dr. Ramon Valdivia Alcalá, Dr. Juan Hernández Ortiz y Dr. Fermín Sandoval Romero por su valiosa contribución a mi formación, por sus comentarios y sugerencias sobre este trabajo y por compartir su conocimiento.

Y sobre todo gracias a todas las personas que me apoyaron y creyeron en la realización de esta tesis.

AGRADECIMIENTOS

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

Por el apoyo económico otorgado para la realización y culminación de mis estudios de posgrado, porque es necesario tener un apoyo para quienes deseamos realizar un posgrado enfocado a la Investigación.

**A la Universidad Autónoma
Chapingo (DICEA)**

Por permitirme que se hagan realidad mis sueños, para seguir preparándome y desarrollarme como profesionalista.

Al Dr. Ramón Valdivia Alcalá

Por todo su apoyo, sus sabios consejos en el tiempo que estuve en el posgrado, gracias a su su conocimiento, su experiencia fue de gran ayuda para poder desarrollar cada etapa de esta investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: ÁNGELES SUHGEY GARAY JÁCOME

Fecha de nacimiento: 08 de abril de 1996

Lugar de nacimiento: Texcoco, Estado de México

CURP: GAJA96040MMCRCN09

Profesión: Licenciada en Administración y Gestión de Pequeñas y medianas Empresas

Cédula profesional: 11531715

Desarrollo académico

Escuela Preparatoria Texcoco, UAEM, Escuela Preparatoria Texcoco (EPT).

Licenciatura en Administración y Gestión de PyMES, en Universidad Politécnica de Texcoco, (UPTex).

RESUMEN GENERAL

ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE LA PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR PARA LOS INGENIOS DE LA CUENCA DEL PAPALOAPAN

“Tesis de Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales, Universidad Autónoma Chapingo”

En el mundo y en México la agricultura usa aproximadamente el 75% del agua fresca. La escasez del agua a nivel mundial obliga que cada vez se utilicen técnicas ahorradoras de agua en el sector agropecuario, ya que tiene valor económico. Un concepto importante que ayuda a conocer la cantidad de agua utilizada en la producción y el consumo, es la huella hídrica. El objetivo de esta investigación es estimar la huella hídrica para el cultivo de caña de la cuenca Papaloapan para proponer medidas que contribuyan a mejorar la eficiencia del uso del agua en este cultivo. Para esta investigación se llevó a cabo el cálculo de la huella hídrica de los 12 ingenios azucareros de la región del Papaloapan, se realizó siguiendo el procedimiento de Haro et al (2014), Allen et al (2006), FAO (2006), principalmente. La mayor huella hídrica se registra en las áreas que abastecen de caña a los ingenios de el Carmen (328 m³ por tonelada de caña), el de San Nicolás (313 m³ por tonelada de caña) y el de San José de Abajo (309 m³); mientras que el Ingenio de San Pedro registró la menor huella hídrica (239 m³ por tonelada). Por hectárea las superficies que suministran caña para El Carmen tienen el valor más alto con 21 301 m³, seguido por San Nicolás con 21 221 m³ y por San Miguelito con 20 923 m³. En estas zonas es posible reducir la huella hídrica haciendo un mejor manejo del cultivo y usando variedades con más productividad.

Palabras clave: Huella hídrica, escasez de agua, caña de azúcar, eficiencia.

Tesis de Maestría en Ciencias de la Economía Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Ángeles Suhgey Garay Jácome.

Director de Tesis: Dr. Ramón Valdivia Alcalá.

ABSTRACT

ESTIMATION OF THE WATER FOOTPRINT OF SUGAR CANE PRODUCTION FOR THE PAPALOAPAN BASIN MILLS

**"Master of Science Thesis in Agricultural and Natural Resources
Economics, Universidad Autónoma Chapingo"**

Worldwide and Mexico, agriculture uses approximately 75% of fresh water. The scarcity of water worldwide means that water-saving techniques are increasingly being used in the agricultural sector, as it has economic value. An important concept that helps to know the amount of water used in production and consumption is the water footprint. The aim of this study is to estimate the water footprint for sugar cane cultivation in the Papaloapan basin in order to propose measures that may contribute to improving water use in this crop. For this research, the water footprint of 12 sugar mills of the Papaloapan region were calculated, following mainly the procedure of Haro et al (2014), Allen et al (2006), and FAO (2006). The largest water footprint is recorded in the areas that supply sugar cane to El Carmen (328 m³ per ton of sugar cane), San Nicolás (313 m³ per ton of sugar cane) and San José de Abajo (309 m³) mills, while the San Pedro mill had the smallest water footprint (239 m³ per ton). Per hectare, the areas that supply sugar cane to El Carmen have the highest value with 21,301 m³, followed by San Nicolás with 21,221 m³ and San Miguelito with 20,923 m³. In these areas it is possible to reduce the water footprint by better managing the crop and using varieties with higher productivity.

Keywords: Water footprint, water scarcity, sugar cane, efficiency

Master's Thesis in Agricultural Economics, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Ángeles Suhgey Garay Jácome

Thesis Director: Ramón Valdivia Alcalá

1. INTRODUCCIÓN

México tiene una extensión territorial de 1,959,248 kilómetros cuadrados. La precipitación pluvial es desigual e irregular en el país, escasa en el norte y noroeste del país y la península de Baja California, y abundante en el sureste y en las vertientes del Golfo de México y del Pacífico, al sur del Trópico de Cáncer. La disponibilidad de agua per cápita ha disminuido entre 1950 y 2013 de 18,035m³/hab/año a 3,982 m³/hab/año (SEMARNAT, 2013)

De acuerdo con SEMARNAT (2013), el agua es fundamental para la vida y el desarrollo de las actividades económicas. En México el 77% del agua es para riego agrícola, 14% para uso público urbano y 9% para industrias autoabastecida y termoeléctricas.

Se ha propuesto en los últimos años que los temas de agua se aborden con un enfoque de cuencas hídricas, que constituyen la principal fuente de agua dulce de la mayoría de las ciudades del mundo; éstas son muy importantes para mantener la biodiversidad y la integridad de los suelos para reducir y evitar la erosión de los mismos.

En las últimas décadas se ha registrado una gran pérdida de vegetación natural, la cual constituye una medida básica para conocer el estado ambiental de las cuencas y la posibilidad que éstas tienen de otorgar servicios ambientales. En México, entre 1976 y 2009, 80 % de las cuencas perdieron entre 1 y 20 % de su vegetación natural, mientras que 12 cuencas, situadas principalmente en el Golfo de México, perdieron 80 % de su vegetación natural (Cuevas, et. al., 2010).

En la actualidad en México las actividades agrícolas tienen una gran importancia en el medio rural como fuente de ingresos de sus habitantes y como proveedor de alimentos para la sociedad completa, y para la exportación. El sector agrícola desarrolla sus actividades prácticamente en las localidades rurales y aprovecha los recursos naturales que allí existen incluyendo el agua, y es la principal fuente de empleo para la población que reside en el medio rural.

Dado al aumento de la demanda de agua en la actualidad, debido al aumento en la población, a la competencia que hacen otros usos por el recurso, a las particularidades que ha impuesto el cambio climático (fenómenos hidrológicos atípicos en intensidad y en épocas del año), así como las practicas humanas que conducen a la contaminación del recurso, han motivado que se desarrollen metodologías que promueven o bien mejoras en el uso del recurso hídrico, o bien que generen indicadores que permitan inducir mejoras en su uso y asignación.

En este contexto se ha desarrollado el concepto de huella hídrica. Es importante conocer que la huella hídrica se muestra como un indicador de sostenibilidad que permite identificar relaciones causa efecto a nivel socioambiental, siendo las actividades socioeconómicas el principal factor de presión sobre el agua. Establece una relación directa entre los sistemas hídricos y el consumo humano. Esta relación puede ayudar a determinar factores que explican tanto la escasez como la contaminación del agua, pero también puede permitir la mejora del uso del agua en la producción agrícola.

En los procesos de la agricultura y la ganadería, debe medirse la huella hídrica a lo largo de las diferentes etapas de la producción de la cadena productiva hasta el logro del producto final. Al no tener esta herramienta los agricultores no podrían identificar la productividad del agua.

En la agricultura hay cultivos que para su desarrollo requieren más agua que otros; es el caso de la caña de azúcar que requiere grandes cantidades del recurso hídrico, es por esto y por la concentración de este cultivo en esta región se ha seleccionado a la cuenca del Papaloapan que históricamente ha sido una zona cañera.

1.1 Planteamiento del problema

El agua es un recurso que se usa prácticamente en todas las actividades productivas, además de ser esencial para la vida humana, la higiene y los ecosistemas. En México según Cotler, et.al., (2013) hay 13 cuencas sobre las cuales se concentrado la presión sobre los recursos hídricos, entre las que se encuentra la del Río Papaloapan.

Las condiciones de estas cuencas, sobre todo la demanda que se obtiene es que tiene altos los niveles de recarga y de precipitación, es por ello que es de suma importancia la huella hídrica y su medición.

El cultivo de caña de azúcar requiere mucha agua durante su producción, en México este cultivo tiene aproximadamente el 5% de la superficie de riego. Tener un indicador medioambiental que define el volumen total de agua dulce utilizado para producir los bienes y servicios que habitualmente consumimos o una variable necesaria que nos dice el agua que nos cuesta fabricar, un producto como es la huella hídrica. Tener el conocimiento de la huella hídrica en sus tres manifestaciones, (azul, verde y gris) ayudará a mejorar la eficiencia con que se use el agua en el mismo. La obtención de indicadores de producción y económicos darán elementos para hacer intervenciones de mejora en el uso del agua en la zona.

En general el problema de la escasez de agua en México y el mundo se ha agudizado, lo cual se complica si se considera el tema de la contaminación hidrológica tanto superficial como subterráneas. Aspecto que agudiza por la presencia del cambio climático y sus manifestaciones en abundantes lluvias en corto plazo y prolongados periodos de escasez.

Existen aprovechamientos que carecen de títulos de concesión o asignación, la medición del agua extraída y la verificación de los aprovechamientos y descargas son bajas e insuficientes. En las zonas de libre alumbramiento no se tiene control de los aprovechamientos; además de que prevalece un incremento de obras que

invaden zonas y cauces federales que generan riesgos a la sociedad (SEMARNAT, 2013).

El indicador (huella hídrica) trata de suplir esta deficiencia, buscando evaluar el nivel de apropiación y de igual modo todo el impacto sobre los recursos hídricos que requiere la producción de un bien o la prestación de un servicio a lo largo de toda su cadena de producción, incluyendo en el cálculo de las materias primas.

Al medir la huella hídrica se determinará la cantidad de agua consumida y desechada, con base en esto se pueden formular estrategias de racionalización con el fin de prevenir impactos severos en la disponibilidad del agua, frente a las posibles crisis mundiales por escasez del recurso. Al poder tener su determinación se puede empelar como un indicador preciso, con el cual se permite comparar sociedades y evaluar su impacto al recurso hídrico.

1.2 Objetivo General

- Estimar la huella hídrica del cultivo de caña de azúcar en los ingenios de la cuenca Papaloapan, para proponer medidas que contribuyan a mejorar la eficiencia del uso del agua en este cultivo.

1.3 Objetivos Específicos

- Estimar la huella hídrica considerando conceptos económicos para el cultivo de caña en los ingenios de la cuenca Papaloapan.
- Identificar ingenios que pueden disminuir la huella hídrica en las superficies que los abastecen de caña de azúcar.
- Sistematizar experiencia de evaluación de huella hídrica en la cuenca Papaloapan, para estimar la huella hídrica del cultivo de caña.

1.4 Hipótesis

- La huella hídrica del cultivo de la caña de azúcar en los ingenios de la cuenca Papaloapan, registra niveles superiores a las calculadas para otros cultivos para los que existen estimaciones.

1.5 Hipótesis específicas

- Es posible realizar estimaciones de la huella hídrica del cultivo de la caña de azúcar en la cuenca del Papaloapan.
- No en todos los sitios en los que se siembra la caña de azúcar se presenta la misma huella hídrica, por lo que los esfuerzos por reducirla tendrían diferentes alcances.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Existe una gran variedad de estudios empíricos sobre el tema de “huella hídrica” (water footprint) como un indicador medioambiental que se encarga de definir el volumen de agua que se utiliza para la producción de un bien o servicio, consumidos por el individuo o comunidad, así como los producidos por los comercios y las industrias. Este concepto fue creado por Hoekstra, (2002) para obtener un indicador que ayudara a medir el consumo directo e indirecto de agua por parte de individuos, comunidades y en procesos productivos.

La cuantificación de la huella de agua, de acuerdo con la norma internacional ISO 14046:2014 “Gestión Ambiental- Huella de agua- Principios, requisitos y directrices” (ISO 14046, 2014), se basa en las normas internacionales ISO 14040 (ISO 14040, 2006) e ISO 14044 (ISO 14044, 2006) sobre Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Algunos conceptos y metodologías previamente desarrollados para evaluar la demanda de recursos y la presión sobre el ambiente que generan las actividades humanas incluyen la “huella ecológica” (Rees, 1992), el “agua virtual” (Allan, 1998) y la “huella hídrica” (Hoekstra, 2003).

Cuadro 1. Metodologías que anteceden el desarrollo de la metodología de cuantificación de la huella de agua de acuerdo con ISO 14046

<p>Huella ecológica (Rees, 1992)</p>	<p>Objetivos: Cuantificar la cantidad de superficie de terreno necesaria para desarrollo sostenible de una sociedad: producir lo que la población consume y absorber los desechos. Metodología: Usa rendimientos de productos primarios (cultivos, bosques, pesca etc.) para calcular el área necesaria para soportar cierta actividad.</p>
<p>Agua virtual (Allan, 1998)</p>	<p>Objetivo: determinar el agua incorporada a productos "caro en agua", fabricados en los países que padecen estrés hídrico, con base en el uso evaporativo del recurso hídrico agrícolas u otros a lo largo del ciclo de vida. Metodología: Promueve el análisis de las importaciones y exportaciones de productos " caros en agua</p>
<p>Huella hídrica (Hoekstra, 2002)</p>	<p>Objetivo: Cuantificar la cantidad de agua requerida por un consumidor, un producto, una empresa o una región geográfica dividida en componentes azul, verde y gris.</p>

	Metodología: cuenta con tres fases: definición del objetivo y el alcance, contabilidad y formulación de la respuesta. Es utilizada por la iniciativa internacional Wáter Footprint Network (WFN).
Evaluación de la sustentabilidad WFN (Hoekstra, 2011)	Objetivo: Complementar la metodología WFN para otorgar mayor información incluyendo aspectos económicos y sociales relacionados con el uso del agua. Metodología: Comparar el agua azul contra el agua superficial subterránea y el agua gris con la capacidad de asimilación de contaminación de la cuenca. Además, realiza un análisis de eficiencia de uso el recurso y analiza si los efectos son distribuidos equitativamente entre las partes involucradas.
Huella de Agua (ISO 14046,2014)	Objetivo: cuantificar los impactos potenciales relacionados con el uso del agua en el ciclo de vida de un producto, considerando impactos en el ecosistema, salud humana y recursos. Metodología: Cuenta con cuatro fases iterativas: definición del objetivo y el alcance, análisis del inventario de la huella de agua, evaluación del impacto de la huella de agua e interpretación. Puede formar parte de un estudio de análisis de ciclo de vida o ser una evaluación independiente.

Fuente: Elaboración propia con información de Huella de Agua (ISO 14046) en América Latina. Análisis y recomendaciones para una coherencia regional (2016).

Hoekstra et al. (2011) presentaron un manual para ayudar en la evaluación de la huella hídrica, presentándolo como una herramienta para promover y apoyar el uso sostenible del recurso hídrico a través de información transparente y completa sobre el uso, consumo y la contaminación del agua, hecho por individuos, comunidades y procesos agrícolas, industriales y de servicios.

Los enfoques de los estudios sobre la huella hídrica se han aplicado a cuencas, como el caso de la cuenca del río Guadiana (Aldaya et al. 2010) y del río Guadalquivir (Dumont et al. 2013); también está el caso de la cuenca del río Heihe en China (Zeng et al. 2012); hay varios estudios geográficos de huella hídrica con un enfoque similar realizada por UNEP (2011), así como los hechos para el área de Hertfordshire y el norte de Londres, Inglaterra (Zhang et al. 2014). Estos estudios han mostrado que la evaluación de la huella hídrica aplicada a la cuenca, ofrece una comprensión completa e integrada de la apropiación humana del recurso hídrico, desde el punto de vista de consumo y contaminación del agua en relación

con la disponibilidad de agua para consumo humano, es decir, los usuarios o beneficiarios de esa cuenca, en un periodo de tiempo determinado (IICA, 2017).

Estos estudios mostraron con claridad la utilidad de evaluar las huellas hídricas de las cuencas, con la intención de proporcionar elementos útiles para la formulación de estrategias para alcanzar la asignación más eficiente y sostenible posible del agua. (Ib.2017)

Hay otros estudios de huella hídrica al nivel de cuenca como herramienta de apoyo a los procesos participativos de gestión integrada del recurso hídrico, en los cuales han participado organizaciones internacionales como la agencia suiza de cooperación en apoyo a países como Colombia para la cuenca del río Porce (CTA et al. 2013), se busca que estos estudios sean un complemento a los indicadores tradicionales de gestión del recurso hídrico por cuenca a nivel nacional (IDEAM 2014).

Estos estudios han mostrado que la evaluación de la huella hídrica aplicada a la cuenca, ofrece una comprensión completa e integrada de la apropiación humana del recurso hídrico, desde el punto de vista de consumo y contaminación del agua en relación con la disponibilidad de agua para consumo humano, es decir, los usuarios o beneficiarios de esa cuenca, en un periodo de tiempo determinado.

Debido a que la evaluación de la huella hídrica comprende un análisis de sostenibilidad en el que incluyen sus tres pilares (ambiental, económico y social), permite diseñar estrategias de respuesta realistas y que considera las necesidades de las personas y del medio ambiente, de manera participativa y con perspectiva de tiempo (IICA, 2017).

Vázquez y Lambarri (2017) realizaron un estudio en la cuenca del río Ayuquila; mencionan que en la cuenca del Río Ayuquila hay contaminación y escasez de agua; el principal objetivo fue apoyar la gestión de los recursos hídricos en la cuenca, en el sector agrícola a través del indicador de huella hídrica.

Se demostró que los mayores contribuyentes a la huella hídrica agrícola durante 2012 fueron la caña de azúcar y el maíz grano, representando el 40 y 37% de la HH

agrícola total, respectivamente. El 23% restante corresponde a otros cultivos como pastos, maíz forrajero, sorgo grano, elote, trigo grano y sandía (Vázquez y Lambarri 2017).

Otro resultado importante desde el punto de vista económico de conocer la huella hídrica, es su relación con la productividad aparente del agua. El cultivo más rentable fue la sandía, con 70.5 pesos por m³ de agua verde y 25 pesos por m³ de agua azul, y los menos redituables son los pastos 2.66 pesos (agua verde) y 4.48 pesos (agua azul), y el trigo grano con 8.30 pesos (agua verde) y 2.36 pesos (agua azul) (Ib. 2017).

A pesar de que la sandía es el cultivo más lucrativo en términos de productividad aparente del agua, su superficie de siembra apenas alcanza las 346 ha, con una producción anual de 8 650 toneladas, en contraste con la caña de azúcar y los pastos, que cubren una superficie de 8 446 y 20 338 ha, con una producción anual de 842 100 y 454 471 toneladas, respectivamente (Ib. 2017).

Vázquez y Lambarri (2017), estimaron también la huella hídrica azul de la producción de los 26 cultivos cosechados en el Distrito de Riego (DR) 011, ubicado en las subcuencas Río Lerma Río Lerma 5, en Guanajuato, aplicando el método Chapagain y Hoekstra (2014).

Se obtuvo la Huella Hídrica de cada cultivo que requiere cada módulo del DR 011 y aquella utilizada por tipo de fuente de abastecimiento. La huella hídrica total anual de agua superficial y subterránea estimada para producir los cultivos resultó ser de 287.39 hm³. De esta agua, 277 hm³, que representa el 96% del total anual, se consumen por solo seis cultivos.

En la comparación de los resultados de la HH (m³/t) o agua virtual por cultivo, con los valores en huella hídrica, los valores estimados en este estudio resultaron mayores en siete cultivos y menores para diez cultivos, y en dos cultivos los valores coincidieron. Asimismo, respecto a la productividad aparente, 14 cultivos, que suman una HH de 7.4 hm³, 2.6% del total anual, tienen una productividad mayor a los seis cultivos con mayor HH, lo que evidencia un uso poco eficiente del agua (Vázquez y Lambarri, 2017).

Ercin y Hoeskstra (2014) hicieron un estudio cuyo objetivo fue comprender los cambios en la huella hídrica de producción y consumo para futuros posibles por región y elaborar los principales impulsores de este cambio hasta 2050. Evalúan flujos virtuales de agua entre algunas regiones y así mostrar la dependencia sobre los recursos hídricos y llegar a diferentes futuros posibles; constituye el primer estudio de escenario de huella de agua global y dan una explicación de cómo la huella hídrica de la humanidad cambiará en el transcurso de los años hasta llegar al año 2050.

Se ha evaluado también la huella hídrica gris, que es agua contaminada, como el caso del agua que se contamina por pesticidas en un suelo cultivado con caña de azúcar en la zona norte del estado de Pernambuco, Brasil (Lins et al., 2019). En los cultivos especialmente los de caña, se aplican diferentes agroquímicos y como resultado aparecen en una mezcla con diferentes concentraciones de agua. Se utiliza un modelo para calcular y analizar el impacto del agua contaminada y sus mezclas.

En Argentina se realizó un estudio para calcular la HH en caña de azúcar en la provincia de Tucumán (Jorrat M. et al, 2018). Se realizó la comparación de diferentes prácticas de gestión ya que la industria del alcohol de azúcar desempeña un papel importante en la economía de la provincia de Tucumán. Señalan que cuantificar la cantidad de agua consumida en el desarrollo del cultivo de caña, así como la utilizada en la producción de azúcar y bioetanol y de otros subproductos es fundamental para definir políticas que permitan la sostenibilidad de la producción de azúcar y bioetanol. Se demostró que la huella hídrica verde manifiesta un comportamiento contrapuesto con relación a los niveles tecnológicos.

La determinación de la huella hídrica ha mostrado gran importancia en el ámbito de la conservación del medio ambiente, es por eso que se utiliza para saber sobre el volumen de agua en cuencas hidrográficas. Vale F. et al (2016), hicieron un estudio de la huella hídrica de la caña de azúcar bajo diferentes prácticas de gestión en Brasil con ese enfoque. El objetivo de este estudio fue realizar una evaluación de la

huella hídrica en la cuenca Tieceare Jacare, analizando la situación general para formular una respuesta constructiva de reducción en la huella hídrica mediante el uso de vinaza para la fertirrigación. Ellos concluyeron que el mayor porcentaje de la huella hídrica verde contra la huella hídrica azul, confirma la importancia del agua de lluvia lo que respalda por qué en la producción de la caña de azúcar brasileña los productores limitan su producción a regiones de lluvias razonable.

Kongboon & Sampattagul (2012), estudiaron la huella hídrica de la caña de azúcar y la yuca en el norte Tailandia para para saber el efecto sobre el volumen del uso del agua en la agricultura en esos cultivos. Indican que el principal problema que enfrentará Tailandia en el futuro será la escasez de agua, sí este recurso no se gestiona adecuadamente. Demostraron la importancia de la gestión del agua para el uso sostenible de forma adecuada para la producción de bioenergía y para producir alimentos.

Todos los aspectos de la vida de una persona especialmente de hoy en día, implican el uso de energía, ya que les resulta difícil poder estar sin electricidad, sin baterías, gasolina, u otros insumos y materias primas que son posibles para facilitar las actividades productivas de la región.

Gerbens-Leens et al (2012), analizaron las preocupaciones sobre la seguridad energética y el cambio climático que estimulan la evolución hacia la producción y el uso de las energías renovables. Evalúan los cambios globales en el uso del agua relacionados con el aumento del uso de biocombustibles para el transporte por carretera en 2030 y la contribución potencial a la escasez de agua.

Mekonnen & Hoekstra (2010), hicieron un estudio para evaluar la huella hídrica azul, verde y gris en la producción de trigo. Utilizaron un modelo dinámico de balance hídrico basado en la cuadrícula para calcular el uso del agua del cultivo de trigo a lo largo del tiempo. Llegan a resultados internacionales del comercio de productos de trigo de que hay una gran cantidad de ahorro global, la huella hídrica verde se relaciona con la producción mundial de trigo, pero es cuatro veces más grande que la huella hídrica de agua azul.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para la gestión de las aguas subterráneas, se han definido 653 acuíferos los cuales su ministran gran parte de las demandas de agua de los desarrollos industriales y cerca del 65 % del volumen de agua que demandan las ciudades donde se concentran unos sesenta millones de habitantes. Además, estos acuíferos constituyen la principal fuente de abastecimiento de la población rural y aportan el agua para el riego de aproximadamente dos millones de hectáreas, eso equivale al 35 % de la superficie de riego de nuestro país (SEMARNAT, 2013).

La sobreexplotación de los acuíferos en México es cada año más alarmante: 32 en 1975 y 106 en 2013.

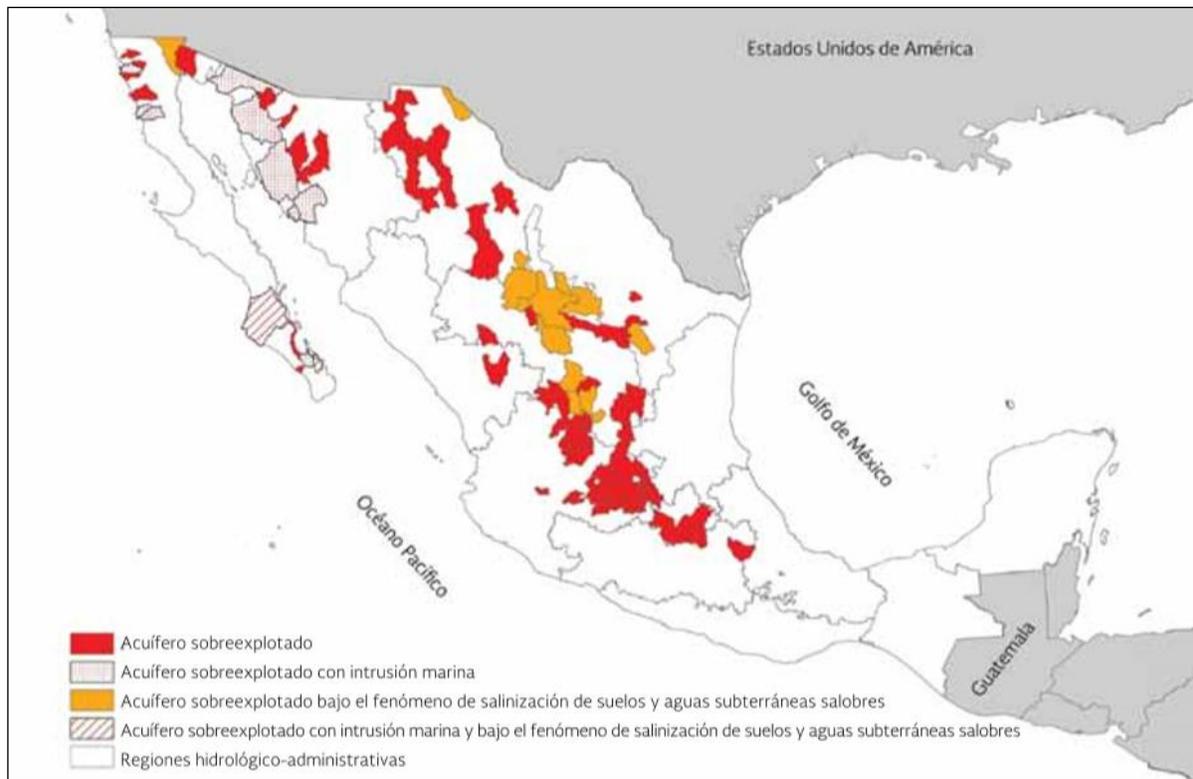


Figura 1. Ubicación de los acuíferos sobreexplotados en México.

Fuente: SEMARNAT, 2013

La actividad agrícola utiliza en el mundo aproximadamente el 70% del agua fresca disponible, en México, esta participación asciende al 75% (SEMARNAT, 2013).

En la agricultura existen varias huellas hídricas, en el caso de Veracruz para el cultivo de caña se ocupa HH dentro de una zona de captación o cuenca fluvial.



Figura 2. Ubicación del Estado de Veracruz

El Río Papaloapan es la segunda cuenca hidrográfica más importante de México, posee una longitud de 354 kilómetros, nace en Tuxtepec, que pertenece a los estados Oaxaca, Puebla y Veracruz. Específicamente recorre las ciudades de San Juan Bautista Tuxtepec Oaxaca, Otatitlán, Tlacojalpan, Cosamaloapan, y Alvarado.



Figura 3. Ubicación del río Papaloapan

El principal impulso al campo en el estado de Veracruz es la producción azucarera

Cuadro 2. Operación de los ingenios en la Cuenca del río Papaloapan

INGENIO	MUNICIPIO	SUPERFICIE COSECHADA (HA)
Adolfo López Mateos	San Juan Bautista Tuxtepec, Oax.	19110
Don Pablo Machado (La Margarita)	Acatlán de Pérez Figueroa, Oax	12660
El Refugio	Cosolapa, Oax.	6524
Calipam	Coxcatlán, Pue.	2027
Constancia	Tezonapa, Ver.	11708
Central Motzorongo	Tezonapa, Ver.	17949
El Carmen	Ixtaczoquitlán, Ver.	7925
La Providencia	Cuichapa, Ver.	11136
San Nicolás	Cuichapa, Ver.	7297
San Cristóbal	Carlos A. Carrillo, Ver.	41385
San Francisco El Naranjal	Lerdo de Tejada, Ver.	8080
San Pedro	Lerdo de Tejada, Ver.	14420
San Gabriel	Cosamaloapan, Ver.	7283
San José de Abajo	Cuitlahuac, Ver.	8006
San Miguelito	Córdoba, Ver.	6508
Tres Valles	Tres valles, Ver.	27002
La Cuenca		209020
Total del País		656774

Fuente: Elaboración propia con base a la información de la Unión Nacional de Cañeros, A.C. CNPR, Zafra 2004-2005

En la zafra 2004-2005, se cosechó el 32% de la superficie, se produjo el 30% de caña y se elaboró el 29.3% de azúcar, de los totales respectivos de la producción nacional; pudiéndose considerar a la cuenca del Papaloapan como la principal productora de caña de azúcar de la nación. (Unión Nacional de Cañeros, A.C. CNPR, Zafra 2004-2005)

Para esta investigación se llevó acabo el cálculo de la huella hídrica de los 12 ingenios azucareros de la región del Papaloapan. La ubicación de estos Ingenios son los siguientes, mismos que son los que en la actualidad permanecen activos.

Cuadro 3. Ubicación de los Ingenios

INGENIO	UBICACIÓN
Ingenio La margarita	Esta localizado en el km. 69 del tramo del ferrocarril Córdoba-Tierra Blanca, Veracruz, en la Estación de bandera denominada Vicente Oax. Carretera Córdoba Veracruz (camino Federal 150) a la altura del entronque “La Tinaja”.
Ingenio El Refugio	Ubicado en la población de Estación El Refugio, perteneciente al municipio de Cosolapa, en la zona Norte del estado de Oaxaca.
Ingenio Constanca	Ese encuentra ubicado en Tezoanapa, Veracruz
Ingenio Motzorongo	Ingenio azucarero ubicado en la población de Motzorongo, perteneciente al municipio de Tezonapa, en la zona centro del estado de Veracruz.
Ingenio El Carmen	Ingenio azucarero localizado en la zona centro del estado de Veracruz.
Ingenio La Providencia	Ingenio La Providencia se encuentra ubica Cerrada Constitución, Providencia, Cuichapa, Veracruz
Ingenio San Nicolás	Ubicado en el estado de Veracruz, Carretera Amatlan s/n, Congregación Gobos Garcia, municipio de Cuichapa.
Ingenio san Cristóbal	Nicolás Bravo #5, Carlos A. Carrillo, Veracruz

Ingenio San Pedro	Camino vecinal Lerdo-Saltabarranca s/n, Cd. Lerdo de Tejada, Veracruz
Ingenio San José de Abajo	Domicilio Conocido Sin N. mero Calle Principal Localidad Ignacio Vallarta Municipio de Cuitlahuac, Veracruz
Ingenio San Miguelito	Km. 2 Carretera Córdoba-Amatlán. Col. Buena Vista, Córdoba, Veracruz
Ingenio tres valles	Se encuentra localizado hacia el sur de la entidad, en la ciudad de Tres Valles, Veracruz, aproximadamente a 126 kms., de la ciudad y puerto de Veracruz. Se encuentra ubicado en la baja cuenca del Papaloapan, colinda con el estado de Oaxaca y los municipios de Tierra Blanca y Cosamaloapan.

Fuente: Elaboración propia

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Valoración del agua

El valor económico de un bien o servicio casi siempre es diferente a su precio de mercado, pero esta característica es más clara todavía en los bienes y servicios medioambientales, incluidos los recursos naturales, entre ellos los recursos hídricos, que en muchos casos se comportan como bienes públicos. Esta distinción fue hecha hace muchos años por Adam Smith y reportada por varios economistas, entre ellos Nicholson (2009) y Hanemann, (2005)

Es difícil encontrar un bien con mayor utilidad para la vida, las actividades productivas y para la naturaleza misma que el agua, por lo que no debería haber discusión con relación a su valor. Sin embargo, se tiene que el precio de mercado que registra en muchas transacciones, es realmente bajo, lo cual se explica cuando se incluye en el análisis correspondiente los conceptos de trabajo requerido en su producción y el de escasez Nicholson (2009) y Hanemann, (2005). Cuando esto se hace, se comprende el porqué de los bajos precios del agua en muchas regiones del mundo y en muchas actividades productivas, lo que conduce a su asignación ineficiente y a su desperdicio.

Para valorar el agua, en muchas ocasiones se utiliza la valoración económica para hacer la valoración en términos monetarios de este bien que la gente identifica como valioso, aunque en ocasiones no exista un mercado para él, pero que se considera que es un bien que se debería conservar. La valoración no de mercado aplica la misma noción a los artículos que no se venden en un mercado.

El agua tiene características mixtas como bien privado y como bien público. Para empezar la ONU en la reunión de Dublín en 1993 declaró al recurso agua entre otras cosas como bien económico. Cuando se usa agua para realizar las actividades de higiene, limpieza y preparación de alimentos en el hogar, o cuando se usa en la

producción industrial o de servicios, o cuando se usa en la producción agrícola y ganadera, es un bien privado. Cuando el agua se deja in situ, ya sea para navegación, para que la gente disfrute de la vista o para recreación, o como hábitat acuático, funciona como un bien público. Este es uno de los aspectos en los que el agua es diferente a estas otras mercancías en términos económicos.

Cuando se comporta como bien público, el agua tiene dos consecuencias importantes basándose en las propiedades de los bienes públicos. Primero, si bien es probable que los bienes públicos se suministren colectivamente, por ejemplo, a través de un proceso de votación, en lugar de a través de un mercado descentralizado, es probable que no tengan suficientes suministros porque las personas tienen un incentivo egoísta para viajar libremente en el proceso de decisión colectiva al entender su verdadero interés en el bien público. En segundo lugar, se presenta una situación que consiste en que los consumidores no presentan rivalidad en el consumo del bien, por lo que muchos consumidores pueden disfrutar de un bien público simultáneamente, mientras que un bien privado puede ser consumido por una sola parte a la vez.

Los derechos de propiedad no exclusivos que en muchas ocasiones exhibe el agua es otra característica importante que tiene que ver con los bienes públicos. El agua in situ, las aguas corrientes se consideran comunes a todos y nadie puede asumirse como propietario. Estas aguas solo pueden ser objeto de derechos de uso (derechos de usufructuario), pero no de derechos de propiedad. Esta característica hace al agua diferente a la tierra. En este contexto, aunque el agua y la ley son a menudo insumos complementarios, existe una distinción crucial en que la tierra puede ser propiedad, mientras que el agua no puede.

La movilidad del agua es una característica física muy importante. En su discurrir en la cuenca, el agua puede tener varios usos secuenciales de la misma molécula de agua ya que un usuario determinado rara vez consume toda el agua y lo que queda está físicamente disponible, en principio, para otros usos aguas abajo. Esta característica es muy importante en la estimación de la huella hídrica.

La movilidad del agua y la oportunidad de uso y reutilización secuenciales hacen que el agua sea relativamente distintiva como un producto a cualquier otro.

La variabilidad del suministro en términos de espacio, tiempo y calidad, es otra característica del agua a considerar debido a que, sobre todo en la agricultura esos conceptos pueden definir en gran medida el éxito de un proceso productivo.

La variabilidad en el suministro, se convierte para la agricultura en el principal desafío para la mayoría de los sistemas de agua grandes para empatar la correspondencia espacial y temporal de la oferta con la demanda. Este desafío en su parte temporal, se enfrenta con el almacenamiento; mientras que las transferencias entre cuencas se utilizan para superar el desajuste espacial entre la oferta y la demanda. La variabilidad del suministro ha afectado no solo la ingeniería de los sistemas de recursos hídricos sino también los arreglos legales e institucionales para el uso del agua entre cuencas, comunidades e individuos (Hanemann, 2005).

Otra característica física importante que como en los casos anteriores se refleja en términos económicos, es que el costo del agua tiene varias consideraciones distintivas que complican su suministro.

El agua es voluminosa y costosa de transportar en relación con su valor por unidad de peso. Para hacer frente a interrupciones inesperadas y problemas logísticos de transporte de agua, se tiene que recurrir al racionamiento o almacenar suficiente agua antes del período de uso máximo.

Una característica económica adicional que no es posible ignorar es que el suministro de agua es muy intensivo en capital, además, los activos de capital utilizados en el suministro de agua no pueden trasladarse a otra zona geográfica y, casi nunca no se pueden utilizar para ningún otro propósito. El capital físico usado en el almacenamiento y distribución del agua en la agricultura y también en el sector urbano registra periodos de usos o vida económica muy largos, en algunos casos más de 50 y hasta 100 o más años (Hanemann, 2005).

Una característica económica adicional en la oferta del agua es que existen importantes economías de escala en muchos componentes, al aumentar la capacidad de la presa se puede reducir significativamente el costo unitario del agua almacenada.

La intensidad de capital, la longevidad y las economías de escala significan que los costos de suministro de agua y saneamiento están fuertemente dominados por costos fijos. Por lo tanto, existe una diferencia inusualmente grande entre el costo marginal a corto y largo plazo en el suministro de agua.

Tanto el uso intensivo del capital, como las economías de escala asociadas y la duración de la infraestructura, tienen profundas implicaciones económicas y sociales, que se materializan en que se privilegie la participación del sector público en el suministro de agua en lugar del autoabastecimiento individual. Esto obliga a un adecuado liderazgo público y una apropiada coordinación con la sociedad.

4.2 Economía de la producción

De los conceptos teóricos que aporta la economía y que resultan de utilidad para la interpretación de los datos derivados de la estimación de la huella hídrica, son los que tienen que ver con los que aporta la economía de la producción o teoría de la empresa, como función de producción y los conceptos asociados (producto total, marginal, medio y etapas de la producción), los costos de producción y el beneficio o ganancia. A continuación, se presentan aspectos útiles para lo que aquí se trata.

4.2.1 Función de producción

La función de producción hace referencia a la cantidad de bienes que se pueden producir como máximo teniendo una determinada cantidad de recursos. Una función de producción se concibe como una relación empírica y causal entre los niveles de insumos requeridos para producir.

“La función de producción es indudablemente útil como concepto. Puede funcionar mejor a microescala en lugar de a nivel de toda una economía regional, e implica

una noción de causalidad que puede simplificarse demasiado. En la práctica, a menudo puede resultar sorprendentemente difícil medir una función de producción a escala regional o, de manera más general, medir el incremento específico en los beneficios asociados con un incremento en la disponibilidad de agua” (W. M. Hanemann, 2005).

La función de producción de un bien determinado, q , muestra la cantidad máxima del bien que ésta puede producir utilizando distintas combinaciones de capital (k) y de trabajo (l) (Nicholson, 2008).

$$q = f(k, l)$$

Dentro de la función de producción, se encuentra el producto marginal y la productividad promedio, conceptos que permiten analizar sus variaciones.

Producto marginal. “El producto marginal de un factor productivo es el producto adicional que se puede obtener empleando una unidad más de ese factor productivo, manteniendo constantes todos los demás factores de producción” (Nicholson, 2008, p.184)

En términos matemático:

$$\text{Producto marginal del capital} = PMg_k$$

$$\text{Producto marginal del trabajo} = PMg_l$$

Productividad promedio. La productividad promedio se refiere a los rendimientos por unidad de insumo variable utilizado. Dado que es muy fácil cuantificar la productividad promedio (por ejemplo, como en el caso de la cantidad de toneladas de trigo por hora de trabajo), se suele utilizar como una medida de la eficiencia. (Ib. p.185)

El producto promedio del trabajo (PPI) se define como

$$PPI = \frac{\text{producto}}{\text{factor trabajo}}$$

En la figura 6 se señala una función de producción al máximo nivel de producción (q) que puede obtener una empresa con cada combinación específica de factores.

Las funciones de producción describen lo que es técnicamente viable cuando la empresa produce eficientemente.

Poniendo el ejemplo sobre la producción de la caña en la Figura 6 (a) muestra que al tener un incremento de trabajo, la producción de caña aumenta hasta que alcanza un máximo de 112 a partir de entonces, disminuye.

La parte donde la curva de producción total es descendente se representa por medio de una línea discontinua para mostrar que producir con más de ocho trabajadores no es económicamente racional sino el nivel de producción por trabajador y mes.

En la figura 6 el producto marginal es positivo mientras el nivel de producción esté aumentando, será negativo cuando el nivel de producción vaya disminuyendo.

El producto marginal debe ser igual al producto medio cuando este alcanza su máximo, lo cual ocurre en el punto E de la Figura 6 (b).

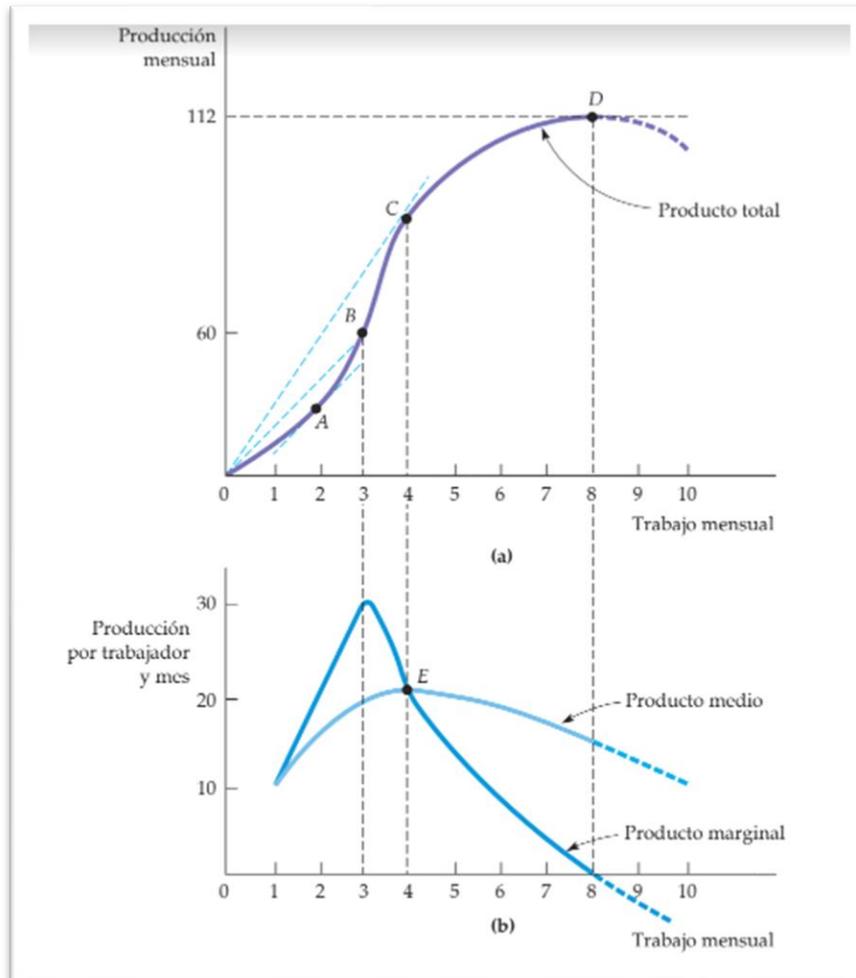


Figura 4. La producción con un factor variable

Fuente: Pindyck y Rubinfeld (2009) Microeconomía. (7a ed.). Madrid.

El producto medio del trabajo es el producto total dividido por la cantidad de trabajo.

La Figura 7 Explica la curva de producción que viene dada por O1, tomando el caso de la huella hídrica teniendo mayor producción pueden permitir que esta se desplace en sentido ascendente, primero a O2 y después a O3 así se tendría un mayor rendimiento.

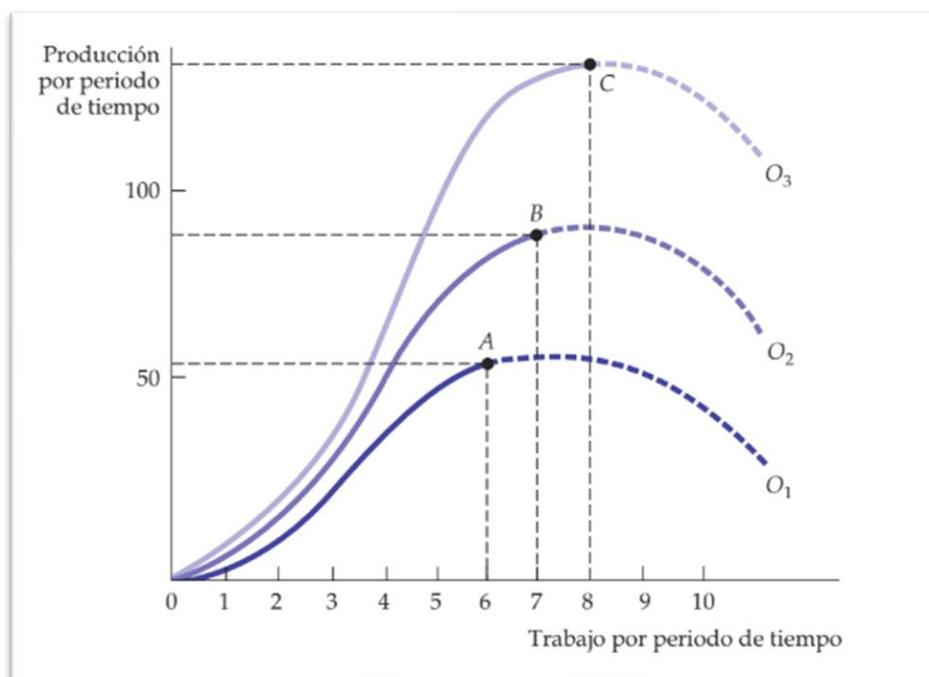


Figura 5. La producción con un factor variable

Fuente: Pindyck y Rubinfeld (2009) Microeconomía. (7a ed.). Madrid.

Pindyck y Rubinfeld (2009) afirma:

La productividad del trabajo (la producción por unidad de trabajo) puede aumentar si mejora la tecnología, aunque el trabajo muestre rendimientos decrecientes en un determinado proceso de producción (p.226)

Además de ser diferentes tecnologías, el aumento A a B y a C en la cantidad de trabajo se refleja en un aumento del nivel de producción y hace que parezca que no hay rendimientos marginales decrecientes, pero sí los hay.

Generalizando el tema de la función de producción, a largo plazo tanto el trabajo como el capital son variables. Al combinar distintas cantidades de capital o de trabajo, la producción se puede presentar en diversas formas.

Pindyck y Rubinfeld (2009) define “Una isocuanta es una curva que muestra todas las combinaciones posibles de factores que generan el mismo nivel de producción” (p.232).

En la figura 8 se muestra un mapa de isocuantas llamado así por incluir varias isocuantas en un mismo gráfico. Cada isocuanta corresponde a un nivel de producción diferente y el nivel de producción aumenta a medida que nos desplazamos en sentido ascendente y hacia la derecha en la figura. (Ib.233)

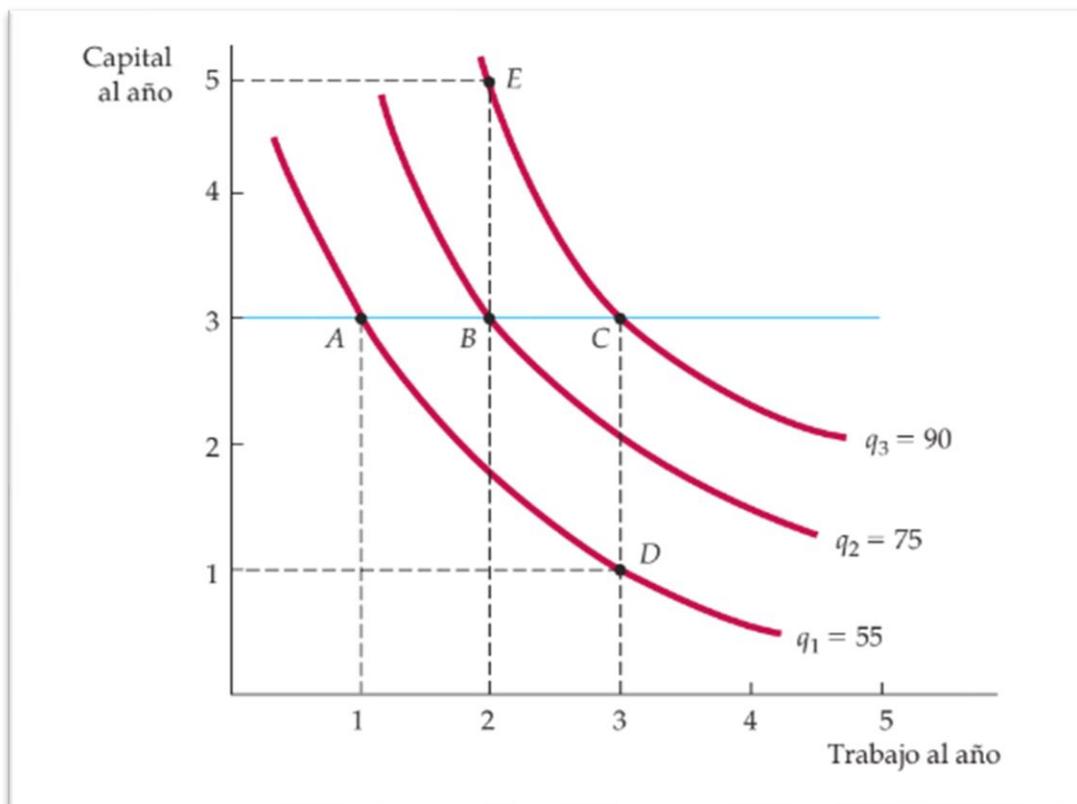


Figura 6. La producción con dos factores variables

Fuente: Pindyck y Rubinfeld (2009) Microeconomía. (7a ed.). Madrid.

4.2.2 Función de costos

El costo de un factor de producción está determinado por la magnitud del desembolso por el uso de ese recurso productivo. Según Nicholson (2008, p. 212) el costo de un factor es lo que se pagaría por ese factor en su siguiente mejor uso.

Costos laborales

Los economistas y los contadores toman los costos laborales de forma muy similar. Para los contadores, los gastos destinados al trabajo son gastos corrientes y, por tanto, son costos de producción. Para los economistas, el trabajo es un costo explícito. Los servicios de los trabajadores (horas-hombre) son contratados a un salario determinado por (w) (lb. p.212)

Costos de capital

En economía, se considera que los costos de capital (costos fijos) como el de la maquinaria son “costos hundidos” y no influyen en la toma de decisiones para producir. (lb. p.213)

Algunos costos de la empresa varían cuando varía la producción. Para obtener el nivel de producción que maximiza el beneficio se divide el coste total (CT o C) en dos componentes

Coste fijo (CF): coste que no varía con el nivel de producción y que solo puede eliminarse cerrando.

Coste variable (CV): coste que varía cuando varía la producción.

El costo marginal (CM)—denominado a veces coste incremental— es el aumento que experimenta el costo total cuando se produce una unidad más. Como el coste fijo no varía cuando varía el nivel de producción de la empresa, el coste marginal es

igual al aumento que experimenta el coste variable o al aumento que experimenta el coste total cuando se produce una unidad más. (Pindyck y Rubinfeld (2009) P.254)

El coste total medio (CTMe) El coste total medio, que se usa indistintamente con CMe y con el coste económico medio, es el coste total de la empresa dividido por su nivel de producción” (lb.254).

La Figura 9 muestra cómo varían diversas medidas de los costes cuando varía la producción.

El costo fijo (CF) se representa por medio de una línea recta horizontal en el nivel \$ 50. El costo variable (CV) es cero cuando no hay producción, y aumenta a medida que aumenta la producción.

Se muestra las curvas de coste variable marginal y medio. Cuando el coste marginal se encuentra por debajo del coste medio, la curva de coste medio es descendente, pero cuando esto es viceversa la curva de coste medio es ascendente. Una relación importante se identifica entre el costo medio y el costo marginal, ya que cuando el primero es mínimo, es igual al costo marginal.

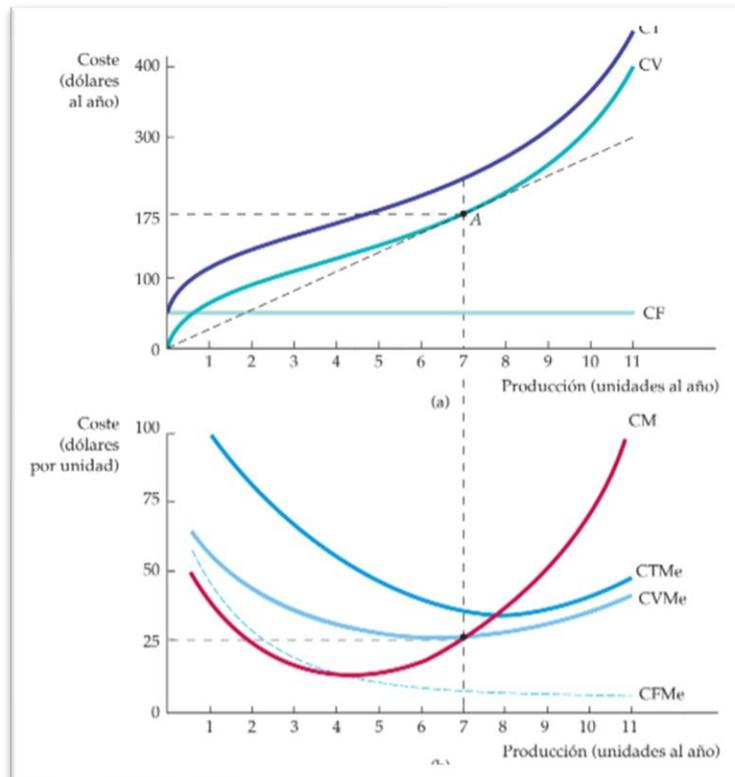


Figura 7. Las curvas de costes de una empresa

Fuente: Pindyck y Rubinfeld (2009) Microeconomía. (7a ed.). Madrid.

4.2.3 Función de beneficios

El beneficio económico son las ganancias que se obtienen al momento de realizar un proceso o actividad económica. Incluye todos los resultados positivos, tanto los materiales como los monetarios. Es básicamente un indicador de la generación de riquezas.

El beneficio económico es la diferencia entre el ingreso total y el costo total de la empresa:

$$\text{Beneficio económico} = \text{Ingreso total} - \text{Costo total}$$

Dado que el beneficio es la diferencia entre el ingreso (total) y el coste (total), hallar el nivel de producción maximizador de los beneficios de la empresa significa analizar su ingreso (Pindyck y Rubinfeld 2009).

En la figura 10 se muestra el caso de una empresa con una producción de q^* , que maximiza sus los beneficios. Se observa que la línea AB muestra la máxima diferencia entre el ingreso I y el costo C , lo que indica el mayor beneficio.

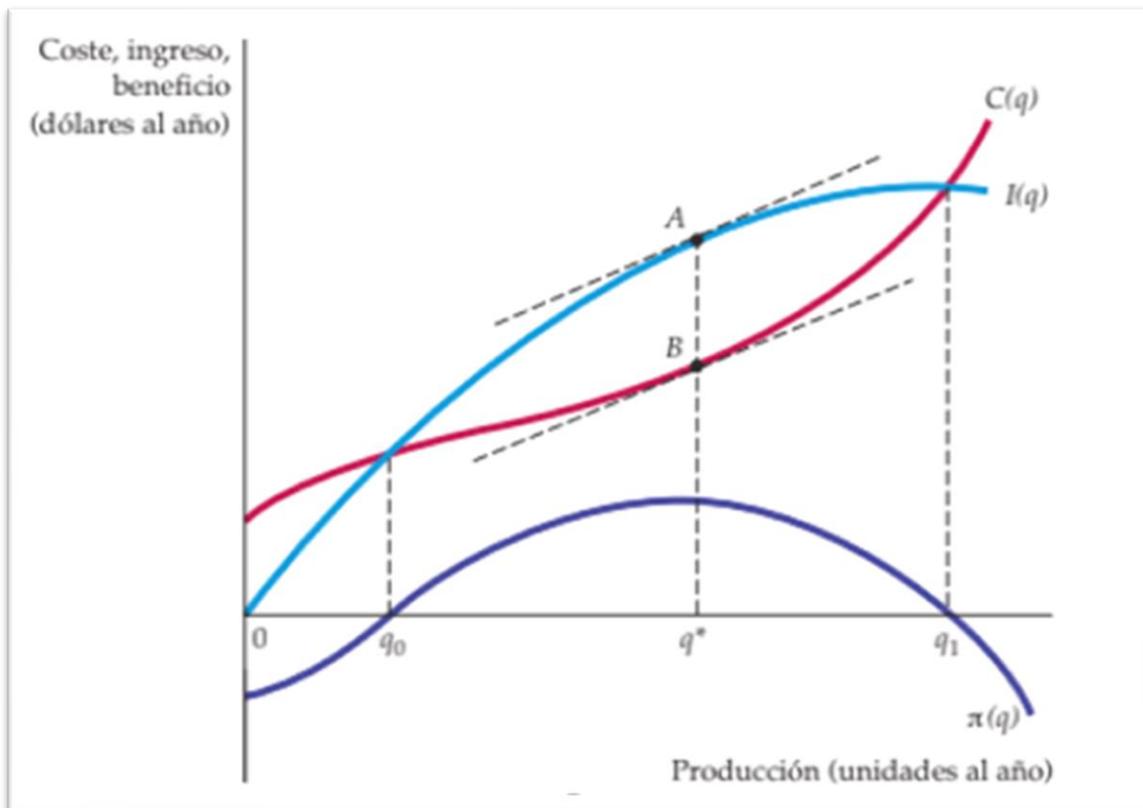


Figura 8. La maximización de los beneficios a corto plazo

Fuente: Pindyck y Rubinfeld (2009) Microeconomía. (7a ed.). Madrid.

4.3 Enfoques usados en el análisis del uso de agua

En esta parte se presentan enfoques diversos que se han utilizado para analizar el recurso agua en sus diferentes manifestaciones. Sin pretender agotarlos, esto permitirá al final presentar de manera detallada lo que corresponde a la huella hídrica que aquí se aplica.

4.3.1 Enfoque de cuenca

Cenca es un concepto geográfico e hidrológico que se define como el área de la superficie terrestre por donde el agua de lluvia, nieve o deshielo escurre y transita o drena a través de una red de corrientes que fluyen hacia una corriente principal, y por ésta hacia un punto común de salida. Éste puede ser un almacenamiento de agua interior, como un lago, una laguna o el embalse de una presa, en cuyo caso se llama cuenca endorreica. Cuando las descargas llegan hasta el mar se le denomina cuenca exorreica.

Las cuencas son unidades del terreno, definidas por la división natural de las aguas debida a la conformación del relieve. Para propósitos de administración de las aguas nacionales, la Conagua ha identificado 731 cuencas hidrológicas. CONAGUA (2018).

Cuencas hidrográficas

Según SEMARNAT (2013) “Las cuencas hidrográficas son espacios territoriales delimitados por un parteaguas (partes más altas de montañas) donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos y/o ríos) que confluyen y desembocan en un punto común llamado también punto de salida de la cuenca, que puede ser un lago (formando una cuenca denominada endorreica) o el mar (llamada cuenca exorreica)”. Este concepto ayuda a entender claramente el ciclo hidrológico, así como las externalidades tanto las producidas por el hombre como las naturales.

De acuerdo con Aguirre (2011), es una extensión de terreno más ancha y menos profunda que un valle o el espacio del territorio en el cual naturalmente discurren todas las aguas provenientes de precipitaciones, de deshielos, de acuíferos, etc., y

pasan por cursos superficiales hacia un único lugar, como un lago. Las cuencas no se ajustan a las fronteras administrativas.

El comportamiento hídrico de cualquier territorio puede compararse al de una esponja a la que se le suministra agua; mientras el agua suministrada es inferior a la capacidad de almacenamiento o a su velocidad de absorción, el agua pasa al interior, pero si se rebasan ambos límites, el agua excedente es “evacuada” fluyendo por la superficie de la esponja hacia otro lugar (escorrentías superficiales). Cuando el suministro de agua cesa, la esponja seguirá expulsando agua por flujo subterráneo desde el almacén interior, que saldrá al exterior de diversas formas (flujos subsuperficiales, surgencias, fuentes, manantiales), y hacia la atmósfera por evaporación desde la superficie, hasta quedarse con una cantidad mínima de agua que sólo podrá ser extraída aplicando una presión (Atlas global de la región Murcia).

Cuadro 4. Actividades donde demandan agua para su desarrollo

PROPORCIONAR SERVICIOS	SERVICIOS DE REGULACIÓN
<p>Servicios centrados en proveer directamente productos alimenticios y no alimenticios provenientes de caudales hídricos</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Abastecimiento de agua dulce. ❖ Producción de cosechas y frutas. ❖ Producción ganadera. ❖ Producción de peces. ❖ Suministro de madera y de materiales de construcción. ❖ Medicinas. ❖ Energía hidro-eléctrica. 	<p>Servicios relacionados con la regulación de caudales o con la reducción de riesgos que tienen que ver con caudales hídricos.</p> <ul style="list-style-type: none"> ❖ Regulación de caudales hídricos (derrames de amortiguación, infiltración de agua en los suelos, recarga de agua subterránea, mantenimiento de caudales base). ❖ Mitigación de riesgos naturales (prevención de inundaciones, reducción de caudales pico, reducción de deslizamientos de tierra).

	❖ Protección de suelos y control de la erosión y de la sedimentación.
SERVICIOS DE APOYO	SERVICIOS CULTURALES Y DE RECREO
Servicios que se proveen para apoyar a hábitats y al funcionamiento de ecosistemas. <ul style="list-style-type: none"> ❖ Hábitat de vida silvestre ❖ Régimen de caudales necesarios para mantener el hábitat y los usos río abajo 	Servicios relacionados con recreo e inspiración humana Recreo acuático <ul style="list-style-type: none"> ❖ Estética del paisaje. ❖ Patrimonio cultural e identidad. ❖ Inspiración artística y espiritual.

Fuente: UICN (2000) "Visión del Agua y la Naturaleza".

La cuenca hidrográfica proporciona múltiples servicios hídricos a las poblaciones para su desarrollo y esparcimiento.

Cuadro 5. Servicios relacionados con el agua

ACTIVIDAD HUMANA	IMPACTO EN ECOSISTEMA HÍDRICO	FUNCIONES EN PELIGRO
Crecimiento de población y de consumo.	Aumenta las presiones para desviar más agua y adquirir más tierra cultivable (p.e. drenaje de humedales), aumenta contaminación del agua, lluvia ácida y el potencial de cambio climático.	Virtualmente todas las funciones de ecosistemas Hídricos.
	La pérdida de integridad de los ecosistemas altera la	

Desarrollo de infraestructura (represas, diques, muelles fluviales, desvíos de ríos)-	frecuencia y cantidad de caudales fluviales, la temperatura del agua, el transporte de nutrientes y sedimentos y el reabastecimiento de deltas, e impide las migraciones de peces.	La cantidad y calidad del agua, hábitat, fertilidad de las llanuras inundables, deportes, pesca, mantenimiento de deltas y sus economías.
Conversión de la tierra y mala utilización de la misma (drenaje de humedales, deforestación)	Elimina componentes clave del medio ambiente hídrico; pérdida de funciones, integridad, hábitat y biodiversidad; altera las pautas arroyadas, impide la recarga natural, llena de cieno los cuerpos de agua.	Control natural de inundaciones, hábitat para peces y aves acuáticas, recreo, suministro de agua, cantidad y calidad de agua, transporte.
Cosechar y explotar en exceso	Agota los recursos vivos, funciones de los ecosistemas y biodiversidad (agotamiento de agua subterránea, pérdida de pesca).	Producción de alimentos, deporte y pesca comercial, hábitat, suministro de agua y cantidad y calidad del agua.
Introducción de especie exóticas	Elimina especies nativas, altera el ciclo de producción y nutrientes, pérdida de biodiversidad	Calidad del agua, pesca deportiva y comercial, hábitat de peces y vida silvestre, transporte.
Derrame de sustancias químicas y contaminantes biológicos en el agua, tierra y aire.	La contaminación de cuerpos hídricos altera la química y ecología de ríos, lagos y humedales.	Suministro de agua, hábitat, pesca, recreo

Emisiones de gases de efecto invernadero que inducen a cambio climático.	Cambios climáticos potenciales en pautas de derrame debido a aumentos en la temperatura y cambios en los patrones de lluvias.	Suministro de agua, energía hídrica, transporte, hábitat de peces y vida silvestre, dilución de contaminación, recreo, pesca, control de inundaciones.
--	---	--

Amenazas a funciones de ecosistemas relacionados con el agua debido a actividades humanas (según Daily 1997)

Fuente: UICN (2000) "Visión del Agua y la Naturaleza".

4.3.2 Gestión integrada de los recursos hídricos GIRH

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos GIRH, es un término cuyo origen posiblemente se ha dado en el establecimiento de los cuatro Principios de Dublín (Declaración de Dublín sobre el agua y el desarrollo sostenible, CIAMA Dublín, Irlanda; enero de 1992): "1. El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sustentar la vida, el desarrollo y el medio ambiente; 2. El desarrollo y manejo del agua deberían ser participativos, involucrando a planificadores y a formuladores de políticas en todos los niveles; 3. La mujer desempeña un papel fundamental en la provisión, manejo y protección del agua y 4. El agua tiene un valor económico en todos los usos de la misma que compiten entre sí y debería reconocerse como un bien económico".

La idea principal que plantea el autor es que "Los recursos hídricos incluyen el agua y los medios a través de los cuales ese recurso discurre y se almacena: glaciares, laderas, lagunas y lagos, manantiales, ríos y riachuelos, acuíferos y las obras construidas por el hombre, como represas, pozos, canales" (IICA, 2015).

Las personas llevan a cabo la gestión de los recursos hídricos ya que abarca el conjunto de practica que realizan, lo llevan a cabo también las entidades teniendo una responsabilidad pública ya que la gestión incluye las acciones que permiten el

uso racional del agua para su ahorro y el cuidado de su calidad. Entonces gestionar los recursos hídricos es según el IICA (2015: p. 18):

“Una tarea con dos niveles de responsabilidad: uno de orden colectivo, cuando se trata del agua que discurre en los espacios comunes, y el otro de orden privado, relativo al manejo del agua en el predio o la finca”

4.4 Gobernanza

El concepto y la metodología sobre la gobernanza del agua ha sido usado por la OCDE en varios estudios (2012).

La OCDE (201) menciona que la Asociación Mundial para el Agua (Global Water Partnership, GWP) define la gobernanza del agua como “el conjunto de sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos establecidos para desarrollar y gestionar los recursos hídricos y la prestación de servicios de agua en diferentes estratos de la sociedad”.

La gobernanza explica una serie de cambios entre el gobierno y la sociedad para reconstruir el sentido y la capacidad de dirección de ésta última y su relación con el medio ambiente. Una buena gobernanza de agua es fundamental para el desarrollo sostenible debido a su papel fundamental para el crecimiento económico la inclusión social y la sostenibilidad ambiental.

4.5 Huella hídrica

Hoekstra et al., (2009) usan el concepto de huella hídrica como un indicador del uso de agua dulce que incluye tanto el uso directo como el indirecto de un consumidor o productor.; recalcan que el concepto referido a un producto debe entenderse como el volumen de agua dulce utilizada para producir dicho producto, medido en toda la cadena de suministro; le asignan dos dimensiones: el geográfico y el temporal.

Autores como Hoekstra, A., Chapagain, A., et al. (2009) realizan una guía para el lector y dan a conocer que la huella hídrica puede tener varios propósitos y ser aplicados en diferentes contextos. Se debe de identificar en que HH está interesado, como pueden ser:

- Huella hídrica de un paso de proceso
- Huella hídrica de un producto
- Huella hídrica de un consumidor
- Huella hídrica de un grupo de consumidores.
- Huella hídrica de los consumidores en una nación.
- Huella hídrica de los consumidores en un municipio, provincia u otra unidad administrativa
- Huella hídrica de los consumidores en una zona de captación o cuenca hidrográfica.
- Huella hídrica dentro de un área delimitada geográficamente.
- Huella hídrica dentro de una nación.
- Huella hídrica dentro de un municipio, provincia u otra administración unidad
- Huella hídrica dentro de una zona de captación o cuenca fluvial.
- Huella hídrica de un negocio.
- Huella hídrica de un sector empresarial.
- Huella hídrica de la humanidad en su conjunto.

Dentro de esa guía desarrollada Hoekstra, A., Chapagain, A., et al. (2009). Dan una explicación detallada de los conceptos y aplicaciones de esa metodología, y fue desarrollado teniendo en cuenta las contribuciones de los miembros de la Red Internacional de Huella Hídrica. La evaluación de la huella hídrica consta de cuatro fases:

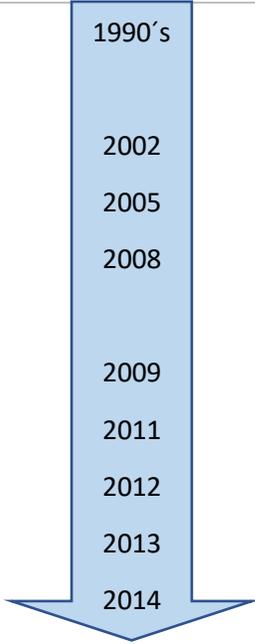
- Definición de objetivos y alcance de la evaluación A favor de la transparencia y claridad, deben entablarse las razones para desarrollar la evaluación, y definir sus límites. Esta discusión preliminar definirá,

finalmente, las decisiones que deben tomarse durante el estudio, así como las suposiciones.

- Contabilidad de la huella hídrica En esta fase se recolectan datos y se desarrolla la cuantificación. El nivel de detalle en esta fase depende de las decisiones realizadas en la fase anterior.
- Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica Los resultados de huella hídrica son evaluados desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental, económica y social.
- Formulación de estrategias de respuesta con base en los resultados, se plantean estrategias o políticas de respuesta para mejorar la gestión del recurso hídrico.

A continuación, se presenta la evolución histórica que ha tenido el concepto de la huella hídrica.

Cuadro 6. Marco histórico de la Huella Hídrica

 <p>1990's</p> <p>2002</p> <p>2005</p> <p>2008</p> <p>2009</p> <p>2011</p> <p>2012</p> <p>2013</p> <p>2014</p>	Agua virtual (Allan)
	Agua verde (Falkenmark)
	Huella hídrica (Hoekstra, 2002)
	Huella hídrica gris (Chapagain et al., 2005)
	2008 Stockholm World Water Prize to Tony Allan
	2008 Water Footprint Network
	2009 UNEP/SETAC Life Cycle Initiative WULCA
	Manual de la huella hídrica (Hoekstra et al., 2011)
	WFN Tool
	Grey water footprint guidelines (Franke et al.)
	Aprobación norma ISO14046

Fuente: Seminario sobre la aplicación de la huella hídrica en la política pública y empresarial: Pros y contras Madrid, 25 febrero 2014.

La idea de considerar el uso del agua a lo largo de las cadenas de suministro ha ganado interés después de la introducción del concepto de huella hídrica por Hoekstra en 2002 (Hoekstra, 2003).

La huella hídrica, es un indicador multidimensional, que muestra los volúmenes de consumo de agua por fuente y los volúmenes contaminados por tipo de contaminación; Todos los componentes de una huella hídrica total se especifican geográfica y temporalmente. La huella hídrica azul se refiere al consumo de recursos hídricos azules (aguas superficiales y subterráneas) a lo largo de la cadena de suministro de un producto. "Consumo" se refiere a la pérdida de agua de la masa de agua disponible en la superficie del suelo en una zona de captación. Las pérdidas ocurren cuando el agua se evapora, regresa a otra zona de captación o al mar o se incorpora a un producto. La huella hídrica verde se refiere al consumo de recursos hídricos verdes (agua de lluvia en la medida en que no se convierta en escurrimiento). La huella hídrica gris se refiere a la contaminación y se define como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes dadas las concentraciones naturales de fondo y los estándares existentes de calidad del agua ambiental" (Hoekstra, 2011).

De acuerdo con AgroDer (2012) la huella hídrica se compone de cuatro componentes básicos:

- ✓ Volumen
- ✓ Color/clasificación del agua
- ✓ Lugar de origen del agua
- ✓ Momento de extracción del agua

Identificar estos datos nos da la base para el análisis de la huella hídrica, que además debe tomar en cuenta factores locales para dar un contexto real y útil al concepto; es decir, evaluar los impactos en tiempo y espacio de la extracción del agua y su retorno como agua residual o tratada, la afectación al régimen hidrológico, la importancia ecológica de la zona, la productividad del agua, las condiciones de escasez o estrés hídrico imperantes, los usos locales del agua y el acceso de la

población al recurso, impactos en la cuenca baja y otros criterios que puedan incidir en el mantenimiento de un balance sustentable y equitativo del agua en cada cuenca hidrológica (AgroDer, 2012).

La huella hídrica se clasifica en 3 tipos o colores agua azul, agua verde y agua gris.

De acuerdo con el Manual de evaluación de la huella hídrica Hoekstra et al (2011) la huella hídrica azul se refiere al consumo de recursos hídricos, es decir, al consumo de agua superficial y subterránea de determinada cuenca, entendiendo consumo como extracción, se encuentra en los cuerpos de agua superficial (ríos, lagos, esteros, etc.) y subterráneos. La huella hídrica verde se refiere al agua de lluvia almacenada en el suelo como humedad, se concentra en el uso de agua de lluvia, específicamente en el flujo de la evapotranspiración del suelo que se utiliza en agricultura. La huella hídrica gris es toda el agua contaminada por un proceso. En otras palabras, esta huella se refiere a la cantidad de agua dulce necesaria para asimilar la carga de contaminantes de un proceso o de la obtención de un producto.

Cuadro 7. Huella hídrica

Huella Hídrica	La HH es un indicador del uso del agua que incluye tanto el uso de agua directo como indirecto de un consumidor o productor.
	Se mide en términos de volumen de agua consumida (evaporada o que no retorna) o contaminada por unidad de tiempo.
	Es un indicador geográfica y temporalmente explícito.
	Puede ser calculada para un proceso, producto, consumidor, grupo de consumidores (e.g. municipio, provincia, estado o nación) o productor (e.g. un organismo público, empresa privada).

Fuente: Hoekstra et al., 2011

Huella Hídrica del consumo Nacional

Para, Hoekstra (2011), El volumen total del agua se utiliza para producir los bienes y servicios que son consumidos por los habitantes, existen dos componentes:

Huella hídrica interna -----Dentro del país

Huella hídrica externa-----En otros países

Haciendo referencia a la huella hídrica interna y externa surge la idea de huella hídrica Nacional que hace referencia al volumen de agua que se utiliza a nivel nacional más el volumen de agua importado menos el volumen de agua exportado.

Huella Hídrica Nacional:

Uso de agua nacional + Importaciones de agua virtual – exportaciones de agua virtual

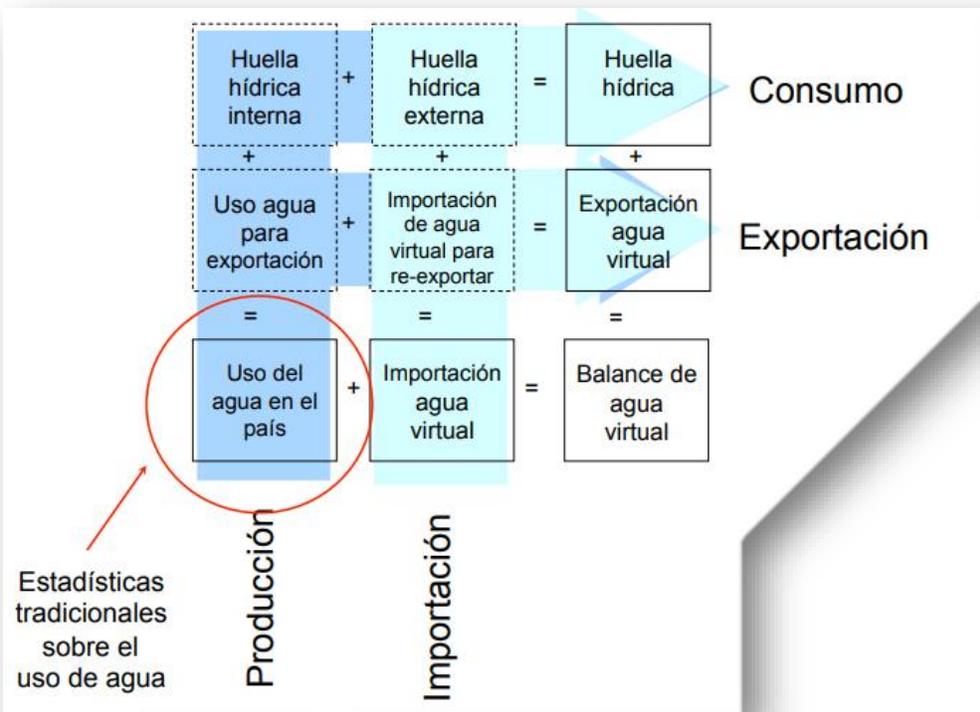


Figura 9. Marco nacional de contabilidad de agua

Fuente: Hoekstra et al., 2011

Según AGRODER (2012), la huella hídrica es una herramienta de planeación del manejo del recurso hídrico, que junto a otros indicadores brinda una visión integral del impacto que tiene la población humana en el ambiente y en los ecosistemas.

La caña de azúcar requiere grandes cantidades del recurso hídrico para su desarrollo, es por esto y por la concentración de este cultivo en la región de estudio, que se seleccionó a la cuenca del Papaloapan que históricamente ha sido una zona cañera.

5. METODOLOGÍA

El cálculo de la huella hídrica para la superficie que abastece de caña de azúcar a los 12 ingenios azucareros de la cuenca del Papaloapan, se realizó siguiendo el procedimiento de Haro *et al* (2014), Allen *et al* (2006), FAO (2006), principalmente. El proceso para determinar la huella hídrica consistió de varios pasos los cuales se describen a continuación:

En primer lugar, se georreferenciaron los ingenios azucareros tomando las coordenadas decimales de latitud norte y longitud oeste de SAGARPA-SIAP-CONADESUCA (2014). La altitud de los ingenios azucareros se tomó la reportada como altura sobre el nivel del mar promedio del municipio, la cual está disponible en las monografías de los municipios en la enciclopedia abierta de Wikipedia. En caso de que se reportaran dos o más datos de altitud sobre el nivel del mar se utilizó el promedio aritmético.

Cuadro 8. Características geográficas de los ingenios analizados

INGENIO	Estado	Municipio	Altura sobre nivel el mar (m)	Latitud Norte	Longitud Oeste
Grados decimales					
LA MARGARITA	Oaxaca	Acatlán de Pérez Figueroa	100	18.510917	-96.541806
EL REFUGIO	Oaxaca	San José Cosolapa	194	18.028513	-96.176121
CONSTANCIA	Veracruz	Tezonapa	420	18.605552	-96.685353
CENTRAL MOTZORONGO	Veracruz	Tezonapa	420	18.642156	-96.727586
EL CARMEN	Veracruz	Ixtaczoquitlán	1009	18.873268	-97.024634
LA PROVIDENCIA	Veracruz	Cuichapa	472	18.751029	-96.772490
SAN NICOLÁS	Veracruz	Cuichapa	472	18.788469	-96.897743
SAN CRISTÓBAL	Veracruz	Carlos A. Carrillo	9	18.370417	-95.740441
SAN PEDRO	Veracruz	Lerdo de Tejada	7	18.610913	-95.530161
SAN JOSÉ DE ABAJO	Veracruz	Cuitláhuac	371	18.774371	-96.778171
SAN MIGUELITO	Veracruz	Córdoba	860	18.864706	-96.916550
TRES VALLES	Veracruz	Tres Valles	40	18.259405	-96.154263

Fuente: Elaboración Propia con datos de la investigación

El segundo paso para la estimación del cálculo de la huella hídrica de la caña de azúcar consistió en ubicar las estaciones meteorológicas más cercanas a los ingenios azucareros. Para tal propósito se tomaron las coordenadas decimales de las estaciones meteorológicas disponibles por entidad en el micrositio del sistema CLICOM del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE, 2020). Al comparar la georreferenciación de los ingenios azucareros y las estaciones meteorológicas se eligió la estación meteorológica cuyas coordenadas decimales de latitud y longitud fueran iguales o muy similares a las de los ingenios azucareros.

Cuadro 9. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas utilizadas

ESTACIÓN	ESTACIÓN	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE
NO.	Nombre	Grados decimales	
20176			
20172			
30320	Mata Anonilla, Ver	18.58889	-96.2372222
30320	Mata Anonilla, Ver	18.58889	-96.2372222
30330	Heroíca Córdoba, Ver	18.88333	-96.9319444
30156	Santa Ines, Ver	18.75667	-96.7963889
30330	Heroíca Córdoba, Ver	18.88333	-96.9319444
30011	Angel R. Cabada, Ver	18.59722	-95.4405556
30011	Angel R. Cabada, Ver	18.59722	-95.4405556
30259	San José de Abajo, Ver	18.77528	-96.7794444
30330	Heroíca Córdoba, Ver	18.88333	-96.9319444
30096	Los Naranjos, Ver	18.36667	-96.2033333

Fuente: Elaboración Propia con datos de la investigación

El paso posterior consistió registrar la temperatura máxima, la temperatura mínima y la precipitación reportada en la estación meteorológica elegida en la hoja electrónica MS Excel.

En un tercer momento se estimó la evapotranspiración de referencia (ET_o) como el parámetro principal a partir del cual se cuantifica la huella hídrica de la caña de azúcar. Para el referido cálculo se utilizó la calculadora de la evapotranspiración de referencia de la FAO (Raes, 2012). La calculadora ET_o reduce considerablemente la demanda de información requerida para la estimación de la ET_o. La información mínima requerida por dicho software son las coordenadas de latitud y longitud de la respectiva estación meteorológica, la altitud sobre el nivel del mar, la temperatura máxima y la temperatura mínima. En la Figura 10 se muestra la interfaz de creación de la descripción de la estación meteorológica utilizada y de definición de los datos meteorológicos para el cálculo de la ET_o del cultivo estudiado.

The screenshot shows a software window titled "Create menu" with a close button (X) in the top right corner. The window contains several input fields and sections:

- File name:** A text box containing "Ingenio La Margarita".
- Station description:**
 - Station:** A text box containing "Sam Juan Bautista Tuxtepec I".
 - Country:** A text box containing "Oaxaca Mexico".
 - Location:** A section with two radio buttons: "Degrees and Minutes" (unselected) and "Decimal degrees" (selected).
 - Latitude:** A text box containing "18.51", with "decimal degrees" and "North" (dropdown) next to it.
 - Longitude:** A text box containing "96.54", with "decimal degrees" and "West" (dropdown) next to it.
 - Altitude:** A text box containing "100", with "meter above sea level" next to it.
 - Location type:** A section with two radio buttons: "at the coast" (unselected) and "interior location" (selected).
 - Area type:** A section with two radio buttons: "in arid or semi-arid area" (unselected) and "in semi-humid or humid area" (selected).
 - Winds:** A section with three radio buttons: "light winds in area" (unselected), "light to moderate winds in area" (selected), and "moderate to strong winds in area" (unselected).
- Meteorological Data:**
 - Type:** A section with three radio buttons: "Daily" (unselected), "10-daily" (unselected), and "Monthly" (selected).
 - Time range:** A section with a checked checkbox "not linked to a specific year".
 - First Month:** A dropdown menu showing "January".
 - Last Month:** A dropdown menu showing "December".

At the bottom of the window, there are two buttons: "Cancel" (with a red X icon) and "Create" (with a document icon).

Figura 10. Interfaz inicial de la calculadora ET_o de la FAO

De manera preliminar a la captura de los datos de temperatura máxima se declara el nombre del archivo que se va a crear, el nombre de la estación de la que se

obtuvieron los datos. En la descripción de la estación también se declara si las coordenadas geográficas a utilizar se introducirán como grados y minutos o como grados decimales. En el estudio, en lugar de introducir las coordenadas de la estación meteorológica se utilizaron las coordenadas del ingenio azucarero respectivo, que son muy similares a las de la estación meteorológica utilizada. Debe resaltarse que en el caso de México al hallarse en el hemisferio occidental la longitud debiera declararse con un signo negativo, no obstante, la latitud se declaró con signo positivo pues el software internamente maneja dicha situación de que la latitud debe ser negativa.

En el caso de los datos meteorológicos se declaró que corresponden a datos mensuales. Además, se seleccionó la opción de que los datos de temperatura no estén atados a un año específico además de que los datos corresponden a los meses de enero a diciembre.

Los datos de localización que se encuentran en la parte media del lado derecho de la interfaz no se modifican, por lo que el programa utiliza los datos calibrados de antemano para la ubicación, en este caso, del ingenio azucarero. De esta manera la calculadora Eto considerara que el ingenio se localiza en el interior del continente o según corresponda. También se sobre entenderá que el ingenio azucarero se localiza en un área semi húmeda o húmeda. Se deja también la opción de que el área donde se localiza el ingenio azucarero se ubica es un área con vientos ligeros a medios. Los datos introducidos en la interfaz corresponden al ingenio azucarero La Margarita, ubicado en Oaxaca. Después de introducir la información requerida en la interfaz se procede a crear el archivo por lo que aparece una nueva interfaz a caja de dialogo como se puede observar en la Figura 11.

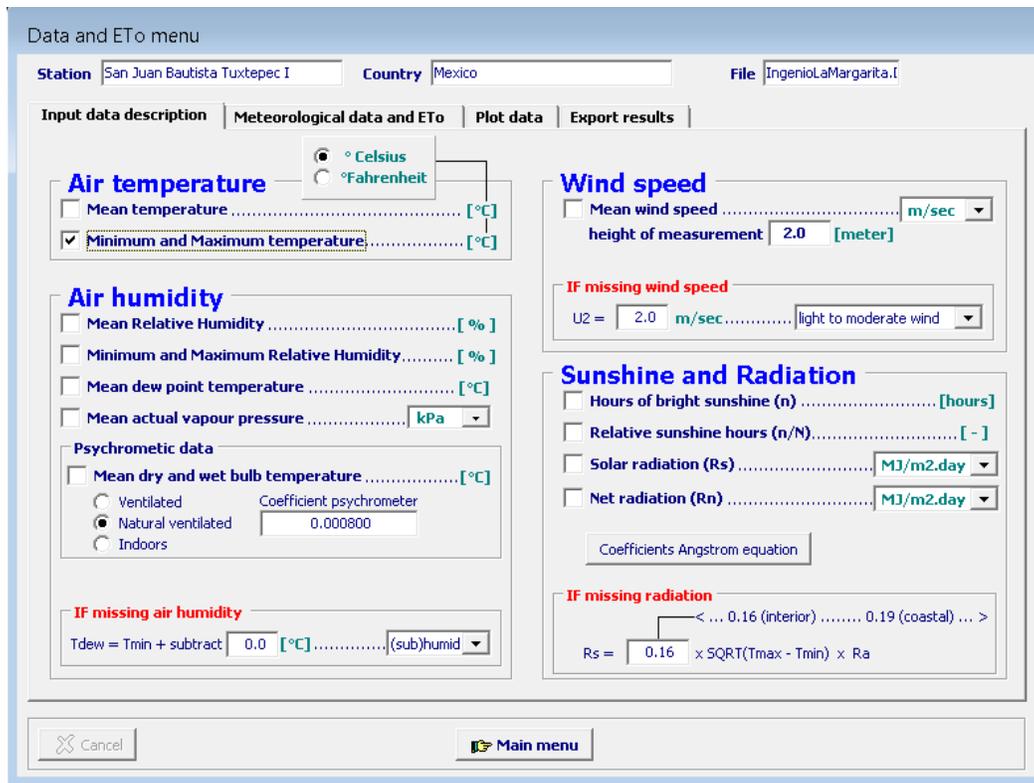


Figura 11. Interfaz de declaración de datos meteorológica de la calculadora de la evapotranspiración de referencia de la FAO

En dicha información se tiene como opción declarar información sobre la temperatura del aire, la humedad del aire, la velocidad del viento, la luz del sol y la radiación. No obstante, en la investigación se carece de dicha información, por lo que, a excepción de la temperatura del aire, las restantes cuatro opciones se toman como dados los datos que el software trae como predefinidos de antemano. En el caso de la temperatura del aire solo se marca la opción de que se declarará la temperatura máxima y mínima. Una vez declaradas las opciones para las que se cuentan con información, se procede a la captura de la misma oprimiendo sobre la opción de Datos Meteorológicos y Eto, al hacerlo aparece la caja de dialogo o interfaz de la Figura 12.

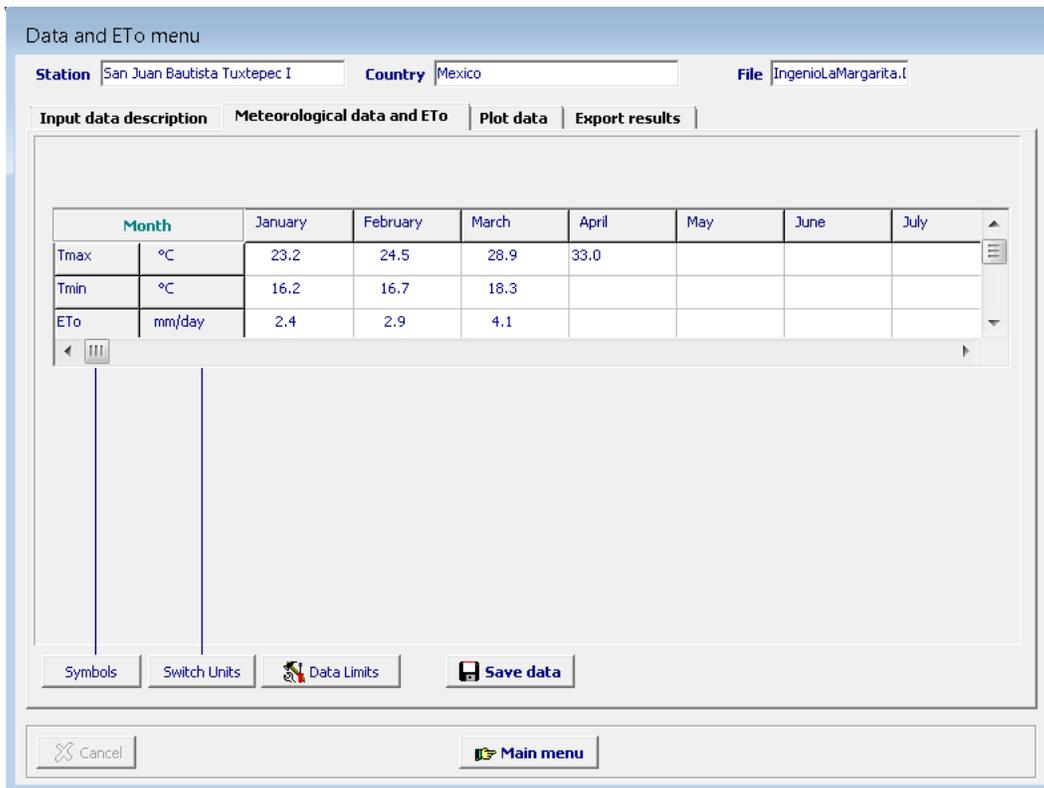


Figura 12. Interfaz de captura de la temperatura para la estimación de la Eto

En la interfaz de la Figura 12 se captura la temperatura máxima y la temperatura mínima de la estación San Juan Bautista Tuxtepec, que, con las coordenadas y la altura sobre el nivel del mar, correspondientes al ingenio La Margarita, y las opciones que por default utiliza la calculadora Eto de la FAO, va proporcionar la evapotranspiración de referencia (Eto) para el cálculo de la huella hídrica de la caña de azúcar. Por ejemplo, al declarar que la temperatura máxima en marzo fue de 28.9°C y la temperatura mínima de 18.3°C, la calculadora automáticamente mostrará que la evapotranspiración de ese mes fue de 4.1 milímetros por día. La Eto se calcula automáticamente al terminar de introducir ambas temperaturas.

Cuadro 10. Temperatura y precipitación del Ingenio La margarita

Mes	Temp máxima (°C)	Temp mínima (°C)	Temp promedio (°C)	Precipitación (mm)	ETo (mm/día)	Kc	ET0*Kc	Días/mes	ETo Total/mes
Enero	23.2	16.2	19.7	28.9	2.4	0.6	1.32	31	40.9
Febrero	24.5	16.7	20.6	16.1	2.9	0.4	1.10	28	30.9
Marzo	28.9	18.3	23.6	16.5	4.1	1.0	3.90	31	120.7
Abril	33.0	20.8	26.9	41.7	5.1	0.8	3.93	30	117.8
Mayo	33.3	22.3	27.8	178.9	5.0	1.2	5.80	31	179.8
Junio	30.5	21.8	26.1	562.2	4.3	1.3	5.68	30	170.3
Julio	29.6	21.5	25.6	587.1	4.0	1.4	5.40	31	167.4
Agosto	30.4	21.4	25.9	465.3	4.2	1.2	4.91	31	152.3
Septiembre	28.6	21.6	25.1	598.1	3.4	1.3	4.45	30	133.6
Octubre	30.5	21.7	26.1	174.1	3.7	1.2	4.44	31	137.6
Noviembre	26.9	18.3	22.6	55.7	3.0	1.6	4.86	30	145.8
Diciembre	26.3	18.3	22.3	103.0	2.7	1.1	2.89	31	89.6
				2,828					1,487

Una vez que se obtuvo la Eto promedio por día para cada mes se procedió a obtener la Eto total por mes, multiplicando el número de días del mes por la respectiva Eto obtenida de la calculadora. De esta manera para marzo, que tiene 30 días, la evaporación resultó ser de 120.7 milímetros por mes.

Después del cálculo de la evaporación de referencia se procedió a la estimación de la vaporación real (Etr) del cultivo, este caso de la caña de azúcar. Sin embargo, para el cálculo de la Etr es necesario conocer el factor del cultivo. Las diferencias en evaporación y transpiración del cultivo de referencia con respecto a un cultivo en particular, son integradas en el factor conocido como coeficiente de cultivo (Kc). El coeficiente Kc es estimado por distintos métodos para las distintas etapas fenológicas de los cultivos y llega a ser estimado por mes. En el presente trabajo se utilizó el Kc estimado por Win, Zamora y Thein (2014). Los valores del Kc utilizados corresponden a 12 meses (enero a diciembre) y corresponden a la duración aproximada del periodo de un año entre un corte de caña y otro. Es decir, se ésta haciendo el supuesto que los valores de Kc son aplicados solo a las zocas y rezocas de la caña de azúcar por igual y no a la fase de plantilla que en general tienen un periodo de desarrollo fenológico de hasta 18 meses, lo cual depende de las variedades utilizadas.

El siguiente paso una vez que se disponía del índice Kc para la caña de azúcar se obtuvo la evapotranspiración real (Etr) de la caña de azúcar, la cual consistió en multiplicar la Eto mensual por el factor del cultivo Kc de la caña de azúcar. De esta manera para el mes de marzo, y continuando con el ejemplo anterior, la evapotranspiración total de referencia, que fue de 120.7 milímetros por mes, se multiplica por el índice Kc (que resultó ser de 1.0). Por lo tanto, la evapotranspiración real de la caña de azúcar (Etr) para marzo resultó ser de 120.7 milímetros.

Una vez que se ha obtenido la Etr se observa que esta esta expresada en milímetros por mes, por lo que la misma se multiplica por un factor de 10. El factor de 10 convierte la profundidad del agua medida en milímetros a volúmenes de agua de

superficie en metros cúbicos por hectárea (m^3/ha). En el ejemplo del ingenio La Margarita, al multiplicar los 120.7 milímetros por mes por el factor de 10, se obtienen 1,207.45 metros cúbicos de evapotranspiración por hectárea para el mes de marzo.

Una vez que se ha obtenido la evapotranspiración real de la caña de azúcar por mes en metros cúbicos para los 12 meses del año se obtiene el mismo indicador para el año completo.

El volumen de agua de 14,870 m^3/ha sería la huella hídrica para una hectárea cosechada de la caña de azúcar en el ingenio La Margarita. No obstante, para tener una medida relativa que permita hacer comparaciones entre ingenios, se puede expresar la huella hídrica en tonelada.

La utilización los resultados de la investigación en términos económicos se hizo considerando conceptos presentados en el marco teórico, tales como producto total, producto medio, pesos por m^3 de huella hídrica por tonelada y pesos por m^3 de huella hídrica por hectárea. Lo relacionado con el ingreso neto, aunque deseable se complicó debido a no fue posible obtener los costos de producción para todos los ingenios.

6. RESULTADOS

Para esta investigación se estimó la huella hídrica de la caña de azúcar que abastecen a los 12 ingenios azucareros de la región del Papaloapan, fue realizado por el procedimiento de Haro *et al* (2014), Allen *et al* (2006), FAO (2006), mismo que fue descrito en el apartado de metodología. Dado que los cultivos de caña en la cuenca en general se reportan en las estadísticas como de temporal, y aunque se conoce que reciben riegos de auxilio en algunos meses del año, (tres o cuatro), la metodología usada considera el valor de la huella como huella verde y no fue posible hacer la distinción para la huella azul, aunque fuera mínima, así como tampoco obtener estimadores económicos con relación a la productividad del agua de riego.

Los resultados se presentan en dos partes: primero se muestran los resultados obtenidos para la huella hídrica de la caña de azúcar en las áreas que abastecen a los 12 ingenios azucareros que continúan funcionando en la cuenca del Papaloapan, así como datos de productividad en dichas áreas y después usando datos económicos se procederá a analizar la magnitud de dicha huella en esos términos.

6.1. Resultados huella hídrica

Los resultados obtenidos de la huella hídrica para las superficies de caña de los ingenios analizados registran valores que van de los 239 m³/ton a 328 m³/ton, una diferencia de 89 m³/ton, cantidad que es significativa (Cuadro 11 y figura 13).

Para el cálculo de este concepto participan de manera importante el rendimiento de caña por hectárea y la evapotranspiración anual del cultivo. El promedio simple para la superficie estudiada asciende a 274 m³/ton. Mekonen y Hoekstra (2011) reportan una huella hídrica de 200 m³/ton para cultivos azucareros en los que incluyen a la caña de azúcar, mientras que en Hoekstra y Champagne (2006) hacen estimaciones de agua virtual.

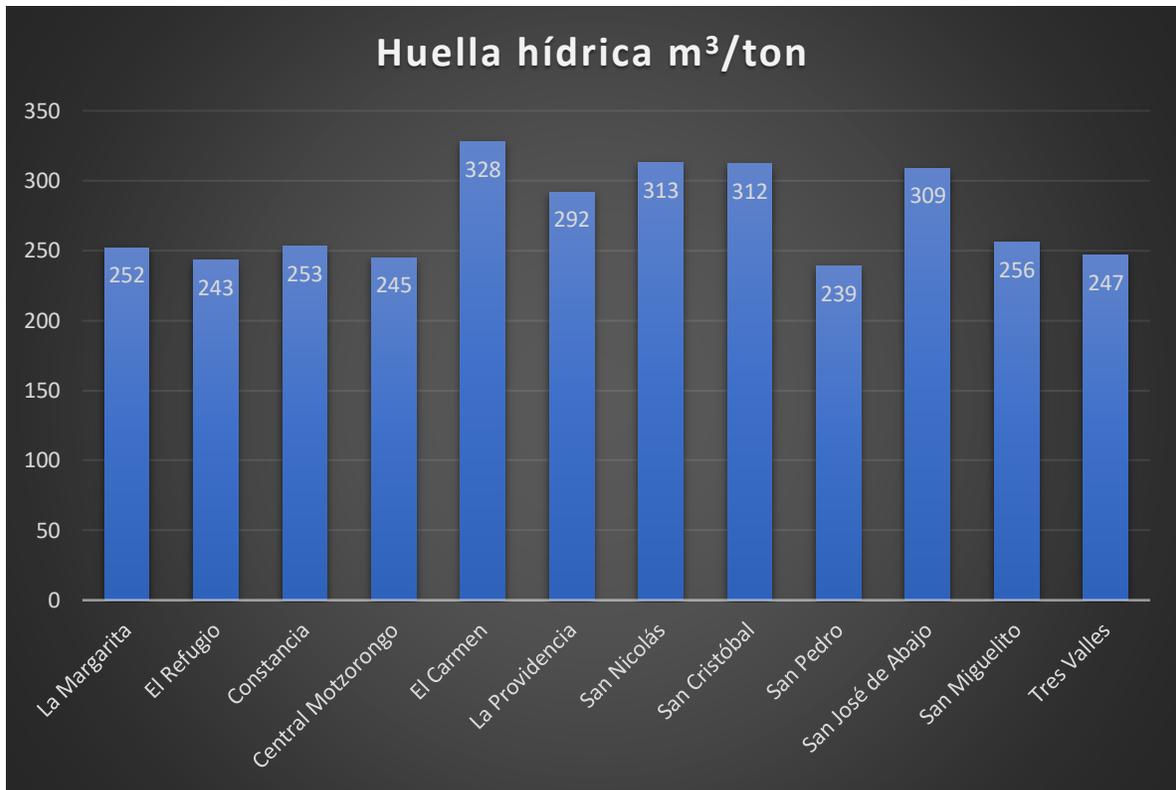


Figura 13. Huella hídrica estimada en la cuenca del Río Papaloapan

Fuente: Elaboración Propia con datos de la investigación

Para varios países, en el caso de la caña de azúcar estiman un valor de 175 m³/ton y para México en el mismo estudio ese valor ascendió a 171 m³/ton.

Cuadro 11. Estimación de la huella hídrica

Ingenio	Estado	Municipio	ET anual	Factor de conversión	Rendimiento	Huella hídrica
			(mm)		(ton/ha)	(m ³ /ton)
La Margarita	Oaxaca	Acatlán de Pérez Figueroa	1,487	10	58.9	252
El Refugio	Oaxaca	San José Cosolapa	1,772	10	73	243
Constancia	Veracruz	Tezonapa	1,543	10	61	253
Central Motzorongo	Veracruz	Tezonapa	1,540	10	62.9	245
El Carmen	Veracruz	Ixtaczoquitlán	2,130	10	65	328
La Providencia	Veracruz	Cuichapa	1,681	10	57.6	292
San Nicolás	Veracruz	Cuichapa	2,122	10	67.7	313
San Cristóbal	Veracruz	Carlos A. Carrillo	1,532	10	49.2	312
San Pedro	Veracruz	Lerdo de Tejada	1,532	10	64.2	239
San José de Abajo	Veracruz	Cuitláhuac	1,746	10	56.4	309
San Miguelito	Veracruz	Córdoba	2,092	10	81.9	256
Tres Valles	Veracruz	Tres Valles	1,588	10	64.3	247

Para el caso de Tailandia, Kongboon R. y Sampattagul S. (2012), estimaron una huella hídrica total de 202 m³/ton., aunque incluyen la huella gris que en este trabajo no se considera.

La estimación de la evapotranspiración según el método descrito en metodología reporta valores de 1487 mm y hasta 2130 mm (figura 14), lo que combinado con rendimientos bajos repercute en general, en los mayores valores para la huella hídrica. En la figura 14 se puede observar que los ingenios que presentan los mayores niveles de evapotranspiración son los que registran los mayores niveles de huella hídrica: El Carmen y San Nicolás.

También se tiene el caso de San Miguelito con una evapotranspiración alta (2092 mm) y una huella hídrica abajo del promedio (256 m³/ton). Por el contrario, se tiene el caso del ingenio San Cristóbal con una evapotranspiración relativamente baja 1532 mm pero con una huella hídrica de las más altas 312 m³/ton (figura 15). En ambos casos el valor de la huella la termina de explicar el rendimiento, para el caso de del ingenio San Cristóbal registra el rendimiento de caña más bajo (49.2 ton/ha), mientras que el ingenio San Miguelito tiene el rendimiento más alto (81.9 ton/ha).

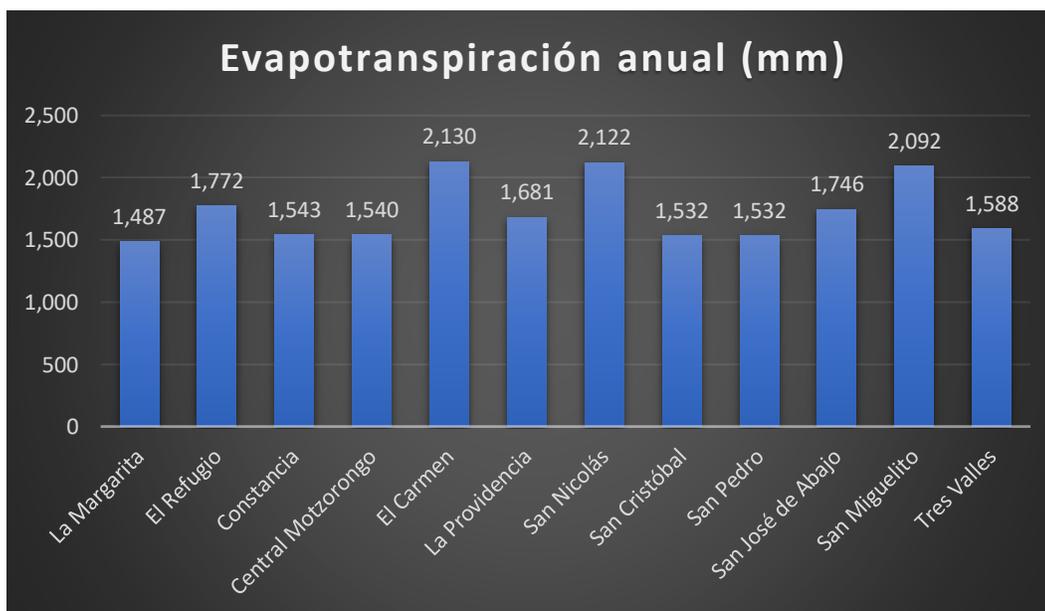


Figura 14. Evapotranspiración

Fuente: Elaboración Propia con datos de la investigación

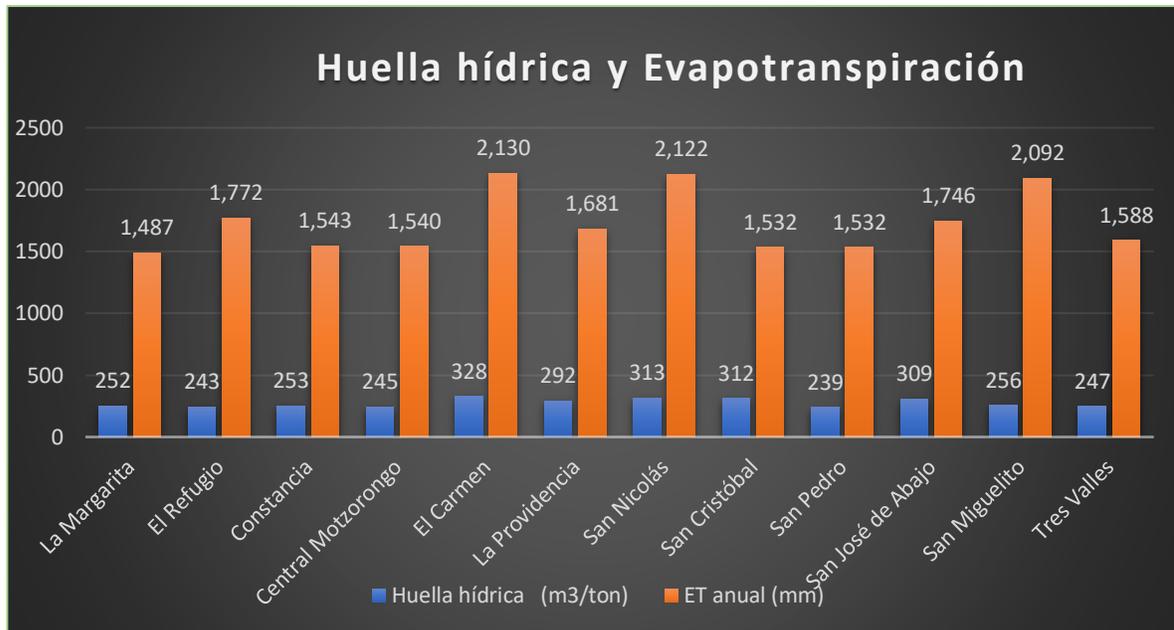


Figura 15. Huella hídrica y Evapotranspiración en la cuenca Papaloapan

Fuente: Elaboración Propia con datos de la investigación

Para el caso de los rendimientos se observa en el cuadro 12 que los ingenios que presentan los mayores rendimientos, también comprenden las menores superficies, por lo que es posible que en ellos se tenga un mayor control del proceso productivo: San Miguelito y el Refugio. Mientras que el ingenio del Carmen con la menor superficie registra un rendimiento intermedio (65.0 ton/ha).

Cuadro 12. Rendimiento y superficie de caña de azúcar en el área de los ingenios del Papaloapan

Ingenio	Estado	Caña molida bruta (ton)	Superficie (ha)	Rendimiento (ton/ha)
La Margarita	Oaxaca	1,123,351	19,077	58.9
El Refugio	Oaxaca	471,423	6,456	73.0
Constancia	Veracruz	771,752	12,655	61.0
Central Motzorongo	Veracruz	1,338,219	21,267	62.9
El Carmen	Veracruz	242,071	3,724	65.0

La Providencia	Veracruz	864,446	15,005	57.6
San Nicolás	Veracruz	1,014,907	14,981	67.7
San Cristóbal	Veracruz	2,646,308	53,825	49.2
San Pedro	Veracruz	1,202,882	18,736	64.2
San José de Abajo	Veracruz	512,984	9,091	56.4
San Miguelito	Veracruz	485,674	5,931	81.9
Tres Valles	Veracruz	2,329,987	36,225	64.3

6.2 Huella hídrica en términos económicos

Como ya se ha comentado antes, el agua es un recurso que cada vez es más escaso y que tiene muchos usos alternativos, por lo que se debe utilizar en las actividades más redituables, tomando en cuenta que primeramente debe destinarse a satisfacer las necesidades básicas de la población.

En las áreas cercanas a los ingenios y por motivos económicos y sociales, en parte por la capacidad instalada de los ingenios se ha buscado de diferentes maneras que se ocupen con caña de azúcar, también se debe buscar que se busque la eficiencia en la producción del cultivo.

El rendimiento por hectárea es un indicador importante, como ya quedó plasmado en el marco teórico de este documento. En el cuadro 12 se muestran los rendimientos por hectárea de caña en las superficies de caña que abastecen a cada ingenio analizado. También se aprecia que hay diferencias importantes en este indicador.

Utilizando en este sentido lo que aquí se ha encontrado con relación a la huella hídrica, se tiene que, cuando se analiza lo que pasa con la huella hídrica por hectárea en cada ingenio, se observa que hay cosas interesantes (figura 16). El primer hallazgo es que hay tres ingenios que superan los 20000 m³ de huella por hectárea, más de 5000 m³ que los que tienen los valores más pequeños. Dado que el agua tiene un valor, que puede en la mayoría de los casos ser expresado en unidades monetarias, eso habla de que se está perdiendo o dejando de usar en este

cultivo un recurso valioso. También dice que hay un área de oportunidad para mejorar el manejo del cultivo de caña, usando mejores prácticas de cultivo o utilizando mejor plántula o semilla para que mejore el rendimiento y así se reduzca la huella hídrica que es una pérdida del agua de la cuenca.



Figura 16. Huella hídrica por hectárea

Fuente: Elaboración Propia con datos de la investigación

En términos de los conceptos económicos relacionados con el cultivo, también es posible señalar algunos aspectos relevantes.

Generalmente, las explicaciones económicas con relación a los recursos utilizados en el proceso de producción de un cultivo determinado, se refieren al uso. Dígase por ejemplo en términos del precio sombra encontrado en un modelo de programación matemática. En este caso se dice lo que aportaría al ingreso, una adicional disponible de tal o cual recurso. O bien el aporte o productividad del insumo en cuestión, digamos el agua, como ya se explicó en el marco teórico. En este caso se habla del valor expresado en unidades monetarias de unidades de un recurso que se pierden; la huella hídrica es una cantidad de agua por tonelada de

caña de azúcar que se pierde de la cuenca y que no estará disponible más, para ese cultivo, ni para ningún otro. Con relación al ingreso por tonelada de caña por m³ de huella, los mayores valores se tienen para la margarita, San Cristóbal, San Pedro y la Constanca.



Figura 17. Ingreso por M³ de Huella hídrica

Fuente: Elaboración Propia con datos de la investigación

También se ha calculado este valor para el caso del valor de la producción, mismo que esta expresado por hectárea. Se observa que cuando la huella se expresa con respecto al valor de la producción por hectárea que se tienen en San Cristóbal y Tres Valles. En el estudio no se calculó el valor del agua, tampoco su productividad marginal, pero puede observarse que el concepto de huella hídrica constituye un indicador que puede dar información con respecto a la manera en que se está utilizando el recurso hídrico de la cuenca y de la necesidad de mejorar el manejo del mismo, o tal vez de la utilización del recurso en otros cultivos o actividades económicas.

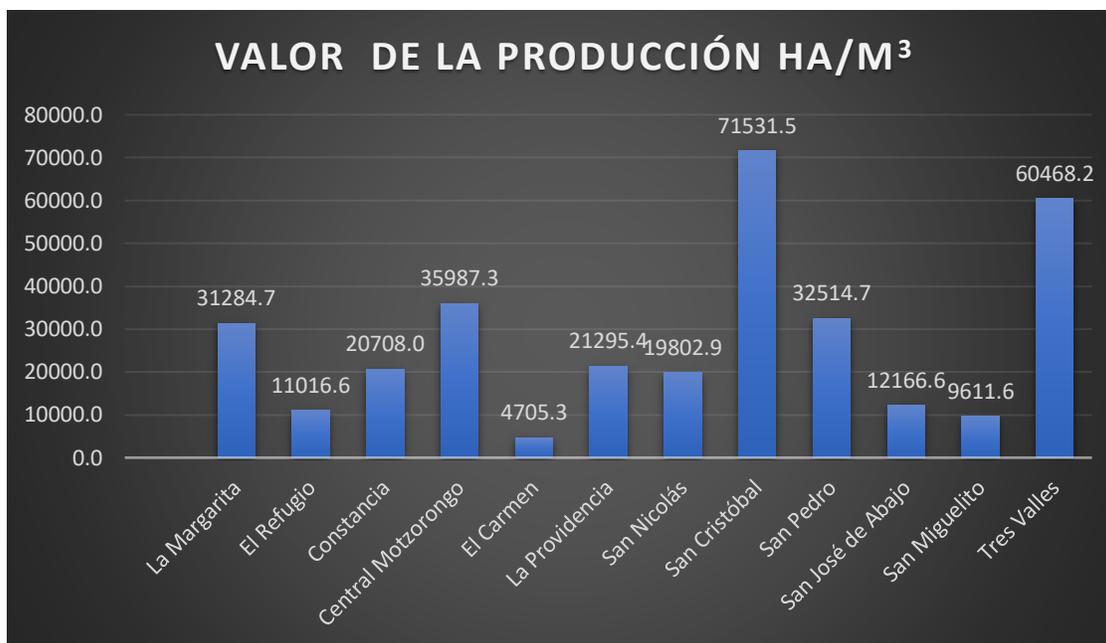


Figura 18. Valor de la producción por huella hídrica

Fuente: Elaboración Propia con datos de la investigación

Al comparar algunos estudios sobre la huella hídrica en el cultivo de caña de otros países llegan a la conclusión que la huella hídrica es uno de los indicadores más extendidos, actualizados y utilizados para evaluar el uso y consumo de agua asociado a un producto, actividad o cuenca hidrográfica. Para Brasil la huella de agua gris en el rendimiento del cultivo de caña de azúcar se estimó y fue considerado un valor alto y así demostró cuánto puede demandar este cultivo en recursos hídricos para diluir su carga de contaminantes (Lins et al., 2019). Otro estudio fue para Argentina ya que el objetivo fue construir un mapa regional de la huella hídrica de un cultivo tan importante como es la caña de azúcar. La huella de la producción de caña de azúcar fue considerada con diferentes niveles de tecnología. Los resultados se distribuyen aproximadamente en la huella de agua verde 12% y la huella de agua gris 88%. La huella hídrica es muy baja, en condiciones de cultivo de secano, porque solo está asociada a la dilución y aplicación de agua para agroquímicos (Jorrat M. et al, 2018). Marruecos realiza un estudio de la Huella hídrica de ese País, Dentro de esa investigación se menciona que Marruecos fue un importador neto virtual de agua en el período 1996-2005. La importación virtual de

agua fue de 12.6 mil millones de m³/año, con un costo promedio de 0.98 US \$/m³, y la exportación de agua virtual fue de 4.3 mil millones de m³/año, con una ganancia promedio de 1.66US\$/m³. Solo el 31% de la exportación virtual de agua se originó en recursos hídricos marroquíes. Al importar productos en lugar de producirlos en el país, Marruecos ahorró 27.800 millones de m³/año (75% de verde, 21% de azul y 4% de gris) de agua doméstica, lo que equivale al 72% de huella hídrica en Marruecos (Schyns y Hoekstra, 2014).

CONCLUSIONES

México pasó de ser un país de alta disponibilidad de agua a uno de baja, debido al crecimiento demográfico, la huella hídrica proporciona datos específicos de área y tiempo como la utilización del agua azul y la contaminación de las aguas grises. La huella hídrica siendo un indicador multidimensional tendrá como origen en el desarrollo y aplicación de conceptos relacionados con el sector agrícola ya que suma todos los volúmenes de agua utilizados en cada paso del proceso de producción.

El objetivo de la presente investigación fue estimar la huella hídrica del cultivo de caña de azúcar en los ingenios de la cuenca Papaloapan, para proponer medidas que contribuyan a mejorar la eficiencia del uso del agua en este cultivo, con base en la metodología utilizada y los resultados con ella obtenidos, se explica por evapotranspiración y por rendimiento lo cual los ingenios que reportan mayor evapotranspiración son los ingenios que registran mayores niveles de huella hídrica, eso ingenios son El Carmen y San Nicolás.

Para el caso de los rendimientos del cultivo, en la investigación se pudo observar que las superficies que abastecen de caña a los ingenios que presentan los mayores rendimientos, también comprenden las menores superficies, por lo que es posible que en ellos se tenga un mayor control del proceso productivo. En las áreas cercanas a los ingenios y por motivos económicos y sociales, en parte por la capacidad instalada de los ingenios se ha buscado de diferentes maneras que se ocupen con caña de azúcar, también se debe buscar que se busque la eficiencia en la producción del cultivo.

La identificación de las superficies que abastecen a los ingenios El Carmen, San Nicolás y San José de Abajo, que tienen mayores huellas hídricas ofrecen información para reducirlas, al mejorar las técnicas del cultivo o las semillas utilizadas para aumentar rendimientos.

En casos en que eso no sea posible lo más conveniente podrías ser cambiar de cultivo para educir la huella hídrica.

Con esta investigación, puede ser utilizada para crear conciencia sobre la utilización del agua identificada, como llevar a cabo una política del agua para que fuera decisiva para alcanzar la seguridad alimentaria global y la mitigación del agua y no tener crisis globales de este recurso hídrico ya que vivir con escasez de agua es una realidad más que cotidiana y aunque esta realidad nos parezca algo lejana, es responsabilidad de todos hacer uso responsable de un recurso como este, el cual utilizamos y necesitamos para nuestra supervivencia. De igual forma tener las posibilidades de mejor manejo de recurso hídrico de la cuenca Papaloapan para esos cultivos u otros o para alguna otra actividad económica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (2006). Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and drainage, Paper 56, Rome, 298 pp.
2. AgroDer. 2012. Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica. WWF México y AgroDer. México DF.
3. Atlas del agua en México. Secretaría del Medio ambiente y de los recursos naturales. Edición 2018. <https://agua.org.mx/biblioteca/atlas-de-agua-en-mexico/>
4. Coase, Ronald, 1960, "The Problem of Social Cost", Journal of Law and Economics, vol. 3, No. 1, págs. 1–44
5. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) (2020). Base de datos climatológica nacional (sistema CLICOM). Disponible en <http://clicom-mex.cicese.mx>
6. Erkin A. E. & Hoekstra A. Y. (2014). Water footprint scenarios for 2050: A global Analysis. Environment International.
7. FAO (2006). Evapotranspiración del cultivo, guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Serie de Riego y Drenaje FAO No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, _____.
8. Gerbens-Leens P.W., van Lienden A.R., Hoekstra A. Y., & van der Meer Th. H. (2012). Biofuel scenarios in a water perspective: the global blue and green water footprint of road transport in 2030. Global Environmental Change.
9. Hoekstra, A. Y. 2008. Water neutral: Reducing and offsetting the impacts of water footprints. Value of Water Research Report Series No 28, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands. Disponible en: <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report28-WaterNeutral.pdf> (last accessed May 22, 2014).

10. Hoekstra, A. Y. 2009. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*. 68: 1963-1974.
11. Haro, M. E., Navarro, I., Thompson, R. & Jiménez, B. (2014). Estimation of the water footprint of sugarcane in Mexico: is ethanol production an environmentally feasible fuel option? *Journal of Water and Climate Change*, Vol. V(1) pp. 70-80.
12. Hoekstra, A. Y. and Chapagain, A. K. (2006) Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resour Manage* (2006) DOI 10.1007/s11269-006-9039-x
13. ICCA (2017). *Guía Metodológica para la Evaluación de la Huella Hídrica en una Cuenca Hidrográfica*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Costa Rica. Euroclima.
14. Jorrat M., Araujo P. & Mele F. (2018). Sugarcane water footprint in the province of Tucuman, Argentina. Comparison between different management practices. *Journal of Cleaner Production*.
15. Kongboon R. & Sampattagul S. The water footprint of sugarcane and cassava in northern Thailand (2012). *Social and Behavioral Sciences*.
16. Lins R., Maciel A., Toribio B., Paes M. & Siqueira J. (2019). Assessment of the gray water footprint of the pesticide mixture in a soil cultivated with sugarcane in the northern area of the State of Pernambuco, Brazil. *Journal of Cleaner Production*
17. Mekonnen M. & Hoekstra A. (2010). A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. *Hydrology and Earth System Sciences*
18. Nicholson, W (2008). *Teoría microeconómica. Principios básicos y ampliaciones*. (9a. ed.). México: Cengage Learning.
19. OCDE. (2015). *Principios de Gobernanza del Agua de la OCDE*. <https://www.oecd.org/cfe/regional-policy/OECD-Principles-Water-spanish.pdf>

20. Robert S. Pindyck, Daniel L. Rubinfeld (2009). Microeconomía. (7a ed.). Madrid: Pearson educación, S.A.
21. Raes, D. (2012). The ETo calculator. Evapotranspiration from a reference surface. Reference Manual. Version 3.2. Rome, 38 pp.
22. SAGARPA-SIAP-CONADESUCA (2014). Estimación de la superficie sembrada de caña de azúcar correspondiente a la zafra 2013-2014 mediante la interpretación de imágenes satelitales y supervisión directa de predios. Disponible en:
<http://www.conadesuca.gob.mx/DocumentosPaginaGob/resultadosestimacioncaazucarzafra2013-2014final-150127114107-conversion-gate02.pdf>
23. Schyns, J.F. and Hoekstra, A.Y. (2014) The water footprint in Morocco: The added value of Water Footprint Assessment for national water policy, Value of Water Research Report Series No. 67, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
24. Vázquez del Mercado Arribas, Rita, Huella hídrica en México: análisis y perspectivas / Rita Vázquez del Mercado Arribas, Javier Lambarri Beléndez (editores -- Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2017. 255 pp.
25. Vale F., Aparecida T., Toni S., Tiago O., Jose de castro G., Silva L & Luiz R. (2016). Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tiete/Jacaré watershed assessment. Journal of Cleaner Production.
26. W. M. Hanemann (2005). The economic conception of water. University of California, Berkeley, USA.
27. Win, S. K, Zamora, O. B & Thein (2014). Determination of the water requirement and Kc values of sugarcane at different crop growth stages by lysimetric method. Sugar Tech, Vol. 16(3): 286–294. DOI: 10.1007/s12355-013-0282-1

ANEXOS

Para Ingenio: La Margarita

Id: 20172

Estación San Juan Bautista Tuxtepec I (DGE) - Oaxaca

Latitud Norte 18.1

Longitud Oeste -96.11861111

Mes	Temp máxima	Temp mínima	Temp promedio	Precipitación	ETo	Kc	ET0*Kc	Días/mes	ETo Total/mes
	(°C)	(°C)	(°C)	(mm)	(mm/día)				
Enero	23.2	16.2	19.7	28.9	2.4	0.6	1.32	31	40.9
Febrero	24.5	16.7	20.6	16.1	2.9	0.4	1.10	28	30.9
Marzo	28.9	18.3	23.6	16.5	4.1	1.0	3.90	31	120.7
Abril	33.0	20.8	26.9	41.7	5.1	0.8	3.93	30	117.8
Mayo	33.3	22.3	27.8	178.9	5.0	1.2	5.80	31	179.8
Junio	30.5	21.8	26.1	562.2	4.3	1.3	5.68	30	170.3
Julio	29.6	21.5	25.6	587.1	4.0	1.4	5.40	31	167.4
Agosto	30.4	21.4	25.9	465.3	4.2	1.2	4.91	31	152.3
Septiembre	28.6	21.6	25.1	598.1	3.4	1.3	4.45	30	133.6
Octubre	30.5	21.7	26.1	174.1	3.7	1.2	4.44	31	137.6
Noviembre	26.9	18.3	22.6	55.7	3.0	1.6	4.86	30	145.8
Diciembre	26.3	18.3	22.3	103.0	2.7	1.1	2.89	31	89.6
				2,828					1,487

Para Ingenio: El Refugio

Id 2176

Estación

Mes	Temp máxima	Temp mínima	Temp promedio	Precipitación	ETo	Kc	ET0*Kc	Días/mes	ETo Total/mes
	(°C)	(°C)	(°C)	(mm)	(mm/día)				
Enero	30.23	15.84	23.03	4.0	3.9	0.6	2.15	31	66.5
Febrero	29.75	16.54	23.14	25.0	4.2	0.4	1.60	28	44.7
Marzo	31.39	18.52	24.95	21.5	4.7	1.0	4.47	31	138.4
Abril	35.05	21.32	28.18	67.5	5.7	0.8	4.39	30	131.7
Mayo	34.23	22.74	28.48	139.0	5.3	1.2	6.15	31	190.6
Junio	34.37	22.77	28.57	155.9	5.3	1.3	7.00	30	209.9
Julio	32.39	21.19	26.79	178.9	5.0	1.4	6.75	31	209.3
Agosto	31.87	21.00	26.44	251.2	4.8	1.2	5.62	31	174.1
Septiembre	31.70	21.10	26.40	188.9	4.5	1.3	5.90	30	176.9
Octubre	30.97	20.55	25.76	76.0	4.0	1.2	4.80	31	148.8
Noviembre	29.47	18.10	23.78	37.5	3.6	1.6	5.83	30	175.0
Diciembre	27.61	16.35	21.98	50.4	3.2	1.1	3.43	31	106.2
				1,196					1,772

Para el Ingenio: Constanca

Mes	Temp máxima	Temp mínima	Temp promedio	Precipitación	ETo	Kc	ET0*Kc	Días/mes	ETo Total/mes
	(°C)	(°C)	(°C)	(mm)	(mm/día)				
Enero	25.1	14.7	19.9	27.5	3.2	0.6	1.76	31	54.6
Febrero	27.6	17.6	22.6	32.1	3.5	0.4	1.33	28	37.2
Marzo	29.3	18.9	24.1	31	4.1	1.0	3.895	31	120.7
Abril	33.2	20.6	26.9	0.2	5.2	0.8	4.004	30	120.1
Mayo	31.8	21.2	26.5	44.4	4.8	1.2	5.568	31	172.6
Junio	32.1	23.3	27.7	142.2	4.5	1.3	5.94	30	178.2
Julio	31.4	22.3	26.8	525.7	4.5	1.4	6.075	31	188.3
Agosto	32.9	23.0	27.9	47.8	4.7	1.2	5.499	31	170.5
Septiembre	30.4	22.8	26.6	527.1	3.7	1.3	4.847	30	145.4
Octubre	29.4	21.6	25.5	375.9	3.4	1.2	4.08	31	126.5
Noviembre	26.0	17.6	21.8	194.1	2.8	1.6	4.536	30	136.1
Diciembre	26.1	16.5	21.3	95.1	2.8	1.1	2.998545	31	93.0
				2,043					1,543

Para el ingenio: Motzorongo central

Mes	Temp máxima	Temp mínima	Temp promedio	Precipitación	ETo	Kc	ET0*Kc	Días/mes	ETo Total/mes
	(°C)	(°C)	(°C)	(mm)	(mm/día)				
Enero	25.1	14.7	19.9	27.5	3.0	0.6	1.65	31	51.2
Febrero	27.6	17.6	22.6	32.1	3.5	0.4	1.33	28	37.2
Marzo	29.3	18.9	24.1	31	4.1	1.0	3.895	31	120.7
Abril	33.2	20.6	26.9	0.2	5.2	0.8	4.004	30	120.1
Mayo	31.8	21.2	26.5	44.4	4.8	1.2	5.568	31	172.6
Junio	32.1	23.3	27.7	142.2	4.5	1.3	5.94	30	178.2
Julio	31.4	22.3	26.8	525.7	4.5	1.4	6.075	31	188.3
Agosto	32.9	23.0	27.9	47.8	4.7	1.2	5.499	31	170.5
Septiembre	30.4	22.8	26.6	527.1	3.7	1.3	4.847	30	145.4
Octubre	29.4	21.6	25.5	375.9	3.4	1.2	4.08	31	126.5
Noviembre	26.0	17.6	21.8	194.1	2.8	1.6	4.536	30	136.1
Diciembre	26.1	16.5	21.3	95.1	2.8	1.1	2.998545	31	93.0
				2,043					1,540

Para el Ingenio: El Carmen

Mes	Temp máxima	Temp mínima	Temp promedio	Precipitación	ETo	Kc	ET0*Kc	Días/mes	ETo Total/mes
	(°C)	(°C)	(°C)	(mm)	(mm/día)				
Enero	21.8	14.7	7.5		3.1	0.6	1.705	31	52.9
Febrero	31.0	19.3	7.7		5.3	0.4	2.014	28	56.4
Marzo	30.1	19.3	8.5		5.6	1.0	5.32	31	164.9
Abril	31.5	20.3	9.1		6.3	0.8	4.851	30	145.5
Mayo	32.3	21.1	9.8		6.6	1.2	7.656	31	237.3
Junio	30.6	20.3	10.0		6.2	1.3	8.184	30	245.5
Julio	29.4	19.9	10.4		5.8	1.4	7.83	31	242.7
Agosto	30.3	20.7	11.2		5.8	1.2	6.786	31	210.4
Septiembre	30.1	21.0	11.8		5.4	1.3	7.074	30	212.2
Octubre	31.0	21.5	12.0		5.1	1.2	6.12	31	189.7
Noviembre	32.2	22.0	11.8		4.8	1.6	7.776	30	233.3
Diciembre	30.2	20.6	11.0		4.2	1.1	4.497818	31	139.4
									2,130

Para el Ingenio: La Providencia

Mes	Temp máxima	Temp mínima	Temp promedio	Precipitación	ETo	Kc	ET0*Kc	Días/mes	ETo Total/mes
	(°C)	(°C)	(°C)	(mm)	(mm/día)				
Enero	27.6	22.5	17.3	62	3.2	0.6	1.76	31	54.6
Febrero	27.9	22.1	16.4	48	3.7	0.4	1.406	28	39.4
Marzo	33.2	26.4	19.5	106	5.0	1.0	4.75	31	147.3
Abril	35.1	27.9	20.6	88	5.8	0.8	4.466	30	134.0
Mayo	32.1	26.4	20.6	273	5.0	1.2	5.8	31	179.8
Junio	32.1	26.6	21.1	224.1	5.0	1.3	6.6	30	198.0
Julio	30.5	25.4	20.4	593	4.6	1.4	6.21	31	192.5
Agosto	30.5	25.4	20.3	404	4.5	1.2	5.265	31	163.2
Septiembre	31.4	26.0	20.5	434	4.5	1.3	5.895	30	176.9
Octubre	30.5	25.4	20.3	133.1	3.9	1.2	4.68	31	145.1
Noviembre	28.4	23.9	19.4	69	3.1	1.6	5.022	30	150.7
Diciembre	27.0	21.8	16.7	1	3.0	1.1	3.212727	31	99.6
				2,435					1,681

Para el Ingenio: San Nicolás

Mes	Temp máxima	Temp mínima	Temp promedio	Precipitación	ETo	Kc	ET0*Kc	Días/mes	ETo Total/mes
	(°C)	(°C)	(°C)	(mm)	(mm/día)				
Enero	21.8	7.5	14.7		3.1	0.6	1.705	31	52.9
Febrero	31.0	7.7	19.3		5.3	0.4	2.014	28	56.4
Marzo	30.1	8.5	19.3		5.6	1.0	5.32	31	164.9
Abril	31.5	9.1	20.3		6.3	0.8	4.851	30	145.5
Mayo	32.3	9.8	21.1		6.6	1.2	7.656	31	237.3
Junio	30.6	10.0	20.3		6.1	1.3	8.052	30	241.6
Julio	29.4	10.4	19.9		5.7	1.4	7.695	31	238.5
Agosto	30.3	11.2	20.7		5.8	1.2	6.786	31	210.4
Septiembre	30.1	11.8	21.0		5.4	1.3	7.074	30	212.2
Octubre	31.0	12.0	21.5		5.1	1.2	6.12	31	189.7
Noviembre	32.2	11.8	22.0		4.8	1.6	7.776	30	233.3
Diciembre	30.2	11.0	20.6		4.2	1.1	4.497818	31	139.4
				0					2,122

Para el Ingenio: San Cristóbal

Mes	Temp máxima	Temp mínima	Temp promedio	Precipitación	ETo	Kc	ET0*Kc	Días/mes	ETo Total/mes
	(°C)	(°C)	(°C)	(mm)	(mm/día)				
Enero	25.1	19.9	14.7	27.5	3.0	0.6	1.65	31	51.2
Febrero	27.6	22.6	17.6	32.1	3.5	0.4	1.33	28	37.2
Marzo	29.3	24.1	18.9	31	4.1	1.0	3.895	31	120.7
Abril	33.2	26.9	20.6	0.2	5.2	0.8	4.004	30	120.1
Mayo	31.8	26.5	21.2	44.4	4.8	1.2	5.568	31	172.6
Junio	32.1	27.7	23.3	142.2	4.5	1.3	5.94	30	178.2
Julio	31.4	26.8	22.3	525.7	4.4	1.4	5.94	31	184.1
Agosto	32.9	27.9	23.0	47.8	4.7	1.2	5.499	31	170.5
Septiembre	30.4	26.6	22.8	527.1	3.7	1.3	4.847	30	145.4
Octubre	29.4	25.5	21.6	375.9	3.3	1.2	3.96	31	122.8
Noviembre	26.0	21.8	17.6	194.1	2.8	1.6	4.536	30	136.1
Diciembre	26.1	21.3	16.5	95.1	2.8	1.1	2.998545	31	93.0
				2,043					1,532

Para el Ingenio: San Pedro

Mes	Temp máxima	Temp mínima	Temp promedio	Precipitación	ETo	Kc	ETo*Kc	Días/mes	ETo Total/mes
	(°C)	(°C)	(°C)	(mm)	(mm/día)				
Enero	25.1	19.9	14.7	27.5	3.0	0.6	1.65	31	51.2
Febrero	27.6	22.6	17.6	32.1	3.5	0.4	1.33	28	37.2
Marzo	29.3	24.1	18.9	31	4.1	1.0	3.895	31	120.7
Abril	33.2	26.9	20.6	0.2	5.2	0.8	4.004	30	120.1
Mayo	31.8	26.5	21.2	44.4	4.8	1.2	5.568	31	172.6
Junio	32.1	27.7	23.3	142.2	4.5	1.3	5.94	30	178.2
Julio	31.4	26.8	22.3	525.7	4.4	1.4	5.94	31	184.1
Agosto	32.9	27.9	23.0	47.8	4.7	1.2	5.499	31	170.5
Septiembre	30.4	26.6	22.8	527.1	3.7	1.3	4.847	30	145.4
Octubre	29.4	25.5	21.6	375.9	3.3	1.2	3.96	31	122.8
Noviembre	26.0	21.8	17.6	194.1	2.8	1.6	4.536	30	136.1
Diciembre	26.1	21.3	16.5	95.1	2.8	1.1	2.998545	31	93.0
				2,043					1,532

Para el Ingenio: San José de Abajo

Mes	Temp máxima	Temp mínima	Temp promedio	Precipitación	ETo	Kc	ET0*Kc	Días/mes	ETo Total/mes
	(°C)	(°C)	(°C)	(mm)	(mm/día)				
Enero	25.5	19.0	12.4		3.3	0.6	1.815	31	56.3
Febrero	27.5	20.1	12.7		4.1	0.4	1.558	28	43.6
Marzo	32.2	24.9	17.6		5.1	1.0	4.845	31	150.2
Abril	31.2	25.0	18.8		4.9	0.8	3.773	30	113.2
Mayo	34.8	28.7	22.6		6.1	1.2	7.076	31	219.4
Junio	32.5	26.6	20.6		5.2	1.3	6.864	30	205.9
Julio	31.5	26.1	20.6		4.8	1.4	6.48	31	200.9
Agosto	31.6	25.6	19.6		5.0	1.2	5.85	31	181.4
Septiembre	31.2	25.7	20.2		4.5	1.3	5.895	30	176.9
Octubre	28.7	23.4	18.1		3.8	1.2	4.56	31	141.4
Noviembre	25.5	19.9	14.3		3.1	1.6	5.022	30	150.7
Diciembre	26.5	20.5	14.5		3.2	1.1	3.426909	31	106.2
				0					1,746

Para el Ingenio: San Miguelito

Mes	Temp máxima	Temp mínima	Temp promedio	Precipitación	ETo	Kc	ETo*Kc	Días/mes	ETo Total/mes
	(°C)	(°C)	(°C)	(mm)	(mm/día)				
Enero	21.8	14.7	7.5		3.1	0.6	1.705	31	52.9
Febrero	31.0	19.3	7.7		5.3	0.4	2.014	28	56.4
Marzo	30.1	19.3	8.5		5.6	1.0	5.32	31	164.9
Abril	31.5	20.3	9.1		6.3	0.8	4.851	30	145.5
Mayo	32.3	21.1	9.8		6.6	1.2	7.656	31	237.3
Junio	30.6	20.3	10.0		6.1	1.3	8.052	30	241.6
Julio	29.4	19.9	10.4		5.8	1.4	7.83	31	242.7
Agosto	30.3	20.7	11.2		5.8	1.2	6.786	31	210.4
Septiembre	30.1	21.0	11.8		5.4	1.3	7.074	30	212.2
Octubre	31.0	21.5	12.0		5.1	1.2	6.12	31	189.7
Noviembre	32.2	22.0	11.8		4.1	1.6	6.642	30	199.3
Diciembre	30.2	20.6	11.0		4.2	1.1	4.497818	31	139.4
				0					2,092

Para el Ingenio: Tres Valles

Mes	Temp máxima	Temp mínima	Temp promedio	Precipitación	ETo	Kc	ET0*Kc	Días/mes	ETo Total/mes
	(°C)	(°C)	(°C)	(mm)	(mm/día)				
Enero	24.9	19.6	14.3	10.00	3.0	0.6	1.65	31	51.2
Febrero	22.9	18.7	14.4	59.60	2.8	0.4	1.064	28	29.8
Marzo	28.7	23.3	18.0	31.50	4.1	1.0	3.895	31	120.7
Abril	32.1	27.0	21.8	46.50	4.7	0.8	3.619	30	108.6
Mayo	30.8	26.9	23.0	127.70	4.1	1.2	4.756	31	147.4
Junio	33.8	28.6	23.3	113.00	5.0	1.3	6.6	30	198.0
Julio	32.6	27.5	22.5	88.50	4.8	1.4	6.48	31	200.9
Agosto	33.5	27.8	22.1	39.00	5.1	1.2	5.967	31	185.0
Septiembre	33.1	27.7	22.2	99.20	4.7	1.3	6.157	30	184.7
Octubre	28.2	24.2	20.2	148.20	3.3	1.2	3.96	31	122.8
Noviembre	26.3	20.9	15.5	61.90	3.2	1.6	5.184	30	155.5
Diciembre	23.6	19.3	15.0	23.70	2.5	1.1	2.677273	31	83.0
				849					1,588