

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**HUELLA HÍDRICA DE LA PRODUCCIÓN DE SOTOL  
EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA MÉXICO**

**POR:**

**ING. JUAN ANTONIO CERECERES RIVAS**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA**

**CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO**

**DICIEMBRE 2021**



Huella hídrica de la producción del sotol en el Estado de Chihuahua, México. Tesis presentada por Juan Antonio Cereceres Rivas como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Hidrología, ha sido aprobado y aceptado por:

---

**M.I. Javier González Cantú**  
Director de la Facultad de Ingeniería

---

**Dr. Alejandro Villalobos Aragón**  
Secretario de Investigación y Posgrado

---

**M.I. Miguel Ángel González Núñez**  
Coordinador Académico

---

**Dra. Carmen Julia Navarro Gómez**  
Directora de Tesis

---

Diciembre 2021

**COMITÉ**  
**Dra. Carmen Julia Navarro Gómez**  
**M.I. Martha Lorena Calderón Fernández**  
**M.I. Benito Aguirre Sáenz**  
**Dr. Jesús Rubén Sánchez Navarro**

Derechos Reservados  
Juan Antonio Cereceres Rivas  
Circuito Universitario No. 1, Campus  
Universitario 2 C.P. 31125  
Chihuahua, Chih. México  
Diciembre 2021



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
**CHIHUAHUA**

19 de enero de 2022.

**ING. JUAN ANTONIO CERECERES RIVAS**

Presente.-

En atención a su solicitud relativa al trabajo de Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Hidrología, es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director la, **Dra. Carmen Julia Navarro Gómez** para que lo desarrolle como Tesis, con el título: **"HUELLA HÍDRICA DE LA PRODUCCIÓN DEL SOTOL EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, MÉXICO"**.

### **Índice de Contenido**

#### **Capítulo 1: Introducción**

#### **Capítulo 2: Fundación Teórica**

#### **Capítulo 3: Justificación**

#### **Capítulo 4: Hipótesis**

##### **4.1 Objetivo General**

##### **4.2 Objetivos Específicos**

#### **Capítulo 5: Metodología**

##### **5.1 Selección del sitio de estudio**

##### **5.2 Cuenca de estudio y estaciones climatológicas cercanas**

##### **5.3 Medición de la precipitación en el área de estudio**

##### **5.4 Medición de las temperaturas máxima y mínima**

##### **5.5 Cálculo de evapotranspiración (Método 1)**

##### **5.6 Cálculo de evapotranspiración (Método 2)**

##### **5.7 Cálculo de evapotranspiración mediante software CROPWAT (Método 3)**

##### **5.8 Comparativa de resultados obtenidos mediante los tres métodos**

##### **5.9 Uso de software CROPWAT 8.0 para determinar la Huella Hídrica Verde**

##### **5.10 Evapotranspiración de referencia ETo**

##### **5.11 Evapotranspiración del cultivo ETc**

##### **5.12 Selección de valores del coeficiente de cultivo (Kc)**

##### **5.13 Huella Hídrica Verde**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00  
[www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
CHIHUAHUA

5.14 Huella Hídrica Azul

5.15 Medición de agua incorporada en el proceso de elaboración de la bebida

5.16 Huella Hídrica gris

### Capítulo 6: Resultados

6.1. Huella Hídrica verde

6.2. Huella Hídrica azul

6.3. Huella Hídrica gris

6.4. Huella Hídrica total

### Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

Aportación y líneas futuras de investigación

Bibliografía

Glosario

Curriculum Vitae

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

**A T E N T A M E N T E**  
"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN  
INGENIERÍA Y POSGRADO  
U.A.CH.



DIRECCIÓN

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00  
[www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)



## Índice de gráficas

|  |    |
|--|----|
| Gráfica 1 Huella Hídrica de algunos productos alimenticios .....     | 10 |
| Gráfica 2 Huella Hídrica Bebidas Alcohólicas .....                   | 12 |
| Gráfica 3 Correlación Estaciones: La Flor del desierto/Jiménez ..... | 21 |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 Flujos de agua virtual en el comercio internacional.....                          | 7  |
| Figura 2 Huella Hídrica de producción nacional a nivel global .....                        | 9  |
| Figura 3 Sitio de estudio.....   | 18 |
| Figura 4 Estaciones cercanas y cuenca de influencia.....                                   | 19 |
| Figura 5 Año con menor precipitación.....  | 24 |
| Figura 6 Año con mayor precipitación .....   | 24 |
| Figura 7 Mes con mayor temperatura .....   | 26 |
| Figura 8 Mes con menor temperatura .....   | 26 |
| Figura 9 Evapotranspiración del año 2004 mediante software CROPWAT .....                   | 32 |
| Figura 10 Selección método para evapotranspiración de referencia.....                      | 34 |
| Figura 11 Resultados evapotranspiración de referencia .....                                | 35 |
| Figura 12 Curva de coeficiente de cultivo .....  | 36 |
| Figura 13 Valores Kc seleccionados .....   | 37 |
| Figura 14 Resultados CROPWAT 8.0 .....   | 37 |
| Figura 15 Precipitación efectiva obtenida con los valores máximos de precipitación .....   | 38 |
| Figura 16 Precipitación efectiva obtenida con los valores mínimos de precipitación .....   | 38 |
| Figura 17 Precipitación efectiva obtenida con los valores promedios de precipitación ..... | 39 |
| Figura 18 Sistema contenedor de Vinazas.....   | 43 |

## Índice de diagramas

|  |    |
|--|----|
| Diagrama 1 . Las cuatro fases en la evaluación de la Huella Hídrica..... | 15 |
| Diagrama 2 Método Isoyetas ArcMap .....                                  | 23 |
| Diagrama 4 Metodología CROPWAT 8.0 para $HH_{Verde}$ .....               | 34 |
| Diagrama 5 Proceso de elaboración de bebida (Sotol) .....                | 40 |



## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Estaciones Climatológicas.....  | 20 |
| Tabla 2 Datos disponibles .....   | 22 |
| Tabla 3 Valores estimados.....  | 22 |
| Tabla 4 Resultados Isoyetas del periodo 2004-2018 .....                       | 25 |
| Tabla 5 Temperatura máxima .....  | 27 |
| Tabla 6 Temperatura mínima .....  | 27 |
| Tabla 7 Evaporación equivalente del mes de Enero del 2004 .....               | 31 |
| Tabla 8 Evapotranspiración mes de Enero del 2004 (Ecuación alternativa) ..... | 32 |
| Tabla 9 Comparativa de resultados de evapotranspiración del año 2004 .....    | 33 |
| Tabla 10 Huella Hídrica Verde con valores máximos de precipitación.....       | 38 |
| Tabla 11 Huella Hídrica Verde con valores mínimos de precipitación.....       | 38 |
| Tabla 12 Huella Hídrica Verde con valores promedios de precipitación .....    | 39 |
| Tabla 13 Huella Hídrica verde .....   | 40 |
| Tabla 14 Ciclo de elaboración de la bebida (Sotol) .....                      | 41 |
| Tabla 15 Resultados análisis de calidad de agua .....                         | 44 |
| Tabla 16 Cálculos Huella Hídrica Gris.....                                    | 45 |
| Tabla 17 Valores de precipitación .....                                       | 46 |
| Tabla 18 Temperaturas Máximas.....  | 46 |
| Tabla 19 Temperaturas Mínimas.....  | 47 |
| Tabla 20 Resultados Huella Hídrica Verde .....                                | 47 |
| Tabla 21 Resultados Huella Hídrica Azul .....                                 | 48 |
| Tabla 22 Resultados Huella Hídrica Gris .....                                 | 48 |
| Tabla 23 Huella Hídrica del Sotol .....                                       | 49 |



## Introducción

El agua es un recurso de vital importancia para el desarrollo de las actividades humanas y el crecimiento integral de las comunidades. En consecuencia, a medida que la población aumenta, la demanda de alimentos es mayor y con ello la cantidad de agua necesaria para la producción de estos, también se incrementa. Ignorar estos hechos, puede contribuir a la generación de problemas de disponibilidad derivados de una insostenible gestión del recurso. Con ello, aunque el agua es la mediadora en la obtención de todos los bienes y servicios producidos que son consumidos por todos los grupos sociales que habitan el planeta, no siempre es visible el volumen del líquido que a cada producto ha sido incorporado, o que se ha contaminado (Llamas, 2006).

Adicionalmente, las actividades humanas en prácticamente todo el planeta han generado contaminación y agotamiento de los recursos de agua dulce, sin que aparentemente, se haya incidido en que una cuantificación realista de los volúmenes consumidos por cada sector, podrían clarificar el camino a seguir para que las estrategias propuestas, tanto por los administradores, como por los usuarios del líquido, den resultados verdaderamente satisfactorios en materia de una mejor gestión del agua.

Más aún, debido al intercambio comercial de productos y servicios, el líquido se ha convertido en un recurso global, ya que además de los mercados locales, hay demandas globales de productos agrícolas, pecuarios e industriales, asociados a usos intensivos del recurso hídrico. Con esto, el volumen consumido de agua se ha desconectado del usuario, que no logra identificar el contenido del líquido en ellos (Agua Virtual), ni los impactos en los sistemas hídricos que son generados por cada etapa de producción del bien o servicio. Fig. 1



**Figura 1** Flujos de agua virtual en el comercio internacional. (Hoekstra & Chapagain)

Por ejemplo, aunque México cultiva algodón, es deficitario en su producción y lo importa en bruto de Estados Unidos, Australia o Brasil, lleva a cabo el proceso textil al interior del país y luego exporta telas o ropa a Canadá. Entonces, para evaluar el impacto total del consumo de agua para la producción de esos bienes, debe conocerse el origen del líquido y la cadena de suministro del producto

Por su parte, Biswas (2006), estima que la cantidad de agua en el planeta es suficiente para cubrir las necesidades actuales y futuras, tanto de los grupos humanos, como del resto de usuarios que lo habitan, con la condición de administrar adecuadamente el recurso hídrico, de tal manera que se pueda atenuar la crisis de escasez del agua hasta en las zonas más áridas del mundo, llevando a cabo acciones derivadas de nuevas estrategias de sostenibilidad de los recursos naturales. Entre ellas se puede mencionar la evaluación de la Huella Hídrica, cuyo concepto, componentes y metodología fueron establecidos por el Profesor Arjen Hoekstra (Universidad de Twente, Países Bajos) en el año 2002, siendo empleada como un indicador del consumo de agua dulce para producir un bien o servicio y los impactos que esto puede generar en los sistemas hídricos.

La evaluación de la Huella Hídrica de productos de uso común es una herramienta que permite conectar al usuario con los volúmenes de agua empleados



en la fabricación de estos. Como ejemplo se tienen valores alarmantes de promedios mundiales de Huella Hídrica tales como los de la carne de res que alcanza los 15,415 litros de agua por cada kilogramo de carne. O bien, el del chocolate con 17,196 litros de agua por cada kilogramo (Mekonnen & Hoekstra 2011).

Realizar los cálculos de Huella Hídrica de los productos típicos de cada región puede permitir la correcta administración de los recursos hídricos locales. El MANUAL DE EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA surge como propuesta global que refiere la metodología para su evaluación, y en el se mencionan las tres componentes de la Huella Hídrica : Huella Hídrica Azul, referida al uso consuntivo del agua de fuentes superficiales ó subterráneas, midiendo el volumen consumido en determinado periodo y lugar; la Huella Hídrica Verde, que indica la precipitación que no genera escurrimientos ni infiltración debido a la evapotranspiración en los cultivos productivos y la Huella Hídrica Gris, que se refiere a la cantidad de agua dulce que se necesitaría para reducir el riesgo generado por los contaminantes incorporados en los procesos de producción (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011)

## **Antecedentes**

Entre los sectores usuarios del recurso destaca por su mayor volumen de consumo, el agrícola y puesto que la producción de alimentos es prioritaria, emerge como una necesidad impostergable, acceder a un manejo más eficiente del recurso o preparar a la sociedad para un incremento de la problemática hídrica desde todas las perspectivas.

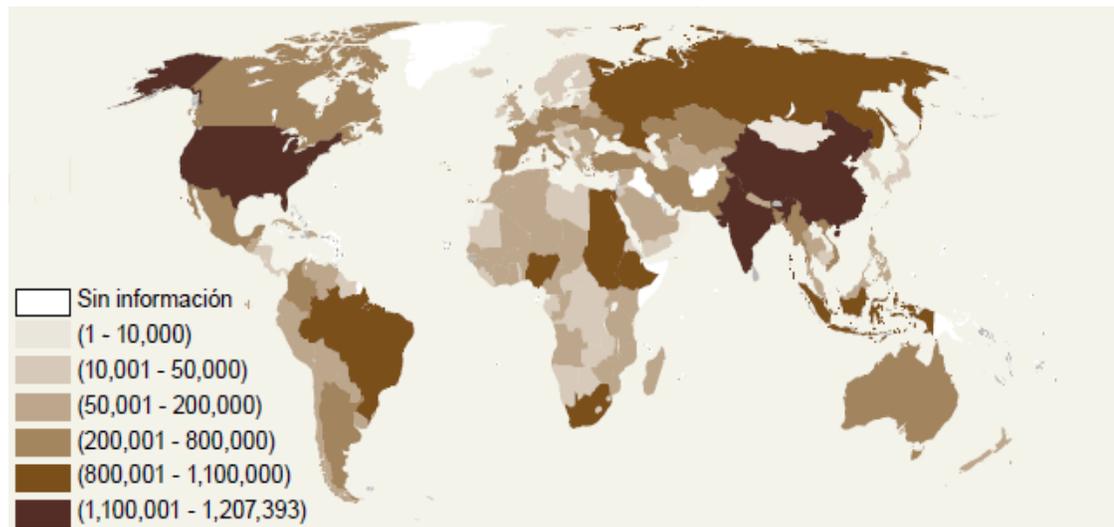
La tendencia hacia el desarrollo sostenible por parte de la sociedad, la realización de las actividades de manera eficiente con respecto al uso del agua, así como la mitigación de los daños en el medio ambiente, han visibilizado la necesidad de cuantificar la cantidad de agua empleada en dichas actividades (Mateo et al., 2019).



El concepto planteado por Arjen Hoekstra en el año 2002, de la Huella Hídrica, la percibe como un indicador que establece la relación entre los productos consumidos y la cantidad de agua dulce utilizada para producirlos, considerando toda su cadena de suministro. Al evaluar esta relación, se pueden determinar factores como el consumo y contaminación del agua que pueden dar lugar a la escasez del recurso y también puede conducir a una mejora en la administración del agua (COSUDE, 2016).

En México en el 2011, se presentó una sequía severa en el 50 % del territorio nacional que redujo la disponibilidad de agua y provocó pérdidas en cosechas, ganado y en el suministro de agua potable (CONAGUA, 2012). En ese año, México se encontraba entre uno de los veinte países con mayor Huella Hídrica en el mundo, en donde el 91% de ella se debió a la producción agrícola y pecuaria, el 9% restante se asoció a los usos doméstico e industrial (AgroDer, 2012).

En la Figura 2, se muestra la Huella Hídrica de la producción nacional a nivel global.



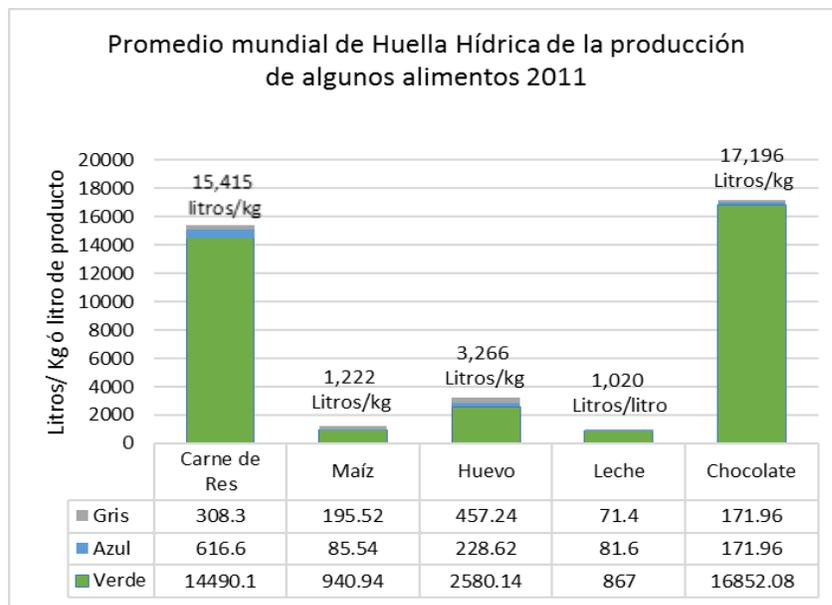
**Figura 2 Huella Hídrica de producción nacional a nivel global (Hm³/año) (AgroDer, 2012)**

Los cambios en el clima, pueden generar inestabilidad en los sistemas de producción y puesto que en México la mayor producción de Huella Hídrica es de



tipo agrícola, es necesario que los usuarios conozcan las condiciones de disponibilidad del agua y reduzcan en lo posible, los gastos consumidos para la elaboración de sus productos (Vázquez & Lambarri, 2017).

Algunos estudios hechos por M.M. Mekonnen y A.Y. Hoekstra en el 2011, se refieren al cálculo del promedio mundial de la Huella Hídrica de la producción en alimentos, en los que destacaron el chocolate y la carne de res, por su magnitud; en la Gráfica 1, se muestran los resultados obtenidos en dichos estudios.



**Gráfica 1 Huella Hídrica de algunos productos alimenticios (Mekonnen & Hoekstra 2011)**

En general, debido al aumento en la demanda de productos regionales en zonas con limitaciones de disponibilidad de agua, se ha incrementado el estrés hídrico (relación de consumo a disponibilidad) por lo que ha surgido la necesidad de modificar sanciones y multas en función de un aprovechamiento insostenible, basado frecuentemente en el desperdicio.

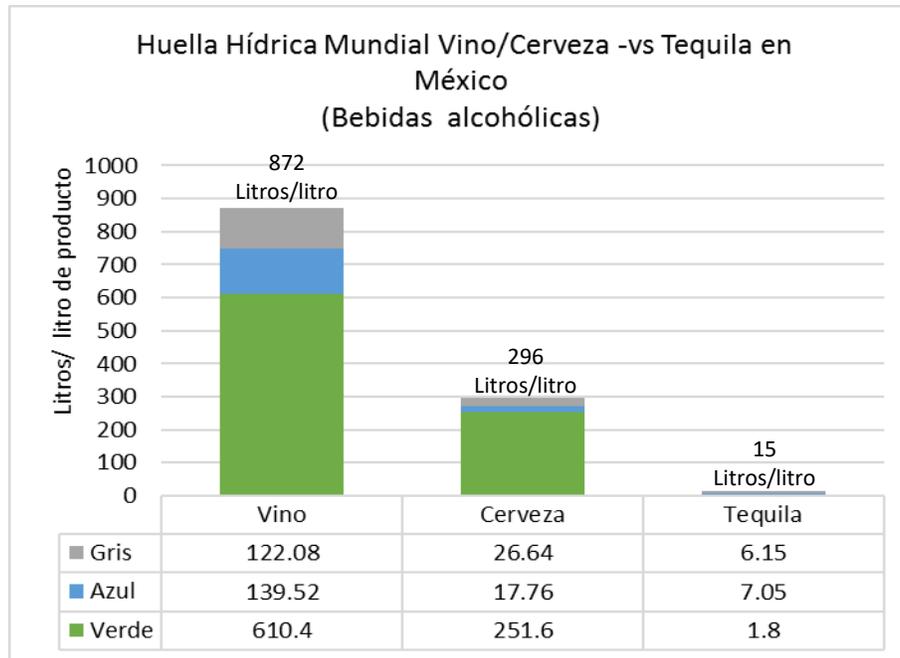
Existen pocos estudios locales acerca de la Huella hídrica de estos productos, aunque se han diseñado algunas estrategias de sostenibilidad a nivel nacional e internacional. En septiembre de 2015, dentro de la Cumbre de las



Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible, se aprobó la Agenda 2030. Este documento está conformado por 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible, en donde el número 12 se refiere al consumo y la producción responsables, que consisten en fomentar el uso eficiente de los recursos y la energía (ONU, 2015).

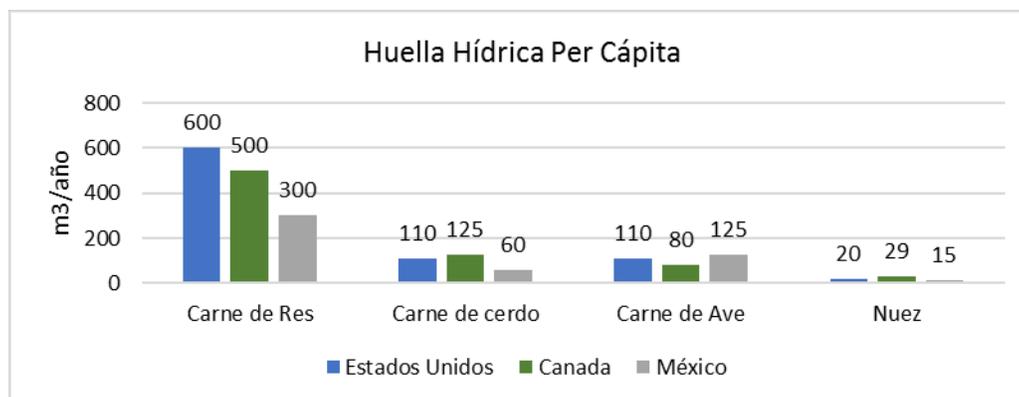
México participa activamente en dicha agenda y un ejemplo de esto es que en el año 2016, el Centro Mario Molina y el Consejo Regulador del Tequila A.C. firmaron la Estrategia de sustentabilidad para la Cadena Productiva Agave Tequila, con el fin de disminuir el impacto ambiental de las actividades de esta industria. Entonces se presentaron estudios realizados con datos del 2014 acerca de la producción de un litro de tequila, indicando que se requieren 15 litros de agua para el producto terminado. Además, se establecieron metas y compromisos de sustentabilidad donde indican una disminución del 5% y 15% en el consumo de agua por unidad de producto para los años 2020 y 2030 respectivamente (Centro Mario Molina, 2016).

Con respecto a los cálculos de HH de bebidas alcohólicas, M. M. Mekonnen y A. Y. Hoekstra en el 2011, obtuvieron el promedio mundial de la Huella Hídrica del vino y de la cerveza. A su vez, en el 2016 el Centro Mario Molina obtuvo la del tequila. Los resultados de ambos estudios, aunque presentan distintos tipos de análisis, se muestran en la Gráfica 2 como una referencia y debido a la similitud por ser bebidas alcohólicas; cabe mencionar que los estudios se realizaron en diferentes años, por lo que las condiciones hídricas pueden tener variaciones considerables, los resultados del vino y de la cerveza son promedios mundiales y los del tequila son aplicados en México, por lo que se puede apreciar una diferencia significativa entre la HH del vino y la del tequila.



**Gráfica 2 Huella Hídrica Bebidas Alcohólicas (Vino y Cerveza elaborada a partir de datos de (Mekonnen & Hoekstra, 2011)), Tequila a partir de datos de (Centro Mario Molina, 2016)**

La Gráfica 3, muestra la Huella Hídrica per Cápita de los productos de la industria ganadera, así como la de la nuez, de Estados Unidos, Canadá y México.



**Gráfica 3 Huella Hídrica per Cápita**

En el estado de Chihuahua, México, la industria ganadera, así como los cultivos de alfalfa y nuez representan la principal producción de Huella Hídrica, donde el 90% de la producción local nogalera y el 70 % de la producción local ganadera son exportados, especialmente a EUA, así como el 90% de la producción local de alfalfa, al estado de Coahuila (AgroDer, 2012).



Un producto históricamente producido en Chihuahua, que empieza a incrementar su demanda es la bebida alcohólica Sotol, llamada así gracias a la planta del mismo nombre *Dasyliirion spp.* (*Sereque, Sotol*) que crece en los desiertos y semidesiertos del norte de México y sur de Estados Unidos y es utilizada para producir dicha bebida, que se elabora mediante la cocción y fermentación alcohólica de las piñas de *Dasyliirion spp.* Su proceso de elaboración es similar al de otras bebidas regionales como el tequila y el mezcal y requiere un tiempo de maduración promedio de 15 años, que puede variar con el clima y con las condiciones del suelo, siendo esto el factor de mayor importancia para la realización del estudio.

La Evaluación de la Huella Hídrica del proceso de producción del Sotol, puede contribuir a determinar su sostenibilidad, el impacto que se genera en el entorno hídrico, social y económico de la región, así como estar en condiciones de atenuarlo. A pesar de esto, no existen reportes que aborden el estudio del volumen total de agua empleada durante toda la cadena de producción del sotol, ó de los impactos y afectaciones que dicho proceso conlleva. Por tal motivo, en este trabajo se busca obtener un sistema de información geográfica acerca de la ubicación de los cultivos de sotol, así como la cuantificación de sus Huellas Hídricas, Azul, Verde y Gris.

Como se mencionó, en el estado de Chihuahua uno de los productos que empiezan a incrementar su demanda es la bebida alcohólica Sotol, cuyo proceso implica la “Jima” de las plantas silvestres *Dasyliirion spp* (*Sereque, Sotol*) que se refiere a la extracción del centro de la planta mediante cortes precisos y con los cuidados necesarios para permitir su regeneración (Perez & Rubio, 2007).

Dichas plantas son endémicas de las zonas desérticas tanto del norte de México como del sur de Estados Unidos. La humedad relativa en las regiones mencionadas se caracteriza por ser muy baja e irregular, así como presentar lluvias escasas (Reyes-Valdés, *et al.*, 2019).

En sus inicios, la comercialización del sotol se hizo de manera clandestina, puesto que coincidió con el periodo en que se estableció la prohibición de alcoholes en los Estados Unidos. Los pobladores visualizaron la oportunidad del negocio, y colocaron construcciones llamadas “Vinatas” a lo largo de la frontera. Debido a que



todo el proceso se realizó de manera secreta, no se cuenta con registros de producción en dichos periodos (Sierra et al., 2008).

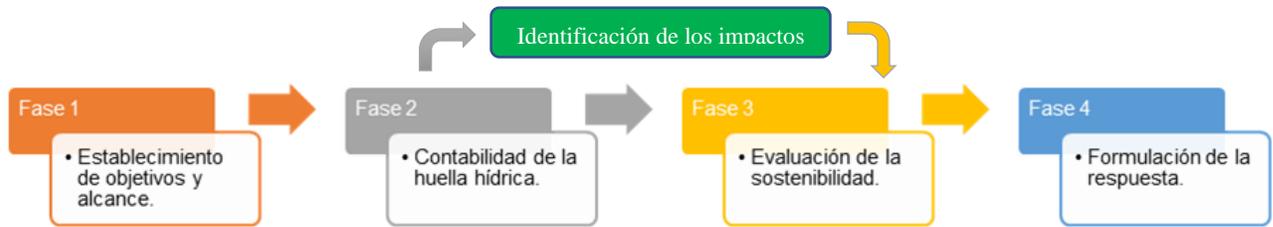
## **Fundamentación Teórica**

Una metodología que pretende inducir al desarrollo sostenible de la sociedad es la de Agua Virtual, establecida por Allan (1993) acerca del estudio detallado de las importaciones y exportaciones de los productos junto con los requerimientos de agua durante la cadena de suministro, buscando que en los países donde cuentan con suficiente disponibilidad del recurso, exporten sus productos de usos intensivos a los países con estrés hídrico.

Los autores del concepto de Huella Ecológica ó del Carbono (Rees y Wackernagel, 2000), plantean el cálculo de la misma como un indicador de la superficie necesaria para obtener los productos que son consumidos por la población, así como su capacidad de asimilación de los desechos generados.

En relación al recurso agua, desde el punto de producción en el campo, hasta el punto de entrega final de un bien o servicio terminado, cualquier producto, agrícola, animal o industrial, pasa por una serie de etapas de producción distintas, con diferentes efectos sobre los recursos hídricos que ha utilizado independientemente del lugar o tiempo donde estos se hayan usado. Esto significa que el impacto total del consumo hídrico de un producto, sólo se puede evaluar siguiendo la cadena de suministro y el origen del producto.

Esta forma de analizar el uso del agua a lo largo de las cadenas de suministro ha despertado interés a partir del concepto de “Huella Hídrica” como: “un indicador del uso de agua dulce, no sólo en el uso directo del agua por un consumidor o productor, sino también en su uso indirecto” (Hoekstra, 2003). Para determinarlo, el autor, planteó las fases para la evaluación de la Huella Hídrica como se muestra en el Diagrama 1.



**Diagrama 1 . Las cuatro fases en la evaluación de la Huella Hídrica (Hoekstra et al., 2011)**

Como se advierte, la Huella Hídrica es un indicador multidimensional, ya que muestra los volúmenes consumidos de agua por tipo de fuente y los volúmenes contaminados por cada tipo de contaminante, además de ubicarlos geográfica y temporalmente. Esto permite utilizar la Huella Hídrica como herramienta para la mejor administración del líquido, y cuantificar el consumo por región o incluso por producto (Mateo et al., 2019)

Asociado a lo anterior, se puede mencionar que el Programa Mundial de Evaluación del Agua (WWAP), establece que la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (IWRM por sus siglas en inglés) es “un proceso que promueve la administración y el desarrollo coordinados del agua, el suelo y los otros recursos relacionados, con el fin de maximizar los resultados económicos y el bienestar social de forma equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales” (Hassing, Ipsen, & Clausen, 2009). En México, en la primera Ley de Aguas Nacionales (LAN) de 1992, se incorporó el concepto de la GIRH y declara explícitamente al desarrollo sostenible como su objetivo principal, alcanzable mediante la ejecución de actividades a desarrollar en el marco de este concepto.

### **Justificación**

La gestión del agua es uno de los factores que pueden incidir en la generación de crisis hídricas que provocan uno de los problemas más importantes para el desarrollo de la sociedad, afectando tanto al medio ambiente, como al sistema económico, muestra de ello, es el señalamiento hecho por el Foro



Económico Mundial (WEF), al ubicarla dentro de los cinco principales riesgos globales en la encuesta anual durante los últimos 8 años (WEF, 2019).

Por este motivo emerge una tendencia global hacia el uso eficiente del agua, y señalada en los objetivos del Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 promovida por la Organización de las Naciones Unidas (ONU,2015) que dan continuidad al plan de acción del Programa 21 relativo a la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, como se describe el apartado anterior.

Aún y cuando la planta *Dasyilirion spp* (Sotol) ha sido documentada ampliamente y el uso del agua en la producción de sotol para comercialización se puede considerar desde 1930 con las primeras Vinatas identificadas, no existen reportes que aborden el estudio del volumen total de agua empleada durante toda la cadena de producción del sotol o de los impactos o afectaciones que dicho estudio conlleva. A su vez, un factor de interés es que se tiene un tiempo promedio de 15 años en la maduración de la planta, por lo que los consumos de agua pueden ser significativos. Para la elaboración de un litro de sotol, son necesarios de 10 a 20 kg de materia prima (Ruelas, 2019), en el estado de Chihuahua los últimos valores registrados fueron realizados en el 2001, brindando cifras aproximadas a las 6,000 toneladas de cosecha de la planta Sotol por lo que se puede estimar una producción de 272,000 litros de sotol en ese año (Fundación Produce Chihuahua, 2011).

Algunos estudios realizados sobre el Sotol producido en México, como los de Reyes-Valdés et al. (2019) y Sierra et al. (2008), solo contemplan la identificación, distribución geográfica de las especies de las plantas naturales en el estado de Chihuahua y la sostenibilidad ecológica del cultivo, referida al suelo y a la extracción desmedida de la planta *Dasyilirion* en las zonas de reproducción natural. Se puede considerar que la evaluación de la Huella Hídrica cubre el principal factor de la GIRH ya que analiza desde la perspectiva del agua.



## **Hipótesis**

La Evaluación de la Huella Hídrica del proceso de producción del Sotol, puede contribuir a determinar su sostenibilidad, y reducir los impactos que se generan en el entorno hídrico, social y económico.

### **Objetivo General**

- Determinar la Huella Hídrica total del proceso de producción de Sotol, a partir de sus componentes

### **Objetivos Específicos**

- Elaborar un sistema de información geográfica con lo referente a los cultivos de sotol.
- Determinar la contabilidad de Huella Hídrica Verde generada del proceso de producción del Sotol.
- Determinar la contabilidad de Huella Hídrica Azul generada del proceso de producción del Sotol.
- Determinar la contabilidad de la Huella Hídrica Gris generada del proceso de producción del Sotol.

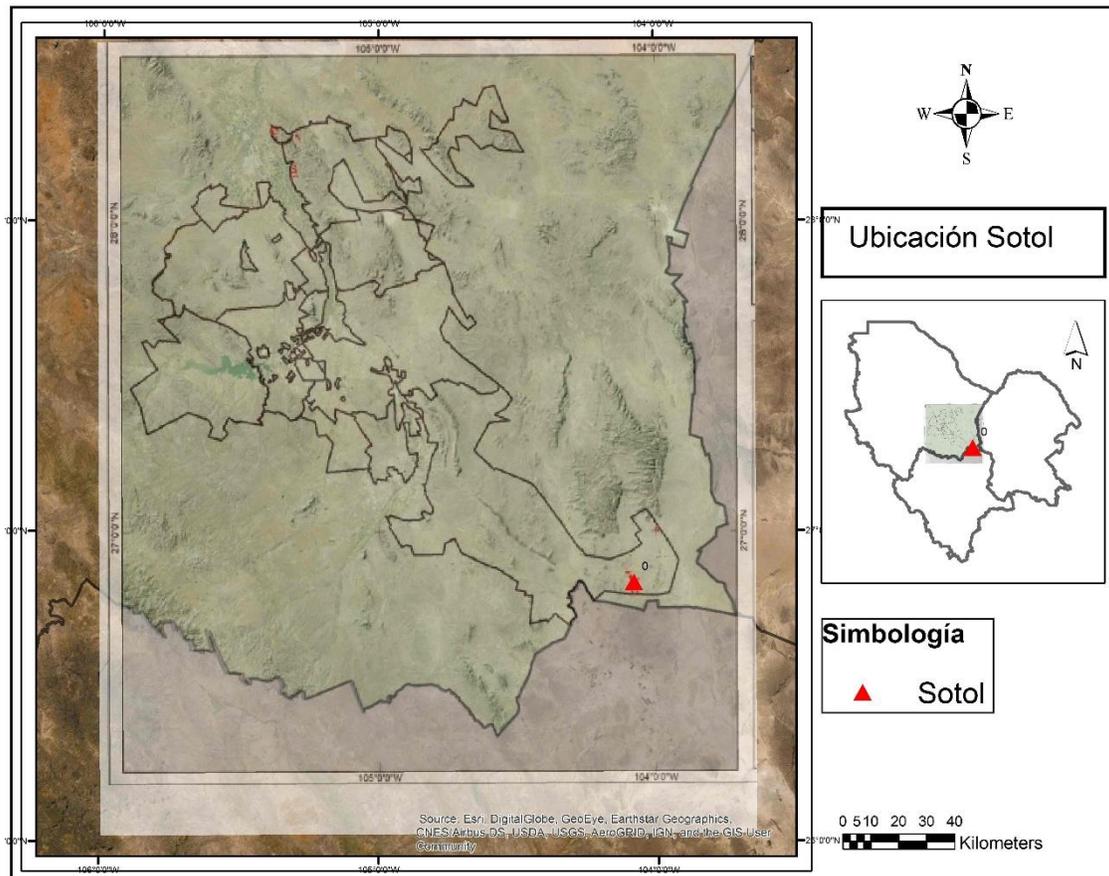
### **Metodología**

Dentro de la metodología existe un acercamiento con los principales productores de Sotol para identificar cada uno de los procesos de la producción, rendimientos de la materia prima, ubicar las zonas de extracción de la planta y cantidad de producción.



## Selección del sitio de estudio

La determinación de la zona de estudio se genera mediante el acercamiento con los principales productores de Sotol del estado de Chihuahua. Los productores indican el área donde se realiza la mayor extracción de las plantas, señalando el municipio de Jiménez Chihuahua, como la zona de mayor concentración de plantas. Estudios realizados por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), determinan que existen áreas potenciales de distribución de Sotol, sin embargo, las superficies son reducidas y se encuentran distribuidas en zonas desérticas aledañas a los municipios de Jiménez, Meoqui y Saucillo ( CONAFOR, 2019). Se empleó la ubicación proporcionada por CONAFOR para referenciar la imagen y luego ajustar la zona para establecer el punto de estudio como se muestra en la Figura 3



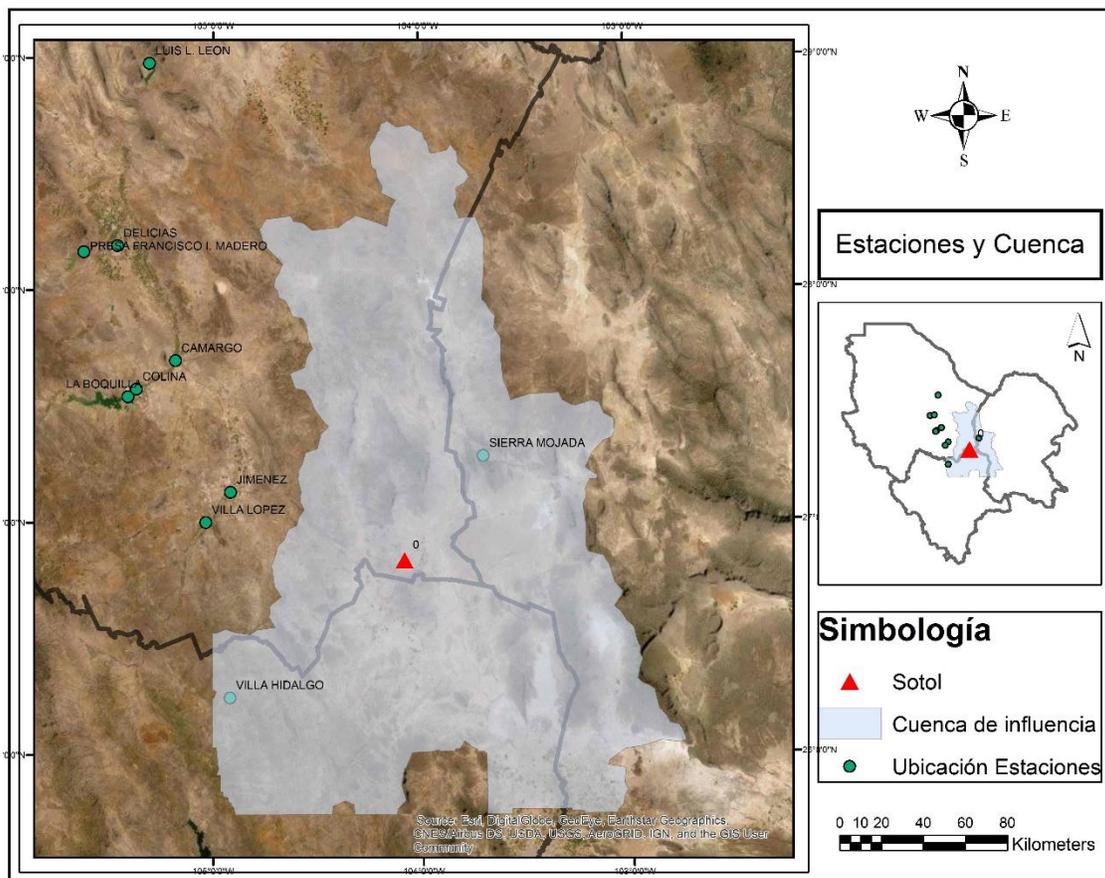
**Figura 3** Sitio de estudio (Elaboración propia a partir de datos de ( CONAFOR, 2019)).



## Cuenca de estudio y estaciones climatológicas cercanas

Una vez ubicada la zona de estudio, se realiza la localización de las estaciones climatológicas más cercanas y con mayor base de datos disponibles. Para el estudio se emplearon las siguientes: Presa Francisco I. Madero, Presa Luis L. León, Delicias, Camargo, Colina, Boquilla, Jiménez y Villa López, por parte del estado de Chihuahua, Villa Hidalgo, La Flor del Desierto y Laboratorio del Desierto del estado de Durango y la estación Sierra Mojada, del estado de Coahuila.

Por medio de las cartas topográficas con escala 1:50000, de la base de datos del INEGI y con ayuda del software ArcMap, se traza la cuenca de influencia de la zona de estudio indicando el resultado en la Figura 4.



**Figura 4 Estaciones cercanas y cuenca de influencia (Elaboración propia a partir de cartas topográficas del INEGI)**



Para identificar las estaciones, se buscan las que cuentan con los periodos de tiempo con menor número de datos faltantes y así obtener resultados con mayor confiabilidad. Las estaciones que cumplen con lo anterior son las indicadas en la Tabla 1, donde se describe el periodo de tiempo y el estatus de los valores de las mediciones obtenidas de la base de datos climatológica disponible hasta marzo del 2020 por medio de la Comisión Nacional del Agua. (CONAGUA, 2020).

Debido a que la planta de Sotol tiene un tiempo de maduración promedio de 15 años, se busca que los valores de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima sean los más actuales y que cubran el periodo de tiempo de maduración de la planta.

**Tabla 1 Estaciones Climatológicas**

| Estación                    | Elevación<br>msnm | Periodo de<br>tiempo | Precipitación | Temperatura<br>Max | Temperatura<br>Min | Evaporación                                |
|-----------------------------|-------------------|----------------------|---------------|--------------------|--------------------|--|
| LABORATORIO DEL<br>DESIERTO | 1160              | 1990-2018            | Completa      | Completa           | Completa           | Falta 06,07,09...18                        |
| LA FLOR DEL<br>DESIERTO     | 1150              | 1992-2017            | Completa      | Completa           | Completa           | Nulo                                       |
| VILLA HIDALGO               | 1700              | 1990-2018            | Completa      | Completa           | Completa           | Falta<br>(05/97)(02/18)(9,10,11,12<br>/18) |
| SIERRA MOJADA               | 1256              | 1990-2018            | Completa      | Completa           | Completa           | Nulo                                       |
| JIMENEZ                     | 1370              | 1990-2018            | Completa      | Completa           | Completa           | Completa                                   |
| CAMARGO                     | 1250              | 1990-2018            | Completa      | Completa           | Completa           | Completa                                   |

Los datos faltantes se estiman por medio del método de regresión lineal en donde se cuenta con dos componentes, “X” y “Y”. Empleando el valor de X como mayor que el valor de Y y basándose en la relación que existe entre ambas variables, se puede estimar el valor de una a partir de la otra (Estrada, 2008).

La ecuación (1) es la empleada para determinar dichos datos.

$$Y = mx + b \quad (1)$$

Donde:

$$m = \frac{S_{xy}}{S_x^2} \quad (1.1)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum X^2 - \frac{\sum X^2}{N}}{N}} \quad (1.2)$$

$$X_{media} = \frac{\sum X}{N} \quad (1.3)$$



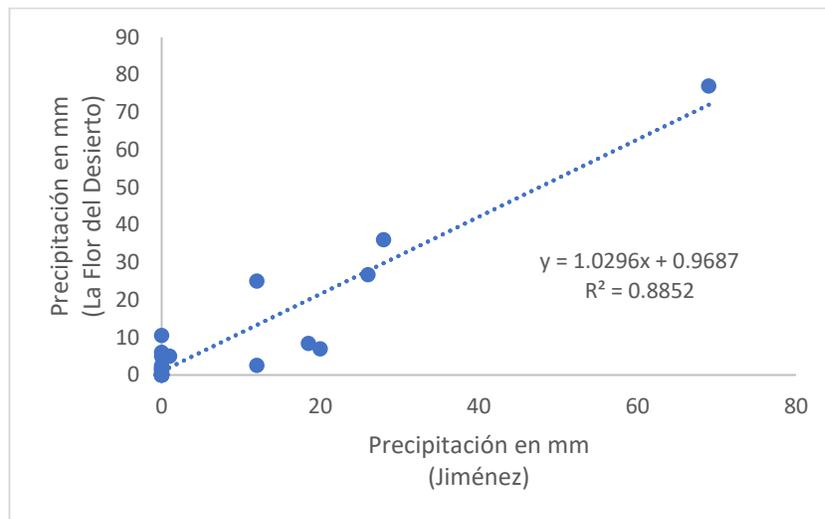
N: Número de parejas de valores (X, Y)

A su vez, se determina el coeficiente de correlación empleando la ecuación (2)

$$R = \left[ \frac{\frac{\sum XY}{N} - (X_{media} \cdot Y_{media})}{S_X S_Y} \right] \quad (2)$$

Se recomienda realizar el coeficiente de correlación con distintas estaciones climatológicas y seleccionar el que se encuentre entre los valores de R= 0.7 y 1.0 (Estrada, 2008).

Un ejemplo de lo realizado es lo indicado en la Gráfica 3, donde se puede observar un valor de correlación R= 0.88, indicando que es posible utilizar la ecuación (1) antes mencionada para la estimación del dato faltante. En la Tabla 2 se muestran los valores disponibles, así como el valor faltante. En la Tabla 3 los valores estimados con la metodología anterior. Cabe mencionar que se realizó la correlación para cada estación y se seleccionaron las de los valores más acercados a los recomendados. Los cálculos de cada valor estimado se encuentran dentro de la sección de anexos.



**Gráfica 3 Correlación Estaciones: La Flor del desierto/Jiménez**

**Tabla 2 Datos disponibles**

| <b>Marzo</b> |                      |                    |
|--------------|----------------------|--------------------|
|              | La Flor del desierto | Jiménez            |
| <b>Año</b>   | Precipitación (mm)   | Precipitación (mm) |
| 1992         | 0                    | 2                  |
| 1993         | 0                    | 0                  |
| 1994         | 0                    | 10.5               |
| 1995         | 0                    | 1.5                |
| 1996         | 0                    | 0                  |
| 1997         | 12                   | 25                 |
| 1998         | 0                    | 1                  |
| 1999         | 0                    | 0                  |
| 2000         | 0                    | 6                  |
| 2001         | 20                   | 7                  |
| 2002         | 0                    | 0                  |
| 2003         | 1                    | 5                  |
| 2004         | 28                   | 36.02              |
| 2005         | 0                    | 0.02               |
| 2006         | 0                    | 0                  |
| 2007         | 0                    | 1.51               |
| 2008         | <b>Nulo</b>          | 2.51               |
| 2009         | 0                    | 5.02               |
| 2010         | 0                    | 0                  |
| 2011         | 0                    | 0                  |
| 2012         | 0                    | 0.46               |
| 2013         | 0                    | 0                  |
| 2014         | 12                   | 2.52               |
| 2015         | 69                   | 77.02              |
| 2016         | 18.5                 | 8.4                |
| 2017         | 26                   | 26.7               |
| 2018         | 0                    | 0                  |

**Tabla 3 Valores estimados**

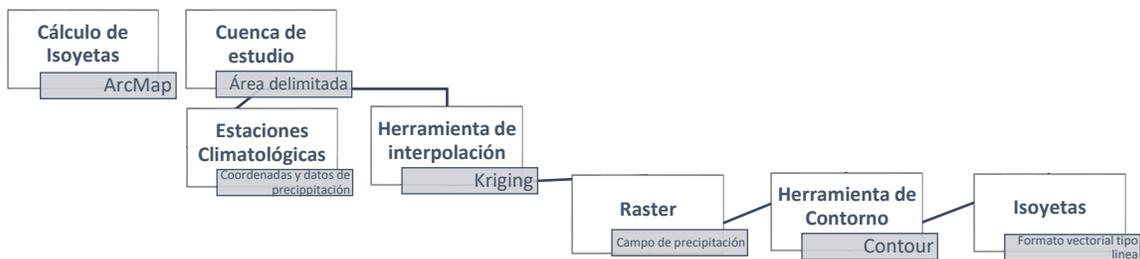
| <b>Marzo</b> |                      |                    |
|--------------|----------------------|--------------------|
|              | La Flor del desierto | Jiménez            |
| <b>Año</b>   | Precipitación (mm)   | Precipitación (mm) |
| 1992         | 0                    | 2                  |
| 1993         | 0                    | 0                  |
| 1994         | 0                    | 10.5               |
| 1995         | 0                    | 1.5                |
| 1996         | 0                    | 0                  |
| 1997         | 12                   | 25                 |
| 1998         | 0                    | 1                  |
| 1999         | 0                    | 0                  |
| 2000         | 0                    | 6                  |
| 2001         | 20                   | 7                  |
| 2002         | 0                    | 0                  |
| 2003         | 1                    | 5                  |
| 2004         | 28                   | 36.02              |
| 2005         | 0                    | 0.02               |
| 2006         | 0                    | 0                  |
| 2007         | 0                    | 1.51               |
| 2008         | <b>3.4</b>           | 2.51               |
| 2009         | 0                    | 5.02               |
| 2010         | 0                    | 0                  |
| 2011         | 0                    | 0                  |
| 2012         | 0                    | 0.46               |
| 2013         | 0                    | 0                  |
| 2014         | 12                   | 2.52               |
| 2015         | 69                   | 77.02              |
| 2016         | 18.5                 | 8.4                |
| 2017         | 26                   | 26.7               |
| 2018         | 0                    | 0                  |



## Medición de la precipitación en el área de estudio

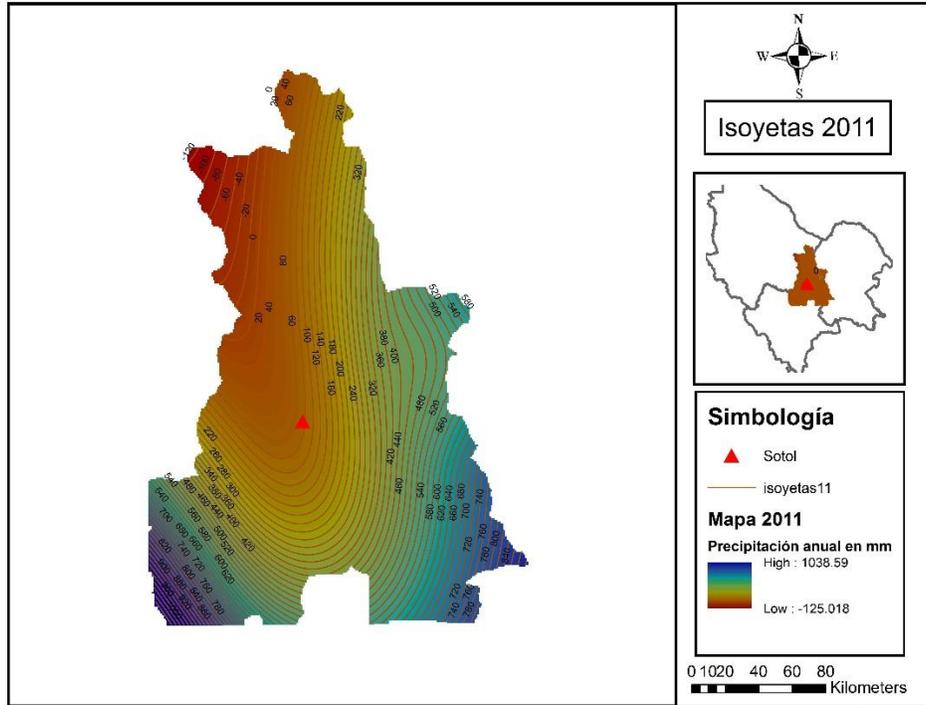
Para determinar la precipitación en la zona donde se encuentra la mayor concentración de plantas de Sotol, se utilizó el método de Isoyetas ya que se considera como uno de los métodos con mayor precisión para el cálculo de precipitación media (Estrada, 2008).

Empleando las coordenadas de las estaciones seleccionadas y con la delimitación previa de la cuenca, se utiliza el software ArcMap mediante lo descrito en el Diagrama 2.

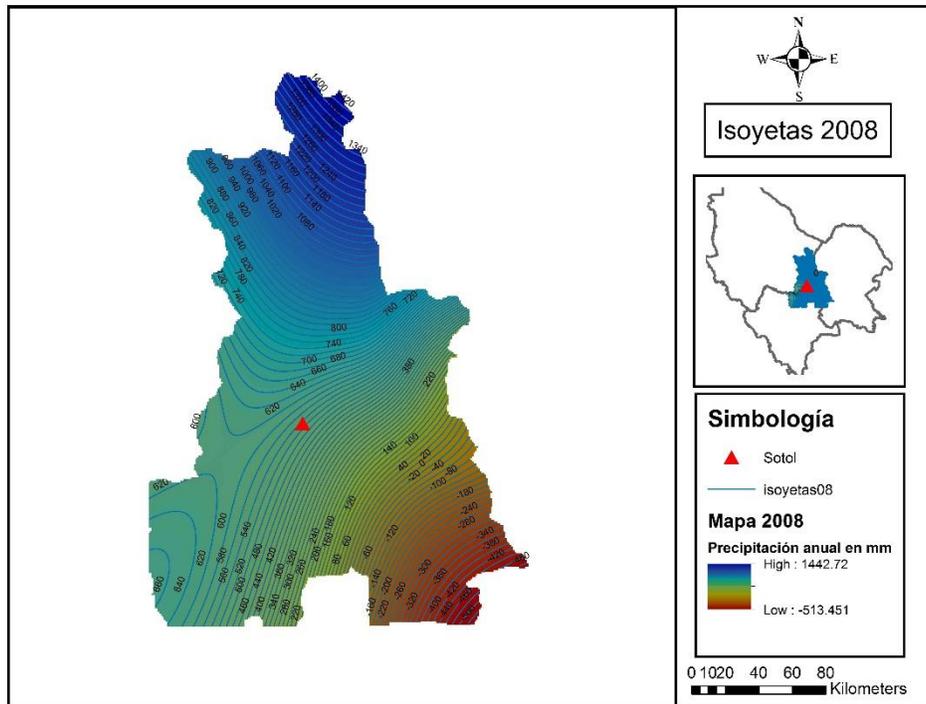


**Diagrama 2 Método Isoyetas ArcMap**

El análisis de Isoyetas permite visualizar la distribución de la lluvia y estimar la precipitación media (Estrada, 2008). La Figura 5 muestra los resultados obtenidos con los valores de precipitación del 2011 (95.54 mm), que son los menores dentro del periodo de maduración de la planta. En la Figura 6 se presentan los valores del 2008 (546.73 mm), que son los de mayores dentro del mismo periodo. La precipitación media anual de la zona de estudio es de 320 mm, los resultados de cada año del periodo se muestran en la Tabla 4.



**Figura 5 Año con menor precipitación**



**Figura 6 Año con mayor precipitación**



**Tabla 4 Resultados Isoyetas del periodo 2004-2018**

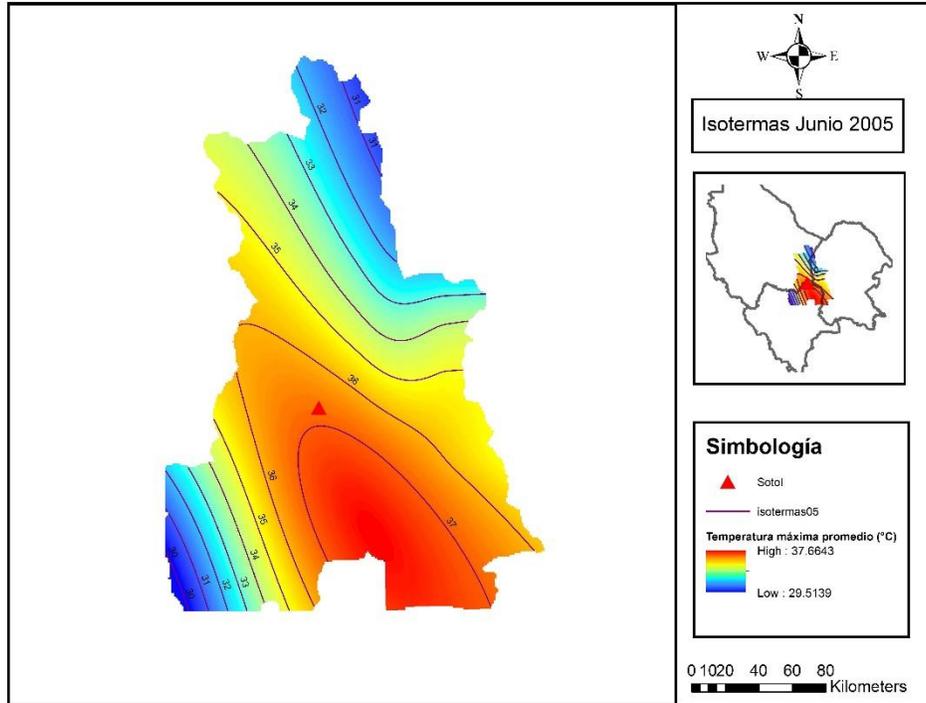
| <b>Año</b> | <b>Precipitación</b> |
|------------|----------------------|
| 2004       | 399.13               |
| 2005       | 320.00               |
| 2006       | 284.50               |
| 2007       | 192.42               |
| 2008       | 546.73               |
| 2009       | 315.54               |
| 2010       | 514.53               |
| 2011       | 95.54                |
| 2012       | 232.49               |
| 2013       | 242.95               |
| 2014       | 313.46               |
| 2015       | 334.62               |
| 2016       | 452.39               |
| 2017       | 321.94               |
| 2018       | 256.84               |

### **Medición de las temperaturas máxima y mínima**

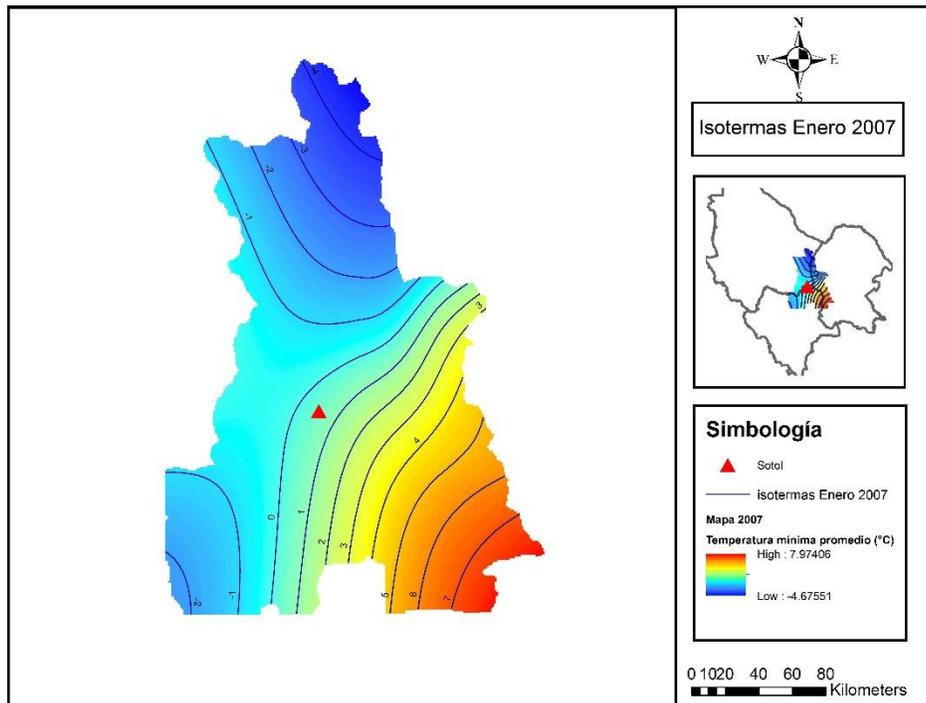
Para obtener las temperaturas máxima y mínima de la zona de estudio se emplean los datos de temperatura de las estaciones climatológicas descritas en el capítulo anterior. El método de cálculo es por medio de Isotermas, que son las líneas que unen las zonas que presentan las mismas temperaturas durante un periodo establecido de tiempo. Esto permite que en un área determinada se pueda estimar la temperatura media mensual o anual (Ucha, 2011).

La estimación de las temperaturas se obtiene empleando la metodología descrita en el capítulo: Medición de la precipitación en el área de estudio, indicado en el Diagrama 2.

Se realizó el análisis del año 2004 al 2018 de manera mensual para la obtención de valores más confiables. De igual manera que el cálculo de las Isoyetas de precipitación, se generan los planos con las temperaturas máximas (ejemplo del mes de junio) como se muestra en la Figura 7, así como los de las temperaturas mínimas (ejemplo del mes de Enero) indicado en la Figura 8.



**Figura 7 Mes con mayor temperatura**



**Figura 8 Mes con menor temperatura**



La temperatura máxima promedio es de 35.87°C y se presenta en los meses de Junio del periodo considerado para el estudio. La Tabla 5 muestra los valores donde se identificó la mayor temperatura dentro de los 15 años de estudio.

La temperatura mínima promedio es de 2.63°C y se presenta en los meses de enero como se puede observar en los datos de la Tabla 6.

**Tabla 5 Temperatura máxima**

| Año             | Temperatura  |
|-----------------|--------------|
| 2004            | 37.24        |
| 2005            | 37.66        |
| 2006            | 34.87        |
| 2007            | 36.00        |
| 2008            | 36.01        |
| 2009            | 34.31        |
| 2010            | 33.94        |
| 2011            | 35.31        |
| 2012            | 36.61        |
| 2013            | 37.61        |
| 2014            | 36.51        |
| 2015            | 36.60        |
| 2016            | 34.58        |
| 2017            | 35.79        |
| 2018            | 35.00        |
| <b>Promedio</b> | <b>35.87</b> |

**Tabla 6 Temperatura mínima**

| Año             | Temperatura |
|-----------------|-------------|
| 2004            | 3.07        |
| 2005            | 4.60        |
| 2006            | 1.57        |
| 2007            | 0.51        |
| 2008            | 1.23        |
| 2009            | 3.37        |
| 2010            | 3.27        |
| 2011            | 3.32        |
| 2012            | 2.04        |
| 2013            | 3.00        |
| 2014            | 1.11        |
| 2015            | 5.49        |
| 2016            | 0.68        |
| 2017            | 3.85        |
| 2018            | 2.32        |
| <b>Promedio</b> | <b>2.63</b> |

## Cálculo de Evapotranspiración (Método 1)

Para determinar la evapotranspiración se utiliza la Ecuación (3) de FAO Penman-Monteith que se basa en información meteorológica y es considerada como el método de mayor exactitud, ya que presenta resultados consistentes incluso al utilizar las variantes de climas secos o húmedos (FAO, 2006)

La ecuación consiste en:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (3)$$

Donde:

$ET_o$  = Evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>)

$R_n$  = Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)

$R_a$  = Radiación extraterrestre (mm día<sup>-1</sup>)

$G$  = Flujo del calor de suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)

$T$  = Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

$u_2$  = Velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

$e_s$  = Presión de vapor de saturación (kPa)

$e_a$  = Presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$  = Déficit de presión de vapor (kPa)

$\Delta$  = Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>)

$\gamma$  = Constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>)

Para determinar cada una de las variables anteriores, se emplea la siguiente serie de ecuaciones, tablas y cuadros:

- **Radiación extraterrestre**

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega)] \quad (3.1)$$

Donde:

$R_a$  = Radiación Extraterrestre (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)

$G_{sc}$  = Constante solar = 0.082 MJ m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>

$d_r$  = Distancia relativa inversa Tierra-Sol

$\omega_s$  = Ángulo de radiación a la puesta del sol (rad)

$\varphi$  = Latitud en (rad)

$\delta$  = Declinación solar (rad)



### Hemisferio Norte

| Latitud en grados | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
|-------------------|-------|---------|-------|-------|------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| 28                | 22.3  | 26.8    | 32.2  | 37.1  | 40   | 40.9  | 40.4  | 38.2   | 33.9       | 28.5    | 23.3      | 21        |
| 26                | 23.4  | 27.8    | 32.8  | 37.4  | 39.9 | 40.6  | 40.2  | 38.3   | 34.5       | 29.3    | 24.5      | 22.2      |

**Cuadro 1 Radiación extraterrestre diaria, para diferentes latitudes para el 15vo del mes**

- **Radiación solar derivada de las diferencias térmicas**

$$R_s = k_{RS} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad (3.2)$$

Donde:

$R_a$  = Radiación Extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

$T_{max}$  = Temperatura máxima del aire ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{min}$  = Temperatura mínima del aire ( $^{\circ}\text{C}$ )

$k_{RS}$  = Coeficiente de ajuste ( $0.16 \dots 0.19$ ) ( $^{\circ}\text{C}^{-0.5}$ )

- **Radiación solar en un día despejado**

$$R_{so} = (0.75 + 2 * 10^{-5} * z) R_a \quad (3.3)$$

Donde:

$z$  = Elevación de la estación sobre el nivel del mar (m)

- **Radiación neta solar o de onda corta**

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (3.4)$$

Donde:

$R_{ns}$  = Radiación neta solar o de onda corta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

$\alpha$  = Albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0.23 para el cultivo hipotético de referencia (adimensional)

$R_s$  = Radiación solar entrante ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

- **Radiación neta de onda larga**



$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{max,K^4} + T_{min,K^4}}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (3.5)$$

Donde:

$R_{nl}$  = Radiación neta de onda larga ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann [ $4.903 \cdot 10^{-9} \text{ MJK}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ]

$T_{max,K}$  = Temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas ( $K = \text{°C} + 273.16$ )

$T_{min,K}$  = Temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas ( $K = \text{°C} + 273.16$ )

$e_a$  = Presión de vapor real (kPa)

$\frac{R_s}{R_{so}}$  = Radiación relativa de onda corta (valores  $\leq 1.0$ )

$R_s$  = Radiación solar medida o calculada ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

$R_{so}$  = Radiación en un día despejado ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )

- **Radiación neta**

Siendo la diferencia entre radiación neta de onda corta y la radiación neta de onda larga.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (3.6)$$

- **Evaporación equivalente en mm día<sup>-1</sup>**

$$\text{Evaporación equivalente} = 0.408 * \text{Radiación} \quad (3.7)$$

Una vez identificada cada una de las ecuaciones, se realizan los cálculos de manera mensual dentro del periodo del 2004 al 2018 como se muestra en la Tabla 7, donde se utilizaron los valores de Enero del 2004 y en la cual se identifican los pasos realizados para la obtención de la evaporación equivalente. El valor máximo obtenido es el del mes de Junio del 2005, registrando  $7.25 \text{ mm día}^{-1}$ , el valor mínimo es en el mes de Diciembre del 2006, registrando  $2.08 \text{ mm día}^{-1}$ , cada uno de los cálculos se encuentran en la sección de anexos.



**Tabla 7 Evaporación equivalente del mes de enero del 2004**

| Paso | Método empleado          | Cálculos   | Resultados   | Unidades        |
|------|--------------------------|--|--------------|-----------------|
| 1    | Ecuación 3.1 o cuadro 1  | Cuadro 1   | 22.91        | Mj*m2*día-1     |
| 1.1  | Valor determinado        | KRs = 0.16   | 0.16         | Adimensional    |
| 1.2  | Diferencia               | Tmax-Tmin  | 20.41        | °C              |
| 2    | Ecuación 3.2             | Rs =   | 16.56        | Mj*m2*día-1     |
| 3    | Ecuación 3.3             | Rso=   | 17.73        | Mj*m2*día-1     |
| 4    | Ecuación 3.4             | Rns  | 12.75        | Mj*m2*día-1     |
| 5    | $\sigma$                 | constante de Stefan-Boltzmann [ 4,903 x 10 <sup>-9</sup> MJ K <sup>-4</sup> m <sup>-2</sup> día-1] | 0.00         | Mj*m2*día-1     |
| 5.1  | Tmax                     | 23.48  | 23.48        | °C              |
| 5.2  | $\sigma T_{max} K4$      | Donde: K = °C+273.16   | 37.96        | Mj*m2*día-1     |
| 5.3  | Tmin                     | 3.07   | 3.07         | °C              |
| 5.4  | $\sigma T_{min} K4$      | Donde:K = °C+273.16  | 28.55        | Mj*m2*día-1     |
| 5.5  | Parte de la ecuación 3.5 | ( $\sigma T_{max} K4 + \sigma T_{min} K4$ )/2  | 33.26        | Mj*m2*día-1     |
| 6    | ea                       | pestaña de humedad   | 0.66         | kPa             |
| 6.1  | Parte de la ecuación 3.5 | 0.34 -0.14V ea   | 0.23         |                 |
| 7    | Rs/Rso                   | Rs/Rso   | 0.93         |                 |
| 7.1  | Parte de la ecuación 3.5 | 1.35* (Rs/Rso)-0.35  | 0.91         |                 |
| 8    | Ecuación 3.5             | sustituyendo   | 6.85         |                 |
| 9    | Ecuación 3.6             | sustituyendo   | 5.90         |                 |
| 10   | Ecuación 3.7             | Evaporación equivalente = 0.408*Radiación  | <b>2.41</b>  | <b>mm*día-1</b> |
|      |                          |  | <b>74.58</b> | <b>mm*mes-1</b> |

## Cálculo de Evapotranspiración (Método 2)

Como segundo método para el cálculo de la evapotranspiración se utiliza la Ecuación (4) planteada por Hargreaves, la cual es empleada cuando no se cuenta con datos meteorológicos confiables (FAO, 2006)

$$ET_o = 0.0023(T_{media} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a \quad (4)$$

Los resultados del mes de Enero del 2004 indican un valor de 7.40 mm día<sup>-1</sup> como se puede observar en la Tabla 8. Al realizar la comparativa con ambos métodos, se presenta variación de más de 5 mm día<sup>-1</sup> por lo que se recomienda la aplicación de un tercer método para realizar un análisis más detallado y poder identificar si los valores son confiables.



**Tabla 8 Evapotranspiración mes de enero del 2004 (Ecuación alternativa)**

|              |        |
|--------------|--------|
| Eto mm*día-1 | 7.40   |
| Eto mm*mes-1 | 229.27 |
| T media      | 13.28  |
| Tmax         | 23.48  |
| Tmin         | 3.07   |
| Ra           | 22.90  |
| Gsc          | 0.08   |
| Dr           | 1.03   |
| Ωs           | 1.37   |
| Φ            | 0.47   |
| Δ            | -0.37  |
| J            | 15.00  |

### Cálculo de Evapotranspiración mediante software CROPWAT (Método 3)

El uso del software COPWAT permite determinar la Evapotranspiración empleando las temperaturas máximas y mínimas, así como la Latitud, Longitud y Altitud de la zona de estudio. El principio que utiliza el software es el de Penman-Monteith. La Figura 9 muestra los valores obtenidos usando las temperaturas máximas y mínimas del año 2004, generando resultados con variación de 0.5 mm día<sup>-1</sup> con respecto al primer método descrito anteriormente.

| Mes        | Temp Min<br>°C | Temp Max<br>°C | Humedad<br>% | Viento<br>km/día | Insolación<br>horas | Rad<br>MJ/m²/día | ETo<br>mm/día |
|------------|----------------|----------------|--------------|------------------|---------------------|------------------|---------------|
| Enero      | 3.1            | 23.5           | 63           | 173              | 10.7                | 17.6             | 2.97          |
| Febrero    | 3.0            | 25.6           | 62           | 173              | 12.0                | 21.6             | 3.79          |
| Marzo      | 8.0            | 29.9           | 63           | 173              | 12.5                | 25.4             | 5.00          |
| Abril      | 8.9            | 30.9           | 63           | 173              | 13.4                | 29.1             | 5.85          |
| Mayo       | 13.8           | 35.0           | 64           | 173              | 13.9                | 30.7             | 6.77          |
| Junio      | 17.3           | 37.2           | 65           | 173              | 13.9                | 30.8             | 7.27          |
| Julio      | 17.6           | 36.3           | 67           | 173              | 13.3                | 29.8             | 7.01          |
| Agosto     | 16.5           | 35.0           | 67           | 173              | 12.8                | 29.3             | 6.56          |
| Septiembre | 13.6           | 30.4           | 68           | 173              | 11.2                | 24.2             | 5.17          |
| Octubre    | 11.2           | 27.0           | 69           | 173              | 10.0                | 19.8             | 4.00          |
| Noviembre  | 3.0            | 23.4           | 63           | 173              | 11.3                | 18.7             | 3.27          |
| Diciembre  | 0.8            | 21.6           | 63           | 173              | 10.9                | 16.9             | 2.71          |
| Promedio   | 9.7            | 29.6           | 65           | 173              | 12.2                | 24.4             | 5.03          |

**Figura 9 Evapotranspiración del año 2004 mediante software CROPWAT**



## Comparativa de resultados obtenidos mediante los tres métodos

La Tabla 9 muestra los resultados de cada uno de los métodos empleados para determinar la evapotranspiración. Existe similitud entre los cálculos manuales de la ecuación de Penman-Monteith y los cálculos arrojados por el software CROPWAT

**Tabla 9 Comparativa de resultados de evapotranspiración del año 2004**

| Mes        | ET <sub>o</sub> mm/día Calculado | ET <sub>o</sub> mm/día CROPWAT | ET <sub>o</sub> mm/día Ecuación alternativa |
|------------|----------------------------------|--------------------------------|---|
| Enero      | 2,41                             | 2,97                           | 7,40  |
| Febrero    | 3,49                             | 3,79                           | 9,60  |
| Marzo      | 4,82                             | 5,00                           | 12,93                                       |
| Abril      | 5,96                             | 5,85                           | 15,21                                       |
| Mayo       | 6,66                             | 6,77                           | 17,85                                       |
| Junio      | 6,87                             | 7,27                           | 18,88                                       |
| Julio      | 6,59                             | 7,01                           | 17,91                                       |
| Agosto     | 6,06                             | 6,56                           | 16,43                                       |
| Septiembre | 4,87                             | 5,17                           | 12,76                                       |
| Octubre    | 3,64                             | 4,00                           | 9,69  |
| Noviembre  | 2,61                             | 3,27                           | 7,66  |
| Diciembre  | 2,09                             | 2,71                           | 6,56  |

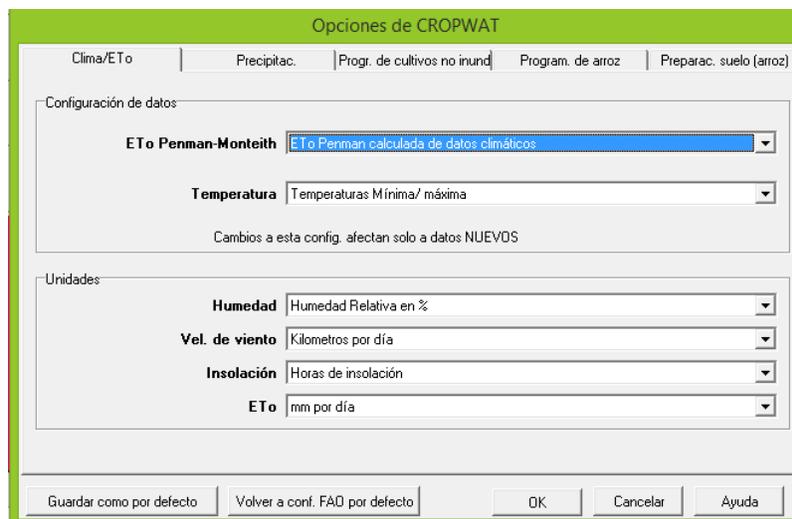
## Uso de software CROPWAT 8.0 para determinar la Huella Hídrica Verde

Se utiliza el software CROPWAT 8.0 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), que sirve para determinar las necesidades hídricas de cada tipo de cultivo, mediante datos climatológicos, características del cultivo y tipo de suelo. El Diagrama 4 muestra la metodología realizada con el software.



**Diagrama 3 Metodología CROPWAT 8.0 para  $HH_{Verde}$**

Para seleccionar el método de cálculo se utiliza la sección de configuración/opciones en donde se selecciona la de  $ET_0$  de Penman calculada de datos climáticos y la opción de temperaturas máxima y mínima como valores de entrada como se muestra en la Figura 10.



**Figura 10 Selección método para evapotranspiración de referencia**

### **Evapotranspiración de referencia $ET_0$**

Los datos de temperatura máxima y temperatura mínima son los obtenidos en la sección del mismo nombre. Se introducen en la tabla de datos de entrada junto con la latitud, longitud y altitud del punto de estudio, tal y como se puede observar en la Figura 11. Los valores de evapotranspiración de referencia son calculados automáticamente y presentan los valores máximos en el mes de junio, así como sus valores mínimos en el mes de enero.



ETo Penman-Monteith Mensual - C:\ProgramData\CROPWAT\data\climate...

País: México Estación: Sotol

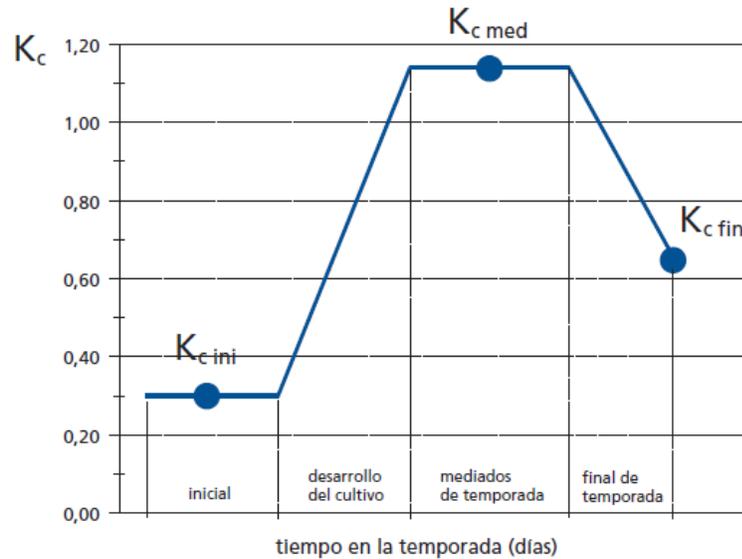
Altitud: 1200 m. Latitud: 26.89 °N Longitud: 103.70 °E

| Mes        | Temp Min<br>°C | Temp Max<br>°C | Humedad<br>% | Viento<br>km/día | Insolación<br>horas | Rad<br>MJ/m <sup>2</sup> /día | ETo<br>mm/día |
|------------|----------------|----------------|--------------|------------------|---------------------|-------------------------------|---------------|
| Enero      | 4.6            | 23.6           | 65           | 173              | 10.2                | 17.0                          | 2.92          |
| Febrero    | 5.4            | 26.8           | 63           | 173              | 11.6                | 21.1                          | 3.92          |
| Marzo      | 3.8            | 28.7           | 60           | 173              | 13.7                | 27.1                          | 5.08          |
| Abril      | 9.2            | 32.5           | 62           | 173              | 14.0                | 29.9                          | 6.16          |
| Mayo       | 12.7           | 34.7           | 63           | 173              | 14.3                | 31.4                          | 6.89          |
| Junio      | 11.3           | 37.7           | 60           | 173              | 16.9                | 35.4                          | 8.02          |
| Julio      | 16.1           | 36.7           | 65           | 173              | 14.3                | 31.3                          | 7.27          |
| Agosto     | 15.0           | 35.0           | 65           | 173              | 13.5                | 29.4                          | 6.66          |
| Septiembre | 13.0           | 35.2           | 63           | 173              | 13.8                | 27.9                          | 6.29          |
| Octubre    | 10.1           | 32.0           | 63           | 173              | 12.8                | 23.4                          | 5.03          |
| Noviembre  | 2.4            | 28.8           | 59           | 173              | 13.6                | 21.3                          | 4.08          |
| Diciembre  | 2.0            | 24.7           | 61           | 173              | 11.7                | 17.7                          | 3.08          |
| Promedio   | 8.8            | 31.4           | 62           | 173              | 13.4                | 26.1                          | 5.45          |

Figura 11 Resultados evapotranspiración de referencia

### Evapotranspiración del cultivo ET<sub>c</sub>

Los valores del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) y el del coeficiente de estrés hídrico ( $K_s$ ), son necesarios para determinar la evapotranspiración del cultivo. La Figura 12 muestra la curva del coeficiente del cultivo que requiere de tres valores para su elaboración, primero se divide en las cuatro etapas de crecimiento de la planta (Inicial, desarrollo del cultivo, mediados de temporada y final de temporada) se determina la duración de las etapas identificando los valores de  $K_{cini}$ ,  $K_{cmed}$  y  $K_{cfin}$ . Se ajustan los valores según los factores climáticos donde los de ( $K_{cmed}$ ) no presentan tanta variación como los de ( $K_{cini}$ ), ya que en la etapa media del cultivo la planta cuenta con mayor cobertura reduciendo la evaporación de la superficie del suelo. (FAO, 2006)



**Figura 12 Curva de coeficiente de cultivo**

### **Selección de valores del coeficiente de cultivo ( $K_c$ )**

Debido a que la planta de Sotol es poco común y no se cuenta con registros dentro de la base de datos de la FAO, se recomienda buscar un cultivo de características similares o bien, de la misma familia de plantas. Se tiene que la planta Sotol pertenece a la familia de las Asparagaceae, que comparte características con la Cebolla perteneciente a la familia de las Amaryllidaceae, entrando como dentro del orden de estas. Los valores de  $K_c$  establecidos para la cebolla son de  $K_{c\text{ ini}} = 0.7$ ,  $K_{c\text{ med}} = 1.05$  y  $K_{c\text{ fin}} = 0.80$ . Por lo tanto, se busca dentro de la base de datos del software CROPWAT 8.0 la opción de vegetales pequeños que es la que concuerda con los antes mencionados. La Figura 13 muestra la entrada de datos en la sección del cultivo. La Figura 14 señala los resultados obtenidos dentro de la sección de programación de riego del cultivo donde se tiene una evapotranspiración ajustada  $ET_c$  de 650.6 mm, una precipitación efectiva de 23.9 mm y un requerimiento de riego de 626.8 mm

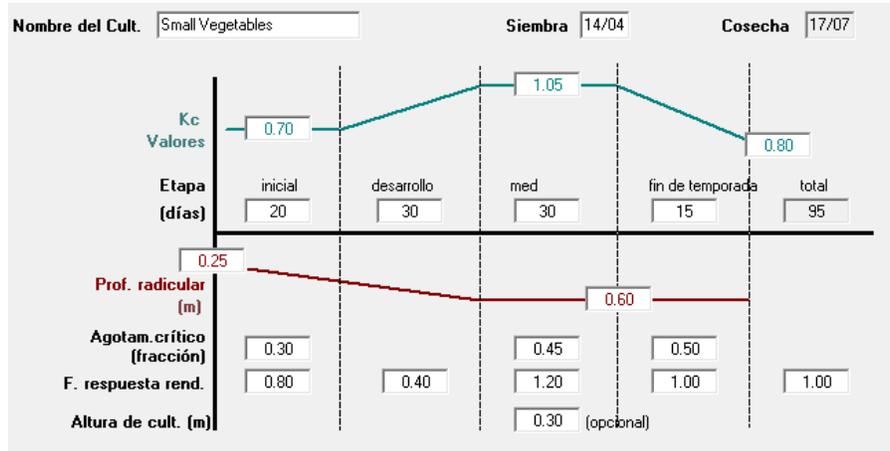


Figura 13 Valores Kc seleccionados

| Totales                              |       |    |                         |       |    |
|--------------------------------------|-------|----|-------------------------|-------|----|
| Lámina bruta total                   | 804.2 | mm | Precipitación total     | 34.9  | mm |
| Lámina neta total                    | 563.0 | mm | Precipitación Efectiva  | 23.9  | mm |
| Pérdida total de riego               | 0.0   | mm | Pérdida tot.prec.       | 11.0  | mm |
| Uso real de agua del cultivo         | 650.6 | mm | Def. de hum. en cosecha | 63.8  | mm |
| Uso pot. de agua del cultivo         | 650.6 | mm | Requer. reales de riego | 626.8 | mm |
| Efic. de programación de riego       | 100.0 | %  | Efic. de precipitación  | 68.4  | %  |
| Deficiencia de programación de riego | 0.0   | %  |                         |       |    |

ET<sub>ver</sub>

ET<sub>C</sub>

ET<sub>azul</sub>

Figura 14 Resultados CROPWAT 8.0

## Huella Hídrica Verde

Las ecuaciones (5) y (6) son planteadas por Hoekstra en el manual de evaluación de la Huella Hídrica, donde la (6) es variante de la (5) permitiendo emplear la precipitación efectiva obtenida con los coeficientes del cultivo “Kc” descritos en la sección anterior.

$$HH_{verde,proc} = \text{Evaporación de agua verde} + \text{Incorporación de agua verde} \quad \left[ \frac{Vol}{t} \right] \quad (5)$$

$$HH_{verde,proc} = \frac{\text{Uso de agua del cultivo } CWU \left( \frac{m^3}{ha} \right)}{\text{Rendimiento del cultivo } Y \left( \frac{t}{ha} \right)} \quad (6)$$

Para los cálculos de Huella Hídrica verde, se contemplaron los valores de lluvia máximos (399mm de precipitación) presentados en la Figura 15 y la Tabla 10.



Los mínimos ( 99 mm de precipitación) presentados en la Figura 16 y la Tabla 11. Así como los valores promedios que se registraron durante el periodo de maduración de la planta (320 mm de precipitación) presentados en la Figura 17 y la Tabla 12.

| Totales                              |       |    |                         |       |    |
|--------------------------------------|-------|----|-------------------------|-------|----|
| Lámina bruta total                   | 611.1 | mm | Precipitación total     | 210.1 | mm |
| Lámina neta total                    | 427.8 | mm | Precipitación Efectiva  | 39.1  | mm |
| Pérdida total de riego               | 0.0   | mm | Pérdida tot.prec.       | 170.5 | mm |
| Uso real de agua del cultivo         | 475.3 | mm | Def. de hum. en cosecha | 8.4   | mm |
| Uso pot. de agua del cultivo         | 475.3 | mm | Requer. reales de riego | 436.2 | mm |
| Efic. de programación de riego       | 100.0 | %  | Efic. de precipitación  | 18.6  | %  |
| Deficiencia de programación de riego | 0.0   | %  |                         |       |    |

ET<sub>ver</sub>

**Figura 15 Precipitación efectiva obtenida con los valores máximos de precipitación**

**Tabla 10 Huella Hídrica Verde con valores máximos de precipitación**

| ET verde<br>(mm/periodo) | CWU verde<br>(m <sup>3</sup> /ha) | Y*<br>(t/ha) | HH verde<br>(m3 /t) |
|--------------------------|-----------------------------------|--------------|---------------------|
| 39.1                     | 391                               | 10.224       | 38.24               |

| Totales                              |       |    |                         |       |    |
|--------------------------------------|-------|----|-------------------------|-------|----|
| Lámina bruta total                   | 904.3 | mm | Precipitación total     | 20.4  | mm |
| Lámina neta total                    | 633.0 | mm | Precipitación Efectiva  | 17.6  | mm |
| Pérdida total de riego               | 0.0   | mm | Pérdida tot.prec.       | 2.8   | mm |
| Uso real de agua del cultivo         | 650.6 | mm | Def. de hum. en cosecha | 0.0   | mm |
| Uso pot. de agua del cultivo         | 650.6 | mm | Requer. reales de riego | 633.0 | mm |
| Efic. de programación de riego       | 100.0 | %  | Efic. de precipitación  | 86.4  | %  |
| Deficiencia de programación de riego | 0.0   | %  |                         |       |    |

ET<sub>ver</sub>

**Figura 16 Precipitación efectiva obtenida con los valores mínimos de precipitación**

**Tabla 11 Huella Hídrica Verde con valores mínimos de precipitación**

| ET verde<br>(mm/periodo) | CWU verde<br>(m <sup>3</sup> /ha) | Y*<br>(t/ha) | HH verde<br>(m3 /t) |
|--------------------------|-----------------------------------|--------------|---------------------|
| 17.6                     | 176                               | 10.224       | 17.21               |



| Totales                              |       |    |                         |       |    |
|--------------------------------------|-------|----|-------------------------|-------|----|
| Lámina bruta total                   | 804.2 | mm | Precipitación total     | 34.0  | mm |
| Lámina neta total                    | 563.0 | mm | Precipitación Efectiva  | 23.9  | mm |
| Pérdida total de riego               | 0.0   | mm | Pérdida tot.prec.       | 11.0  | mm |
| Uso real de agua del cultivo         | 650.6 | mm | Def. de hum. en cosecha | 63.8  | mm |
| Uso pot. de agua del cultivo         | 650.6 | mm | Requer. reales de riego | 626.8 | mm |
| Efic. de programación de riego       | 100.0 | %  | Efic. de precipitación  | 68.4  | %  |
| Deficiencia de programación de riego | 0.0   | %  |                         |       |    |

ET<sub>ver</sub>

**Figura 17 Precipitación efectiva obtenida con los valores promedios de precipitación**

**Tabla 12 Huella Hídrica Verde con valores promedios de precipitación**

| ET <sub>verde</sub><br>(mm/periodo) | CWU <sub>verde</sub><br>(m <sup>3</sup> /ha) | Y*<br>(t/ha) | HH <sub>verde</sub><br>(m <sup>3</sup> /t) |
|-------------------------------------|--|--------------|--|
| 23.9                                | 239  | 10.224       | 23.37                                      |

Datos proporcionados por CONAFOR indican que el peso promedio por planta es de 12 kg, así como una densidad de 852 plantas / hectárea ( CONAFOR, 2019).

Para obtener la cantidad de botellas de litro de sotol/ tonelada de planta, se utilizan los datos anteriores como se muestra en la Ecuación (7). Se tienen valores proporcionados por los productores locales que indican que el promedio del rendimiento de una planta con un peso aproximado de los 12 a 15 kg, genera un litro de sotol (Ruelas, 2020).

$$\text{Botellas de litro de Sotol } \times \text{ tonelada} = \frac{1000 \text{ kg}}{12 \text{ kg}} = 83.33 \text{ kg} \quad (7)$$

Por lo tanto, se establece que al contar con 83.33 plantas de 12 kg en una tonelada, se puede determinar como este el número de botellas de litro de sotol, que se pueden producir con una tonelada de plantas.

Para obtener la cantidad de agua en m<sup>3</sup> que se requieren para obtener un litro de la bebida Sotol, se emplean los resultados de Huella Hídrica Verde señalados en la Tabla 12 utilizando la Ecuación (8)

$$m^3 \text{ de agua } \times \text{ litro de Sotol } \times \text{ periodo} = \frac{23.37 \text{ m}^3 \times \text{tonelada}}{83.33 \text{ botellas de litro de Sotol} \times \text{tonelada}} = 0.2805 \quad (8)$$



Los resultados obtenidos con el software CROPWAT 8.0 indican que el periodo calculado para la planta de Sotol es de 1 año, puesto que el tiempo de maduración promedio de la planta es de 15 años, se realiza un ajuste y se presentan los resultados finales de Huella Hídrica Verde como se muestra en la Tabla 13.

**Tabla 13 Huella Hídrica verde**

|                |   |
|----------------|---|
| <b>83.33</b>   | Botellas de Litro de sotol /tonelada          |
| <b>0.28</b>    | m <sup>3</sup> de agua/litro de sotol/periodo |
| <b>4.20</b>    | m <sup>3</sup> de agua/litro de sotol         |
| <b>4207.74</b> | Litros de agua/litro de sotol                 |

### Huella Hídrica Azul

La Huella Hídrica Azul se refiere al agua que ha sido incorporada al producto, puesto que la planta crece de manera silvestre, no se le incorpora agua de riego. El agua que se considera es la agregada dentro del proceso de elaboración de la bebida. Se identifican cada una de las etapas del proceso como se muestra en el Diagrama 5.



**Diagrama 4 Proceso de elaboración de bebida (Sotol)**

### Medición de agua incorporada en el proceso de elaboración de la bebida

#### Primera etapa (Jima)

Dentro de la etapa de la Jima no se utiliza agua.



## Segunda etapa (Cocción)

La etapa donde se inicia con la incorporación de agua es la cocción. Dicha etapa se realiza en los hornos de piso o de hoyo, en los cuales se introducen las cabezas de las plantas (piñas), se sella el horno con hojas de palma y arena, dejando un conducto de respiración por el cual se agrega el agua. La cantidad es de 40 litros en la mañana y 40 litros en la tarde durante 3 días. Las mediciones de volúmenes se tomaron mediante envases de plástico con capacidad de 20 litros (Bidón o Porrón) en un periodo de 2 semanas, donde se obtienen 240 litros en cada una de ellas.

## Tercera etapa (Fermentación)

Para realizar la fermentación se introducen las cabezas de la planta ya trituradas dentro de tanques de madera con una capacidad de 500 litros. La cantidad de agua que se agrega a cada tanque es de 200 litros. Las mediciones de volumen se realizaron con ayuda de envase de plástico de 50 litros (Bidón o Porrón).

## Cuarta etapa ( Destilación)

La destilación consiste en calentar el producto fermentado dentro de un alambique de cobre, el cual se encuentra conectado a un tubo con forma de espiral (Serpentín) que permanece sumergido en agua en un contenedor de concreto con una capacidad de 7000 litros.

## Quinta etapa (Sotol)

La última etapa consiste en la recolección de la bebida, teniendo una producción promedio de 714 botellas de litro de Sotol por ciclo. Los ciclos se establecen considerando la capacidad de la fábrica y realizando promedios con fabricas similares. La Tabla 14 muestra la división de cada ciclo y la cantidad de agua en cada una de sus divisiones.

**Tabla 14 Ciclo de elaboración de la bebida (Sotol)**

| Etapa        | Cantidad  | Agua utilizada |
|--------------|-----------|----------------|
| Jima         | 1         | 0              |
| Cocción      | 2 hornos  | 480 litros     |
| Fermentación | 6 Tanques | 1200 litros    |



|                    |              |             |
|--------------------|--------------|-------------|
| <b>Destilación</b> | 2 Alambiques | 7000 litros |
| <b>Sotol</b>       | 1            | 0           |
| <b>Total</b>       |              | 8680 litros |

En el proceso de la elaboración de la bebida Sotol, la Huella Hídrica del producto  $p$  (Volumen/masa) es igual a la suma de la cantidad de agua utilizada en cada una de las actividades del proceso, dividido entre la cantidad de producto final  $P$  (Hoekstra et al, 2010). Ver Ecuación (9)

$$WF_{prod}[p] = \frac{\sum_{s=1}^k WF_{proc}[s]}{P[p]} \quad (9)$$

Donde:

$WF_{proc}[s]$ : Huella Hídrica de las actividades (Volumen/tiempo)

$P[p]$ : La cantidad de producto  $p$  (Masa/tiempo)

$WF_{prod}[p] = (8680 \text{ litros}) / (714 \text{ litros}) = 12.15 \text{ Litros de H}_2\text{O} / \text{litro de Sotol}$

### Huella Hídrica gris

Dentro de los requisitos de cálculo de la Huella Hídrica gris se encuentra identificar las normas de calidad de agua de la zona. La norma vigente es la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Los límites máximos permisibles para contaminantes básicos establecidos en la norma son: Demanda bioquímica de oxígeno, Fosforo Total, Sólidos suspendidos totales, Sólidos sedimentables, Grasas y aceites y Nitrógeno Total.

A su vez, se tienen los límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros, considerando: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Cromo Total (Cr), Mercurio (Hg), Plomo (Pb), Zinc (Zn) y Níquel (Ni).

Las pruebas para determinar los parámetros anteriores se realizaron a partir de muestras simples, tomadas del sistema de almacenamiento de vinazas de la fábrica. Ver la Figura 18.



**Figura 18 Sistema contenedor de Vinazas**

En el laboratorio de Sanitaria de la Facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua se realizaron las pruebas de los contaminantes básicos y en el laboratorio de calidad de agua de la Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua (JCAS) las pruebas a los contaminantes de metales pesados y cianuros. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 15, donde se realiza la identificación de valores necesarios para el cálculo de Huella Hídrica Gris descritos en la Ecuación 10

$$HH_{Gris} = \frac{L \left( \frac{\text{masa}}{\text{tiempo}} \right)}{C_{max} \left( \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \right) - C_{nat} \left( \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \right)} \quad (10)$$

Donde:

$L$  = Carga contaminante

$C_{max}$  = Concentración máxima aceptable

$C_{nat}$  = Concentración natural en el cuerpo de agua receptor

(Hoekstra et al., 2011)

Cuando las concentraciones naturales no se conocen con precisión pero se estiman ser bajas, por simplicidad se puede suponer  $C_{nat} = 0$



**Tabla 15 Resultados análisis de calidad de agua**

| Parámetro                     | Carga contaminante (mg/l) | Límite máximo permisible NOM-001-semarnat-1996 | Carga Natural |
|-------------------------------|---------------------------|--|---------------|
| Arsénico (As)                 | 0.0013                    | 0.2  | 0.05          |
| Cadmio (Cd)                   | 0.0003                    | 0.2  | 0             |
| Cobre (Cu)                    | 0.3449                    | 6  | 0             |
| Cromo Total (Cr)              | 0.0588                    | 1  | 0             |
| Mercurio (Hg)                 | 0.0006                    | 0.01   | 0             |
| Plomo (Pb)                    | 0.0229                    | 0.04   | 0             |
| Zinc (Zn)                     | 0.1957                    | 20   | 0             |
| Níquel (Ni)                   | 0.0005                    | 4  | 0             |
| Demanda bioquímica de oxígeno | <b>1170.22</b>            | <b>150</b>                                     | 0             |
| Fosforo Total                 | 2.34                      | 30   | 0             |
| Sólidos suspendidos totales   | <b>189.33</b>             | <b>125</b>                                     | 0             |
| Sólidos sedimentables         | 1                         | 2  | 0             |
| Grasas y aceites              | 4                         | 25   | 0             |
| Nitrógeno Total               | 33.6                      | 60   | 0             |

### **Carga natural (Cnat)**

El agua que se utiliza en el proceso proviene del sistema de abastecimiento de la ciudad de Aldama Chihuahua, por lo que los registros de calidad de agua utilizados son los indicados en el Plan Estatal Hídrico 2040 de Chihuahua. Donde se tiene que para la ciudad de Aldama la calidad del agua es de buena a excelente, con la excepción del parámetro de Arsénico (As), que registra valores de 0.05 a 0.09.

### **Límites máximos permisibles**

Los parámetros que superan los límites máximos permisibles son: La Demanda bioquímica de oxígeno con 1,170.22 mg/l contra los 150 mg/l permisibles y los Sólidos suspendidos totales con 189.33 mg/l contra los 125 mg/l permisibles.

### **Cálculos Huella Hídrica Gris**

Se cuenta con un registro personal de 1200 litros en promedio que se vacían en el sistema de almacenamiento de las Vinazas en el transcurso de una semana de producción. Los resultados de los análisis realizados por los laboratorios se multiplican por dicha cantidad para determinar la carga contaminante en



(masa/tiempo) . Los valores se emplean en la Ecuación (10) y los resultados se muestran en la Tabla 16.

**Tabla 16 Cálculos Huella Hídrica Gris**

| Carga contaminante (mg/semana) | Carga Máxima | Carga Natural | $HH_{gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}}$ |
|--------------------------------|--------------|---------------|---|
| 1.56                           | 0.2          | 0.05          | 10.4                                      |
| 0.36                           | 0.2          | 0             | 1.8                                       |
| 413.88                         | 6            | 0             | 68.98                                     |
| 70.56                          | 1            | 0             | 70.56                                     |
| 0.72                           | 0.01         | 0             | 72  |
| 27.48                          | 0.04         | 0             | 687                                       |
| 234.84                         | 20           | 0             | 11.742                                    |
| 0.6                            | 4            | 0             | 0.15                                      |
| 1404264                        | 150          | 0             | 9361.76                                   |
| 2808                           | 30           | 0             | 93.6                                      |
| 227196                         | 125          | 0             | 1817.568                                  |
| 1200                           | 2            | 0             | 600                                       |
| 4800                           | 25           | 0             | 192                                       |
| 40320                          | 60           | 0             | 672                                       |
| <b>Litros/semana</b>           |              |               | <b>13659.56</b>                           |

Al dividir los litros/ semana obtenidos en la Tabla 16 entre la producción promedio en una semana, que es de 714 botellas de Sotol, se obtienen 19.13 litros de agua por cada botella de litro de Sotol.

## Resultados

Enseguida se presentan los resultados de la evaluación de la Huella Hídrica de la producción de Sotol, a partir de datos obtenidos directamente de fábricas locales, bases de datos climatológicos, mediciones directas y análisis de laboratorios. Se describe cada uno de los valores obtenidos de cada tipo de Huella Hídrica, identificando las variables con mayor significancia dentro de los cálculos para su análisis individual como en conjunto.



## Huella Hídrica verde

Los datos climatológicos son primordiales para la evaluación de precipitación de la zona donde se obtiene la mayor parte de las plantas de Sotol. Permiten establecer los valores máximos, mínimos y promedios de precipitación durante el periodo de maduración de la planta, mostrados en la Tabla 17.

**Tabla 17 Valores de precipitación**

| Año  | Precipitación (mm) | Valor    |
|------|--------------------|----------|
| 2008 | 546.73             | Máxima   |
| 2011 | 95.54              | Mínima   |
|      | 320                | Promedio |

Las temperaturas máximas y mínimas se consideran de gran importancia ya que son indispensables para determinar las pérdidas de agua en forma de evapotranspiración. Los métodos de Penman-Monteith, Hargreaves y al utilizar el software CROPWAT 8.0 presentan como requisito las temperaturas señaladas. La Tabla 18 muestra los valores de temperaturas máximas de todo el periodo de maduración de la planta, así de igual manera la Tabla 19 indica las temperaturas mínimas.

**Tabla 18 Temperaturas Máximas**

| Año             | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo  | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
|-----------------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| 2004            | 23.4  | 25.55   | 29.87 | 30.8  | 35.00 | 37.24 | 36.3  | 35.00  | 30.38      | 27.00   | 23.41     | 21.55     |
| 2005            | 23.6  | 26.77   | 28.70 | 32.4  | 34.69 | 37.66 | 36.7  | 35.00  | 35.20      | 32.00   | 28.80     | 24.73     |
| 2006            | 24.4  | 26.42   | 30.26 | 33.6  | 36.00 | 34.87 | 37.4  | 35.57  | 33.00      | 30.00   | 27.73     | 23.33     |
| 2007            | 18.7  | 22.00   | 26.14 | 30.6  | 34.00 | 36.00 | 35.4  | 35.00  | 35.00      | 30.30   | 26.00     | 25.40     |
| 2008            | 21.8  | 26.88   | 27.46 | 30.2  | 33.00 | 36.01 | 33.8  | 33.00  | 28.75      | 27.34   | 22.96     | 22.90     |
| 2009            | 27.4  | 29.00   | 32.35 | 33.0  | 36.82 | 34.31 | 32.0  | 30.51  | 31.76      | 26.74   | 23.49     | 20.38     |
| 2010            | 18.2  | 20.42   | 23.24 | 25.6  | 32.59 | 33.94 | 30.6  | 35.82  | 34.97      | 30.53   | 30.46     | 34.00     |
| 2011            | 18.6  | 21.73   | 26.50 | 29.5  | 32.33 | 35.31 | 35.6  | 33.14  | 28.92      | 28.20   | 20.55     | 22.33     |
| 2012            | 16.6  | 24.80   | 28.25 | 29.0  | 33.72 | 36.61 | 35.9  | 37.46  | 35.00      | 32.46   | 26.00     | 26.38     |
| 2013            | 24.8  | 26.73   | 28.00 | 32.5  | 33.49 | 37.61 | 36.5  | 36.61  | 34.67      | 31.32   | 27.83     | 24.28     |
| 2014            | 27.3  | 28.45   | 29.09 | 31.5  | 31.67 | 36.51 | 35.5  | 36.51  | 35.79      | 32.78   | 24.82     | 23.44     |
| 2015            | 23.9  | 26.05   | 27.02 | 30.1  | 34.60 | 36.60 | 37.0  | 37.25  | 36.78      | 33.00   | 28.50     | 23.19     |
| 2016            | 21.3  | 27.74   | 27.00 | 30.8  | 33.56 | 34.58 | 37.3  | 31.78  | 34.00      | 31.31   | 27.29     | 27.28     |
| 2017            | 25.5  | 28.36   | 30.66 | 30.0  | 34.57 | 35.79 | 32.8  | 32.04  | 30.11      | 28.28   | 28.09     | 24.10     |
| 2018            | 18.0  | 27.68   | 28.28 | 30.3  | 34.29 | 35.00 | 32.5  | 30.81  | 28.71      | 27.00   | 25.59     | 24.60     |
| <b>Promedio</b> | 22.2  | 25.91   | 28.19 | 30.7  | 34.02 | 35.87 | 35.0  | 34.37  | 32.87      | 29.89   | 26.10     | 24.53     |



**Tabla 19 Temperaturas Mínimas**

| Año             | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo  | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
|-----------------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| 2004            | 3.07  | 3.00    | 8.00  | 8.92  | 13.84 | 17.25 | 17.60 | 16.46  | 13.59      | 11.20   | 3.00      | 0.75      |
| 2005            | 4.60  | 5.37    | 3.77  | 9.23  | 12.65 | 11.35 | 16.11 | 15.00  | 13.00      | 10.07   | 2.41      | 2.00      |
| 2006            | 1.57  | 4.58    | 6.63  | 9.69  | 11.05 | 13.22 | 14.69 | 15.00  | 12.76      | 10.57   | 4.93      | 0.00      |
| 2007            | 0.51  | 3.65    | 7.24  | 7.00  | 11.53 | 17.11 | 16.54 | 16.00  | 15.39      | 10.97   | 7.00      | 3.23      |
| 2008            | 1.23  | 5.17    | 5.00  | 7.78  | 11.57 | 17.18 | 16.00 | 15.72  | 14.82      | 10.30   | 5.37      | 3.34      |
| 2009            | 3.37  | 1.57    | 5.35  | 8.78  | 11.60 | 15.91 | 16.40 | 16.43  | 15.11      | 10.53   | 4.00      | 3.34      |
| 2010            | 3.27  | 3.37    | 4.70  | 8.39  | 12.11 | 15.76 | 18.00 | 19.00  | 16.11      | 8.61    | 4.34      | 12.00     |
| 2011            | 3.32  | 3.95    | 4.04  | 6.36  | 11.83 | 14.66 | 14.76 | 13.78  | 15.76      | 11.47   | 5.90      | 0.78      |
| 2012            | 2.04  | 5.19    | 3.38  | 9.43  | 17.24 | 18.00 | 17.76 | 20.00  | 17.00      | 15.00   | 10.00     | 3.92      |
| 2013            | 3.00  | 4.36    | 5.92  | 8.73  | 13.67 | 20.00 | 18.61 | 17.50  | 19.00      | 13.00   | 7.22      | 2.82      |
| 2014            | 1.11  | 5.94    | 6.00  | 8.09  | 8.68  | 17.54 | 18.00 | 19.00  | 20.00      | 12.22   | 6.14      | 3.51      |
| 2015            | 5.49  | 5.73    | 9.61  | 13.00 | 14.21 | 19.00 | 19.82 | 18.00  | 18.00      | 14.56   | 10.07     | 4.34      |
| 2016            | 0.68  | 4.38    | 8.25  | 13.70 | 17.12 | 18.37 | 21.00 | 14.34  | 17.42      | 14.00   | 8.56      | 6.34      |
| 2017            | 3.85  | 5.57    | 9.46  | 9.26  | 15.20 | 19.00 | 20.00 | 15.92  | 17.71      | 14.00   | 9.12      | 5.23      |
| 2018            | 2.32  | 6.16    | 8.62  | 12.03 | 17.18 | 19.00 | 19.94 | 13.73  | 17.00      | 13.73   | 7.96      | 5.33      |
| <b>Promedio</b> | 2.63  | 4.53    | 6.40  | 9.36  | 13.30 | 16.89 | 17.68 | 16.39  | 16.18      | 12.02   | 6.40      | 3.80      |

Mediante el software CROPWAT 8.0 se obtiene la precipitación efectiva, que al ser dividida entre el rendimiento del cultivo, genera el valor de la Huella Hídrica Verde. La Tabla 20 muestra los resultados obtenidos al utilizar las precipitaciones promedio durante el periodo de crecimiento de la planta.

**Tabla 20 Resultados Huella Hídrica Verde**

|         |  |
|---------|--|
| 23.9    | ET <sub>verde</sub> (mm/periodo)                       |
| 239     | CWU <sub>verde</sub> (m <sup>3</sup> /ha)              |
| 10.22   | Y* (t/ha)  |
| 23.37   | HH <sub>verde</sub> (m <sup>3</sup> /t)                |
| 83.33   | Botellas de Litro de sotol /tonelada                   |
| 0.28    | m <sup>3</sup> de agua/litro de sotol/periodo de 1 año |
| 4.21    | m <sup>3</sup> de agua/litro de sotol/periodo 15 años  |
| 4207.75 | Litros de agua/litro de sotol                          |



El resultado para la magnitud de la Huella Hídrica verde de acuerdo con la metodología empleada fue de 4207.75 litros de agua por cada litro de Sotol

### **Huella Hídrica azul**

El agua que se incorpora al producto durante el proceso de elaboración de la bebida, la cantidad de litros de Sotol por proceso y la relación entre ambos, se muestra en la Tabla 21. Como puede observarse, la magnitud de la Huella Hídrica azul es de 12.15 litros de agua por cada litro de Sotol

**Tabla 21 Resultados Huella Hídrica Azul**

|       |   |
|-------|---|
| 8680  | Litros de agua por ciclo de elaboración   |
| 714   | Litros de Sotol por ciclo de elaboración. |
| 12.15 | Litros de agua/litro de sotol             |

### **Huella Hídrica gris**

El valor de la Huella Hídrica gris es de 19.13 litros de agua por cada litro de Sotol, los cuales se obtienen con la relación entre los litros necesarios para asimilar la carga de contaminantes y los litros de Sotol producidos mostrados en la Tabla 22.

**Tabla 22 Resultados Huella Hídrica Gris**

|          |   |
|----------|---|
| 13659.56 | Litros de agua para asimilar carga por ciclo de elaboración |
| 714      | Litros de Sotol por ciclo de elaboración.                   |
| 19.13    | Litros de agua/litro de sotol                               |

### **Huella Hídrica total**

Las cantidades de Huella Hídrica verde, azul y gris, expresadas en litros de agua por litro de Sotol elaborado generan el valor de Huella Hídrica total, mostrados en la Tabla 23, donde se puede observar que el mayor componente es el de la Huella Hídrica Verde, lo que no influye en las fases de infiltración y escurrimiento.



**Tabla 23 Huella Hídrica del Sotol**

|          |                          |                               |
|----------|--------------------------|-------------------------------|
| 4,207.75 | Huella Hídrica Verde     | Litros de agua/litro de sotol |
| 12.15    | Huella Hídrica Azul      | Litros de agua/litro de sotol |
| 19.13    | Huella Hídrica Gris      | Litros de agua/litro de sotol |
| 4239.03  | Huella Hídrica del Sotol | Litros de agua/litro de sotol |

### **Conclusiones y recomendaciones**

Al analizar los valores obtenidos con la metodología de cálculo de Huella Hídrica de la producción de Sotol, nos muestra que la Huella Hídrica Verde es la que mayor peso tiene al igual que la producción de vino y cerveza, sin embargo, en el caso del sotol los porcentajes de Huella Hídrica Gris y Azul no sobrepasan el 1% cada una, en el caso del vino, la Gris y Azul representan aproximadamente el 18 % cada una y la cerveza oscilan entre el 6 y el 10 % respectivamente. Es decir, que estos dos cultivos tienen mayor impacto que el sotol en las fases del ciclo hidrológico en la infiltración y escurrimiento.

Precisando, al dividir los análisis del proceso de Sotol por tipo de Huella Hídrica se tiene que el 99.26 % proviene de la Huella Hídrica Verde, el 0.28% de la Azul y el 0.45% de la Gris.

Esto es importante para considerar el uso consuntivo de la región cuando se determine o se estime el balance hídrico, es decir; se debe considerar la producción del sotol en el impacto en la recolección de la planta, así como la precipitación registrada y la evapotranspiración. Dada las condiciones de la región donde la tormenta es de magnitudes escasas, de cortas duraciones y raras veces precipitaciones intensas en corta duración, así como de forma no generalizada, se debe considerar que el impacto de la producción de sotol en el sistema ambiental no es relevante de forma negativa, sin embargo, el impacto positivo a nivel social y económico a crecido de forma considerable debido a la demanda del producto.

Por otra parte, se cuenta con los registros relativos al hecho de que los productores de sotol no incorporan agua en el tiempo de maduración de la planta, lo que se



considera como lo más amigable con el ecosistema. La identificación de las zonas de extracción de las plantas permite evaluar a detalle los posibles daños o beneficios generados en el entorno, como son, la determinación de la disponibilidad de plantas en la región para evitar la sobreexplotación, control de población para evitar alteraciones en el ecosistema, así como, la evaluación para posibles mejoras en los sistemas de extracción de las plantas.

### **Aportación y líneas futuras de investigación**

- Generar conocimiento y aplicación de metodología para la evaluación del impacto en el recurso hídrico y en específico del ciclo hidrológico en regiones semiáridas.
- Generación de conocimiento de la magnitud del proceso de producción de las plantas *Dasyilirion spp.*
- Se considera áreas de oportunidad tener datos de registros de precipitación y escurrimiento en la región de producción de sotol para calibrar la magnitud estimada de los tipos de Huella Hídrica y con ello aplicarlo en los balances hídricos de la región.
- Determinar con esta misma metodología la Huella Hídrica de otros cultivos de la región para comparar y estimar cual es el mejor uso consuntivo acorde en regiones semiáridas o áridas
- Evaluar la vulnerabilidad de las fases del ciclo hidrológico si hay mayor extensión de cultivos de sotol e identificar posibles medidas de mitigación



## Bibliografía

- AgroDer (2012) 'Huella Hídrica en México en el contexto de Norteamérica', WWF México y AgroDer, pp. 1–46.
- Biswas, A. K. (2006). ¿ADÓNDE VA EL MUNDO DEL AGUA? Retrieved from <http://www.obela.org/system/files/mundoaguaakb.pdf>
- Centro Mario Molina. (2016). Estrategia de sustentabilidad para la Cadena Productiva Agave Tequila., from <https://centromariomolina.org/estrategia-de-sustentabilidad-para-la-cadena-productiva-agave-tequila/>
- CONAFOR. (2019). Estudios de Cuenca de Abasto Semidesierto Sur del Estado de Chihuahua. Chihuahua.
- CONAGUA, C. N. del A. (2012). Atlas del agua en México 2012. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-36-12.pdf>
- CONAGUA. (2018). ESTADÍSTICAS DEL AGUA EN MÉXICO 2018, 306.
- CONDUSE, A. S. para la cooperación y el desarrollo. (2016). Huella de Agua (ISO 14046 ) en América Latina Análisis y recomendaciones para una coherencia regional, (Iso 14046). Retrieved from [https://www.shareweb.ch/site/Suiz-Agua-Colombia/Documents/Huella\\_Agua\\_ISO\\_14046\\_America\\_Latina.pdf](https://www.shareweb.ch/site/Suiz-Agua-Colombia/Documents/Huella_Agua_ISO_14046_America_Latina.pdf)
- Diccionario del Español de México (DEM) <http://dem.colmex.mx>, El Colegio de México, A.C., [15 de enero del 2022].
- Estrada, G. (2008). Conceptos Básicos de Hidrología. Chihuahua: Dirección de Extensión y Difusión Cultural.
- FAO. (2006). Evapotranspiración de un cultivo.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual.
- INIFAP (2008). Sierra, S. J., Lara, C. R., Carrillo, R., Melgoza, A., Morales, C., & Royo, M. H. Los sotoles (*Dasyliron* spp) de Chihuahua. Retrieved from <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/handle/123456789/2406>
- INIFAP, Fundación, P. C. (2011). Agenda de Innovación Tecnológica del Estado de Chihuahua. Chihuahua, Chih., México. Retrieved from [https://www.cofupro.org.mx/cofupro/agendas/agenda\\_chihuahua.pdf](https://www.cofupro.org.mx/cofupro/agendas/agenda_chihuahua.pdf)
- IMTA (2017). Vázquez, R., & Lambarri, J. HUELLA HÍDRICA EN MÉXICO: análisis y perspectivas, Retrieved from [https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros\\_html/huellahidrica/files/assets/common/downloads/publication.pdf](https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/huellahidrica/files/assets/common/downloads/publication.pdf)
- Llamas Madurga, R., & M. (2006). LA CONTRIBUCIÓN DE LOS AVANCES CIENTÍFICOS A LA SOLUCIÓN DE LAS CRISIS DEL AGUA. Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp) (Vol. 100). Retrieved from <http://www.rac.es/ficheros/doc/00465.pdf>
- Mateo, M. R., Toja, Y. L., Amores, M. J., Navarro, D. M., Cetaqua, D., & Tecnológico, C. (2019). La huella hídrica en el ciclo urbano del agua, 102–106.



- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577–1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- ONU. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Organización de las Naciones Unidas., from <http://www.onu.org.mx/agenda-2030/objetivos-del-desarrollo-sostenible/>
- Quiroga, R. (2001). *Indicadores de sostenibilidad ambiental y de desarrollo sostenible*. Cepal Eclac (Vol. 16). Retrieved from [http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/8/9708/lcl1607e\\_ind.pdf](http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/8/9708/lcl1607e_ind.pdf)
- Reyes-Valdés, H. M., Palacios, R., Rivas-Martínez, E. N., Robledo-Olivo, A., Antonio-Bautista, A., Valdés-Dávila, C. M., Benavides-Mendoza, A. (2019). The Sustainability of Mexican Traditional Beverage Sotol: Ecological, Historical, and Technical Issues. In A. M. Grumezescu & A. M. Holban (Eds.), *Processing and Sustainability of Beverages* (pp. 103-137): Woodhead Publishing. pag 103
- Ruelas, G. (2019). [Comunicación personal, producción de Sotol].
- Ucha, F. (febrero de 2011). *Definiciónabc.com*. Obtenido de <https://www.definicionabc.com/general/isoterma.php>
- UNESCO-WWAP, (2009), Hassing, J., Ipsen, N., & Clausen, T. J. *Integrated Water Resources Management (IWRM) in Action*. UNWWD R3
- WEF. (2019). *Informe de riesgos mundiales 2019*. 2017. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>



## Glosario

**Insostenible:** “Situación o acontecimiento que no se puede mantener, reafirmar o continuar” (DEM, 2022).

**Agua virtual:** Cuantificación del agua requerida para la elaboración de un producto, incluyendo toda la cadena de suministro y enfocada a la importación y exportación de estos (CONAGUA, 2007).

**Huella Hídrica:** Indicador de los volúmenes de agua consumida para la obtención de un producto, identificando la fuente de abastecimiento, ubicando la zona de consumo, así como el periodo de elaboración (CONAGUA, 2007).

**Huella Hídrica Verde:** Referente al agua proveniente de la precipitación, incorporada al producto sin generar escurrimientos ni infiltraciones (CONAGUA, 2007).

**Huella Hídrica Azul:** Referente a el agua que se encuentra en los lugares de abastecimiento comunes como ríos, lagos o pozos y es incorporada al producto (CONAGUA, 2007).

**Huella Hídrica Gris:** Referente a la cantidad de agua que sería necesaria para asimilar los contaminantes incorporados durante el proceso de elaboración del producto (CONAGUA, 2007).

**Precipitación:** “Caída de la humedad atmosférica condensada en forma de lluvia o congelada en forma de granizo o de nieve: *precipitación pluvial*” (DEM, 2022).

## Evapotranspiración

**Per Cápita** “Referente a los niveles de producción con respecto a cada persona” (DEM, 2022).

## Sostenibilidad

**Entorno hídrico** “Todo aquello perteneciente al agua o que se relaciona con ella y que rodea a alguna cosa o a alguna persona” (DEM, 2022).

**Atenuarlo** “Disminuir la intensidad, la fuerza, la violencia o la gravedad de alguna cosa: *atenuar las luces, atenuar los golpes, atenuar los efectos de la enfermedad*” (DEM, 2022).



**Jima:** Proceso de selección y corte de las plantas que alcanzan su punto de maduración óptimo

**Vinatas:** Lugar donde se realiza la elaboración de productos destilados

**Isoyetas:** Líneas dentro de un plano que van uniendo los puntos con la misma magnitud que sirven para visualizar la distribución de la lluvia (Estrada, 2008).

**Isotermas** Líneas dentro de un plano que van uniendo los puntos con la misma magnitud de temperatura durante un periodo de tiempo, que sirven para visualizar la distribución de la temperatura (Estrada, 2008).

