

**Estimación de la Huella Hídrica en el cultivo de Tomate "*Solanum Lycopersicum*" en  
la cuenca media del río Otún del departamento de Risaralda**

**Jonathan Mejía Osorio**

**Luis Carlos Ordoñez Pinzón**

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD**

**Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente**

**Ingeniería Ambiental**

**Pereira – Risaralda**

**2019**

**Estimación de la Huella Hídrica en el cultivo de Tomate “*Solanum Lycopersicum*” en  
la cuenca media del río Otún del departamento de Risaralda**

**Jonathan Mejía Osorio**

**Luis Carlos Ordoñez Pinzón**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingenieros Ambientales**

**Director**

**Carlos Mario Duque Chaves**

**Ingeniero Ambiental MSc**

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD**

**Escuela de Ciencias Agrícolas Pecuarias y del Medio Ambiente**

**Ingeniería Ambiental**

**Pereira – Risaralda**

**2019**

## Tabla de Contenido

1.	Introducción .....	11
2.	Justificación. ....	12
2.2.	Hipótesis de investigación.....	20
3.	Objetivos .....	21
3.1.	Objetivo general .....	21
3.2.	Objetivos específicos.....	21
4.	Marco Referencial.....	22
4.1.	Antecedentes .....	22
4.1.1.	Contexto histórico de la huella hídrica .....	22
4.1.2.	Contexto histórico de la huella hídrica .....	22
4.2.	Marco Jurídico Que Regula El Recurso Agua En Colombia .....	25
4.3.	Marco Teórico .....	27
4.3.1.	Huella Hídrica.....	28
4.3.2.	La huella hídrica de una persona. ....	28
4.3.3.	La huella hídrica de un país .....	29
4.3.4.	Importancia De la Medición de la “HH” En El Cultivo De Tomate. ....	30
4.3.5.	Metodología para la medición de la Huella Hídrica en el cultivo de Tómate “HH”. 31	
4.3.6.	Tipos de medición de la Huella Hídrica “HH”. ....	35
4.3.7.	Evapotranspiración .....	40
4.3.8.	Características y Condiciones del Cultivo de Tomate “Solanum Lycopersicum”, en el País. 42	
4.3.9.	Sistema Productivo y Generalidades Del Tomate En Colombia. ....	44
-	Condiciones Climáticas.....	46
4.3.10.	Descripción Botánica y Morfológica de Tómate. ....	47

4.3.11.	Ciclo Fenológico del Cultivo de Tomate. ....	48
4.3.12.	Índice De Presión Hídrica En Los Ecosistemas .....	50
5.	Aspectos Metodológicos .....	54
5.1.	Tipo de investigación .....	54
5.2.	Diseño experimental.....	56
5.2.1.	Caracterización de la zona de estudio en términos de Gestión de Recurso Hídrico	56
5.2.2.	Análisis de Huella Hídrica .....	57
5.2.3.	Formulación de estrategias .....	59
6.	Resultados y discusión .....	60
6.1.	Caracterización de la zona de estudio - Macrolocalización .....	60
6.2.	Caracterización del área de investigación .....	65
6.2.1.	Caracterización del cultivo .....	67
6.3.	Requerimiento Hídrico del cultivo .....	73
6.3.1.	Determinación de la Huella Hídrica Azul y verde del cultivo de tomate por medio del Software CropWat 8.0.....	75
6.4.	Cálculos de la HH con CropWat 8.0 .....	77
6.4.1.	Estimación de la Huella Hídrica Verde .....	83
6.4.2.	Estimación de la Huella Hídrica Azul .....	84
6.4.3.	Análisis general de los resultados .....	84
6.5.	Estrategias para fortalecer el recurso hídrico y sus usos agrícolas .....	85
	Conclusiones.....	89
	Recomendaciones. ....	91
	Referencias.....	92

## Lista de Figuras

Figura 1. Nuevas tecnologías de evapotranspiración .....	24
Figura 2. Oferta hídrica de Colombia.....	24
Figura 3. Subzonas hidrográficas con mayor erosión hídrica potencial y transporte de sedimentos .....	25
Figura 4. Comportamiento de la huella hídrica del consumo por persona .....	29
Figura 5. Evapotranspiración.....	42
Figura 6. Descripción botánica y morfología del tomate. ....	47
Figura 7. Composición nutricional del tomate por 100 gramos de tomate fresco .....	48
Figura 8. Ciclo fenológico del cultivo de tomate .....	50
Figura 9. Ubicación de la cuenca río Otún. ....	62
Figura 10. Ubicación geográfica de la finca de estudio .....	66
Figura 11. Características del cultivo .....	67
Figura 12. Sistema de siembra bajo invernadero.....	68
Figura 13. Producción de tomate recolectada.....	68
Figura 14. Tanques Reservarios. ....	69
Figura 15. Fungicidas y agroquímicos para el cultivo.....	70
Figura 16. Procesos de fertilización de suelo en el cultivo. ....	70
Figura 17. Lugar de procesos de preparación de fungicidas y desinfección .....	71
Figura 18. Adaptación del sistema por goteo para el cultivo .....	71
Figura 19. Tanque Reservario para el riego del cultivo .....	72
Figura 20. Mangueras para el riego del cultivo .....	73
Figura 21. Información para cálculo de Rad.y ETo. ....	78
Figura 22. Cálculo de la precipitación efectiva. ....	79

Figura 23. Valores $K_c$ para el cultivo de Tomate.....	80
Figura 24. Parámetros del cultivo del tomate (suelo).....	81
Figura 25. Requerimiento de Agua del Cultivo (RAC) del tomate.....	82

## Lista de Tablas

Tabla 1. Legislación del agua en Colombia .....	26
Tabla 2. Subzonas Hidrográficas Con IPHE Crítico. ....	51
Tabla 3. Posicionamiento de las leguminosas confinada “Tómate” frente a otros cultivos predominantes en la cuenca del Río Otún. ....	52
Tabla 4. Parámetros morfométricos de la cuenca del rio Otún .....	63
Tabla 5. Usos de Suelo Rural agrupados por Municipios. ....	65
Tabla 6. Registros hidroclimatológicos para el año 2017 del departamento de Risaralda.....	76
Tabla 7. Conversión de medidas.....	77
Tabla 8. Coeficiente único del cultivo Kc. ....	79

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Dosquebradas, 2018



## **Resumen**

Se precisa generar una propuesta de proyecto aplicado que permite evaluar mediante la metodología de Huella Hídrica –HH, los sistemas de producción agrícola para este caso exclusivo al cultivo de “Tomate” - “Solanum Lycopersicum” en un área geográficamente delimitada en el Departamento de Risaralda midiendo diversas variables con relación al uso adecuado del recurso hídrico en sus procesos. Esta investigación de tipo exploraría, permite identificar la gestión integral del recurso hídrico en la producción de un cultivo de Tomate, a través de dos sistemas de riego; el “Tradicional y Automatizado Invernadero”, dichas mediciones o variables se tomaran según los indicadores y la metodología aplicada denominada Huella Hídrica, permitiendo de esta manera identificar estrategias y lineamientos para la disminución en la presión sobre los recursos eco sistémicos presentes en el área de influencia.

**Palabras Claves:** Abastecimiento, Huella Hídrica “HH”, Ecosistema, Antrópicas, Automatizado, Invernadero.

## **Abstract**

It is necessary to generate an applied project proposal that allows to evaluate by the methodology of Water Footprint –HH, the agricultural production systems for this case exclusive to the cultivation of "Tomato" - "Solanum Lycopersicum" in a geographically delimited area in the Department of Risaralda measuring various variables in relation to the appropriate use of the water resource in its processes. This type research would be exploited, it allows to identify the integral management of the water resource in the production of a tomato crop, through two irrigation systems; the "Traditional and Automated Greenhouse", these measurements or variables will be taken according to the indicators and the applied methodology called Water Footprint, thus allowing to identify strategies and guidelines for the decrease in pressure on the systemic ecosystem resources present in the area of influence.

**Keywords:** Supply, Water Footprint "HH", Ecosystem, Anthropic, Automated, Greenhouse

## **1. Introducción**

Este trabajo consiste en evaluar la sostenibilidad hídrica en el cultivo de “Tomate” - “*Solanum Lycopersicum*” en clima frío-moderado de la Cuenca media del Río Otún del municipio de Pereira – Risaralda a través de dos sistemas de riego “Tradicional y Automatizado bajo Invernadero”. Con el fin de plantear mejoras que permitan mejorar la eficiencia del uso del recurso hídrico, en estos cultivos específicos.

Para la realización de este documento se plantearon entre los objetivos la investigación de la caracterización de la zona de estudio determinando las condiciones actuales de uso del recurso hídrico y su relación con el sector agrícola específicamente en el cultivo de “Tomate” - “*Solanum Lycopersicum*”.

Posteriormente, se realizó una evaluación de la huella hídrica verde y azul en el cultivo de “Tomate” - “*Solanum Lycopersicum*” bajo dos sistemas de producción agrícola y su comparación a partir de los sistema de riego “Tradicional y Automatizado bajo invernadero” con relación a su impacto ambiental frente al consumo de agua. Y finalmente, se procedió a identificar alternativas de gestión integral del recurso hídrico en el sector agrícola para su adaptación al cambio climático.

Esta investigación se realizó por medio de una metodología de observación directa, de tipo explotaría y se analizó como afecta el proceso productivo a la gestión integral del recurso hídrico en la producción de un cultivo de Tomate, a través del sistema de riesgo Tradicional y el sistema de riesgo Automatizado Invernadero” a través de la aplicación de la metodología denominada Huella Hídrica, por medio de la cual, con los resultados e indicadores se identificaron las estrategias y lineamientos para la disminución en la presión sobre los recursos eco sistémicos presentes en el área de influencia.

## **2. Justificación.**

Teniendo en cuenta que la agricultura es la base fundamental de la alimentación del planeta considerándose la primera opción para acceder y garantizar una seguridad alimentaria. Sin embargo, estas actividades se relaciona directamente como una de las que más deterioran el ambiente por el gasto excesivo de agua potable y la generación de aguas residuales no domésticas, evidenciándose en el aumento en la producción de gases de efecto invernadero durante la cadena productiva.

Es así como uno de los cultivos con alta demanda a nivel mundial es el tomate, el cual según indica la “FAO / ONU” tuvo un crecimiento mundial per cápita cercano al 36% entre 1985 y 2005 considerándolo uno de los cultivos hortícolas más importantes a nivel mundial. A nivel nacional según lo precisa Jaramillo (2009), también es uno de los cultivos más importantes por su producción en diferentes departamentos del país alcanzando una producción de 376,645 toneladas de tomate en aproximadamente 11,304 ha.

Por lo tanto en este tipo de cultivos se requieren de grandes volúmenes de agua, lo que hace necesario medir y conocer que tanto se puede afectar el recurso hídrico por la inadecuada utilización con relación al ahorro y uso eficiente, que no solo repercute en el desabastecimiento para consumo humano, sino afectando también todo tipo de cultivos que demanden agua en su interacción para con los ecosistemas, es así como se deberán implementar metodologías y estrategias integrales para garantizar la sostenibilidad de dicho recurso en términos de tiempo y calidad.

Teniendo en cuenta la importancia de este producto en el mercado diario de los colombianos y especialmente en el Departamento de Risaralda, dicho aumento en la demanda hace necesario determinar las presiones que se generan sobre el recurso hídrico en las

diferentes condiciones de producción, la implementación de modelos de riego automático, garantizan alternativas de gestión del recurso, así como nuevos lineamientos para su conservación especialmente en áreas de especial importancia ecosistémica.

En este sentido se convierte en necesidad mundial, modificar e implementar modelos de riego y prácticas de manejo que aumenten la producción de tomate pero que a su vez garantice la reducción en la utilización del agua, partiendo de la cuantificación de los sistemas productivos actuales mediante herramientas e indicadores como la huella hídrica “HH”. Los sistemas productivos de cada tipo de cultivo y su manejo pueden ser diferentes, por lo que se hace necesario cuantificar el recurso hídrico por producción a manera local teniendo en cuenta sus características únicas.

De esta forma, y a través de diferentes metodologías se podría aportar información muy precisa y relevante sobre el consumo de agua promedio diario, para nuestro caso específico se abordara el desarrollo de la investigación a través de dos modelos de producción de tomate que son muy reconocidos y representativos en Colombia, “Riego tradicional y automático bajo invernadero”, esto con el fin de promover investigaciones en sistemas que aumenten la eficiencia en la producción pero a su vez garantice la disminución tangencial del agua en este tipo de cultivos todo en el país, especialmente en áreas de importancia ecosistémica y de recarga acuífera, áreas que a pesar de estar protegidas mediante procesos y criterios normativos, la falta de planeación y una efectiva planificación del territorio por parte de las autoridades locales han permitido ver inmersos estos cultivos sobre dichas áreas de especial importancia.

La perspectiva que muestra la huella hídrica frente a la visión convencional de gestión del agua, permite identificar impactos sobre el recurso hídrico a causa de los hábitos de consumo de la población y de esta forma generar una transformación de prácticas cotidianas asociadas a

la relación agua – hombre , teniendo en cuenta que la huella hídrica más representativa es proveniente de las actividades agrícolas, por lo cual, es evidente la necesidad de emprender estudios que analicen con mayor detalle productos con alto grado y elevado consumo de agua, por su contribución potencial en la contaminación del recurso agua y uso insostenible.

Una herramienta científica aplicada a este campo es la huella hídrica (HH), que es utilizada para realizar un diagnóstico sobre el consumo hídrico de determinada actividad, y la presión que esta ejerce sobre el recurso hídrico en un área o zona de estudio, permite evidenciar la sostenibilidad de las diferentes actividades económicas y sociales, determinando así la relación existente entre los usos del agua en determinado territorio y una gestión de carácter ambiental optima sobre el recurso hídrico, por lo tanto, la aplicación de esta metodología es la mejor guía de planeación y planificación dentro de la buena gestión, para establecer políticas claras y acciones correctivas de manera contundente para un uso y ahorro eficiente del agua en este cultivo de tomate, que permita a su vez garantizar no solo la producción limpia en todo su proceso, sino la sostenibilidad del negocio desde una perspectiva de desarrollo social.

## **2.1. Definición del problema**

El crecimiento desmedido de la población humana ha generado un aumento del consumo mundial de productos no renovables y renovables, entre los cuales el que presenta mayor consumo es el agua dulce, por medio de la cual se realizan gran parte de los procesos productivos que se relacionan con la fabricación y elaboración de alimentos, el alto consumo y las pocas alternativas de bajar este indicador son en sí mismos hoy todo un esquema de análisis por diversos científicos y especialistas que conocer la entera necesidad de realizar acciones inmediatas, en pro de reducir el consumo de agua y crear modelos eficientes y

retributivos; en procura de mantener el equilibrio natural entre la oferta y la demanda en función del abastecimiento del recurso hídrico.

Una política establecida hoy a nivel mundial, es la preocupación compartida por la protección y preservación de los recursos naturales, mantener una buena calidad de vida para futuras generaciones se compensa con la conciencia y responsabilidad que en materia ambiental se puede tener hoy, la pérdida de cobertura vegetal de zonas que deberían ser consideradas como estratégicas para la vida del planeta, el avance sin tregua en la expansión de las fronteras agrícolas y urbanas sobre espacios naturales de importancia ecosistémica, que sirven de amortiguadores biológicos para la compensación y recuperación de los ecosistemas y por ende del recurso hídrico, comprometen la supervivencia de la vida humana y de las especies que dependen del agua.

El recurso hídrico tiene una singular importancia puesto que el agua, es utilizada actualmente como como fuente base para el abastecimiento y estructura central de la economía (producción), es ese único porcentaje el que despierta hoy la preocupación mundial de darle un manejo sostenible a los factores que indican de forma directa una presión sobre los recursos naturales. Es por esto, que en Johannesburgo, entre el 26 agosto y el 4 septiembre 2002, se realizó “La Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible”. El objetivo central consistió en verificar cuales han sido los avances logrados desde la última Cumbre de Río de 1992. Los principales temas analizados en Johannesburgo fueron: agua y sanidad, energía, pobreza, calentamiento global, comercio, recursos naturales y biodiversidad. (Reis, 2009)

Temas como la calidad del agua potable y el uso que se le está dando, fueron claves para el desarrollo de la “Declaración de Johannesburgo sobre el Desarrollo Sostenible” suscrita por todos los Jefes de Estado y de Gobierno, y el “Plan de Aplicación de Johannesburgo”. Todo

esto con el fin de contrarrestar los daños generados a este recurso no renovable. Senge (2009), describe algunas situaciones y datos relacionados con la calidad del agua a nivel global:

- Calidad del agua potable.
  - más o menos dos tercios del agua que usamos se va en agricultura, y su mayor contaminante son los residuos de pesticidas y contaminantes.
  - Una quinta parte no tiene acceso confiable a agua potable y mucha gente está crónicamente deshidratada. Pues muchos de los suministros subterráneos se han agotado con el tiempo.

También indica que desde 1900 se ha perdido más de la mitad de las tierras húmedas, y además:

- Hoy en día, el 50% de los ríos más grandes está gravemente contaminado, o secándose en sus partes bajas.
- Los océanos cada vez son más ácidos esto a causa de la absorción de dióxido de carbono de combustibles fósiles, ocasionando, en los últimos veinte años, la pérdida del 20% de los arrecifes coralinos, y el otro 20% se encuentra bastante afectado.
- La gran mayoría de esos arrecifes defienden de inundaciones a las zonas costeras y son de gran importancia para la sustentación de la vida marina. (ONU, 2009)

Es importante destacar, que según IDEAM (2018), Colombia es una potencia hídrica a nivel global, dada alta disponibilidad en la oferta hídrica. A nivel nacional, los departamentos con mayor oferta hídrica son: "...Antioquia, Santander, Boyacá, Cundinamarca, Caldas, Risaralda, Quindío, Chocó, Tolima, Cauca y Nariño" (IDEAM, 2018. p. 22)

Risaralda, departamento ubicado en la región Andina, caracterizada por sus grandes zonas boscosas, producto del paso de las 3 cordilleras por estas regiones, posee la cuenca media del Río Otún, ubicada en los departamentos de los municipios de Pereira, Dosquebradas y Santa



Rosa de Cabal, en el Departamento de Risaralda, constituyéndose una fuente importante para el abastecimiento de agua, así mismo, para el desarrollo de diversos servicios ecosistémicos.

Las dinámicas antrópicas presentes en la zona de estudio, especialmente las relacionadas con el cultivo de productos agrícolas, como el Tomate, han generado que la subzona hidrográfica del Río Otún cuente con un Índice de Presión Hídrica a los Ecosistemas en “Crítico”, según la evaluación multisectorial de Huella Hídrica en Colombia elaborada en el marco del Estudio Nacional de Agua –ENA 2014, evaluación que se efectúa con una periodicidad de cada 4 años indicando para el año 2018 una afectación del 20% para el Departamento de Risaralda.

Por su ubicación estratégica, así como el interés ambiental y económico, constantemente se plantean estrategias y acciones a las diversas problemáticas ambientales en lo referente al uso y disponibilidad del agua, asociado a la necesidad de mantener un abastecimiento de alimentos frente a una demanda que cada vez es más fuerte, las cuales no se han ejecutado en su totalidad.

Específicamente, en el proceso productivo de tomate, producto que se presenta en gran cantidad en los cultivos en la zona de estudio, se evidencian una serie de impactos ambientales que varían su nivel de afectación asociado a los sistemas o prácticas agrícolas y capacidad productiva utilizada, estos afectan de manera directa los recursos; hídrico y del suelo, pues dentro de los procesos de producción una actividad fundamental es el riego, actividad que genera un impacto directo sobre el agua siendo este necesario, ya que su abastecimiento se da mediante una fuente superficial o subterránea, generando así; un uso excesivo del recurso, además se debe tener en cuenta que una mala práctica agrícola en el cultivo de tomate, podrá originar de manera inmediata drenajes y erosión en el suelo del entorno productivo, lo que conlleva a mediano plazo al agotamiento de las fuentes hídricas en el sector; provocando una

variable más a tener en cuenta sobre la problemática en cuestión; los diversos conflictos sociales asociados a usos del agua para los cultivos agrícolas y la necesidad indiscutible en el consumo humano.

El tomate es una de las hortalizas que siempre se ha mantenido dentro de las de mayor consumo en Colombia, por su alto nivel nutritivo, sin embargo, la producción nacional no es suficiente para satisfacer la demanda interna, sin contar con las exigencias de exportación, esto genera sobre los productores una necesidad de incrementar los niveles de producción al máximo.

Lo anterior, hace necesario entender la complejidad de la situación del cultivo y producción del tomate, frente a los niveles de consumo de recursos, específicamente el hídrico, resaltando los avances tecnológicos que han conllevando a replantear alternativas más eficientes en función del consumo de agua con el fin de lograr la eficiencia con una visión de sostenibilidad.

La puesta en marcha de nuevos sistemas de riego, son un claro ejemplo de lo mencionado anteriormente, estos avances tecnológicos aplicados a la industria agrícola, no solo aumenta la productividad económica, sino también trae grandes beneficios sociales y ambientales a la comunidad. Estos sistemas, actualmente implementan sensores para monitorear las condiciones ideales del cultivo con mecanismos con servo control y otros robotizados, buscan el buen uso del recurso hídrico y la optimización del cultivo de tomate, estos sistemas requieren de una serie de investigaciones que permitan recopilar datos, para alimentar modelos y simuladores, interpolando la información obtenida en campo y así obtener bases de datos precisos sobre el cultivo del tomate y a su vez las variables que se puedan determinar en el mismo en tiempo real.

Sin embargo, los diferentes modelos de desarrollo no han sido aplicados por las empresas de forma tendencial, por factores como los altos costos de implementación y la adquisición de tecnología, por lo cual, esto ha llevado a que el recurso hídrico sea considerado en declaratoria de agotamiento, generando el desplazamiento y la relocalización de las industrias y modelos productivos, a sitios con niveles de alta demanda del recurso hídrico como elemento fundamental en grandes procesos industriales, tales como Colombia, viéndose beneficiado económicamente, pero trayendo serios problemas medioambientales al ecosistema en general.

Por ende, dentro de las técnicas globales de investigación que se ha venido implementando la gestión integral del recurso hídrico como eje transversal y necesario para el desarrollo económico, social y ambiental, la optimización de estrategias en el uso de agua y la reducción de los impactos ambientales asociados a cualquier tipo de producción agrícola, se encuentra la propuesta de medición de la huella hídrica HH.

Según Uribe, (2012) citando a Suárez, (2007), La Huella Hídrica (HH), se presenta como un indicador de la gestión y uso del recurso agua en los procesos que permite identificar relaciones causa-efecto a nivel socio-ambiental, siendo las actividades socio- económicas el principal factor de presión sobre los recursos naturales, es una de las metodologías más conocidas a nivel mundial para establecer el consumo de agua en procesos de producción y es una base para analizar los impactos ambientales de las actividades productivas sobre los recursos hídricos disponibles.

Es interesante ver cómo a través de esta metodología de análisis y evaluación aplicada sobre el cultivo de tomate permite establecer técnicas de investigación, que garantizarán la optimización en el uso del recurso hídrico tanto para áreas desprovistas y abiertas como para invernaderos, es así como podríamos llegar a concluir desde diferentes visiones la reducción de los impactos ambientales de este cultivo asociadas al recurso hídrico.

Profundizando en el mismo contexto donde se combinen tanto la producción de tomate, el consumo de agua, la demanda para abastecimiento y teniendo como punto preciso, que a nivel global todas las actividades agrícolas requieren del 70% del agua consumida en todo el planeta, y con un estimado sobre el aumento poblacional en los últimos tiempos, este estudio plantea la siguiente pregunta de investigación:

## **2.2. Hipótesis de investigación**

¿Cómo garantizar hoy una producción sostenible de cultivos ambientalmente amigables con los recursos ecosistémicos, en un paralelo que cada día crece más desproporcionado y poblacionalmente, incrementando a su vez las necesidades de consumismo?

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo general**

Evaluar la sostenibilidad hídrica en el cultivo de “Tomate” - “Solanum Lycopersicum” en clima frío-moderado de la Cuenca media del Río Otún del municipio de Pereira – Risaralda a través de dos sistemas de riego “Tradicional y Automatizado bajo Invernadero”.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar la zona de estudio determinando las condiciones actuales de uso del recurso hídrico y su relación con el sector agrícola específicamente en el cultivo de “Tomate” - “Solanum Lycopersicum”
- Evaluar la huella hídrica verde y azul en el cultivo de “Tomate” - “Solanum Lycopersicum” bajo dos sistemas de producción agrícola y su comparación a partir de los sistemas de riego “Tradicional y Automatizado bajo invernadero” con relación a su impacto ambiental frente al consumo de agua.
- Identificar alternativas de gestión integral del recurso hídrico en el sector agrícola para su adaptación al cambio climático.

## **4. Marco Referencial**

### **4.1. Antecedentes**

#### **4.1.1. Contexto histórico de la huella hídrica**

En los últimos siglos, muchas investigaciones se han enfocado no solo en mejorar los índices productivos buscando optimizar la rentabilidad, sino también en aplicar metodologías que permitan minimizar los impactos ambientales y específicamente en el uso del agua. Así mismo, según (Torrez, 2016). Para el año 1993 el investigador Jhon Anthony Allan del King's College de Londres, recalcó el concepto de "Agua Virtual", el cual permite definir el volumen de agua necesario para elaborar un producto o para facilitar su servicio. Así mismo, (Torrez, 2016). Plantea que, para el año 2002, Arien Hoekstra formulo el término de "huella hídrica" para obtener un indicador que relacionara el agua con el consumo a todos los niveles de la población.

Es muy importante saber calcular la huella hídrica, ya que según Ochoa (2012), "a nivel mundial, un 86% de la huella hídrica está relacionada con el consumo en la producción de productos agrícolas, 10% con el consumo de bienes industriales y un de 5% con los usos domésticos" (p.1).

#### **4.1.2. Contexto histórico de la huella hídrica**

Según Andi, (2018) "La disponibilidad natural de agua dulce está dada por la cuantificación hídrica asociada con los procesos del ciclo hidrológico, con su dinámica, distribución espacial y temporal en el territorio". (p. 10).

Así mismo, la Andi (2018), asegura que "esta disponibilidad natural está determinada por la ubicación geográfica, características fisiológicas y variedad de condiciones climáticas. Esta disponibilidad está limitada por condiciones de calidad del agua que son afectadas por las presiones por uso y contaminación de los sistemas hídricos". (p. 10).

Cabe resaltar, que cuando llueve en una zona el agua es interceptada primeramente por objetos que existen en dicha zona (como vegetación, producción agrícola, edificios, etc.) que imposibilita que llegue al suelo; luego se infiltra en el suelo con la velocidad que el mismo suelo tiene capacidad (permeabilidad) hasta lograr el punto de saturación de la humedad del mismo; así mismo, se procede a el llenado de las depresiones superficiales, lo que da lugar a encharcamientos. De esta manera las primeras partes del proceso se lleva a cabo la evaporación y evapotranspiración reincorporándose parte del volumen de agua precipitado a la atmósfera.

Consecutivamente, a partir del llenado de las depresiones superficiales se alcanza la saturación de humedad del suelo, y persigue llegando agua por la lluvia, lo que inicia el escurrimiento superficial, fluyendo el agua hacia terrenos con menor elevación y llegando casualmente a cauces definidos.

De esta manera, según la Andi, (2018) “Las dinámicas sociales y sectoriales conllevan presiones por uso, alteraciones de las condiciones naturales y afectaciones a la calidad del recurso hídrico que deben ser evaluadas para definir estrategias integrales de conservación de los sistemas hídricos”. (p.10).

De igual forma, la (Andi, 2018), plantea que, las medidas y acciones adoptadas en las cuencas y sistemas acuíferos siempre son eficientes si saben el debido funcionamiento y de los sistemas hídricos y de cómo se incorpora la gestión de integralidad para manifestar y exponer soluciones de repercusión estructural en la ordenación del territorio. Así mismo, el conocimiento teórico y empírico de los sistemas hídricos sobre la seguridad hídrica, sus relaciones con los sistemas naturales, la articulación institucional y la gobernanza.

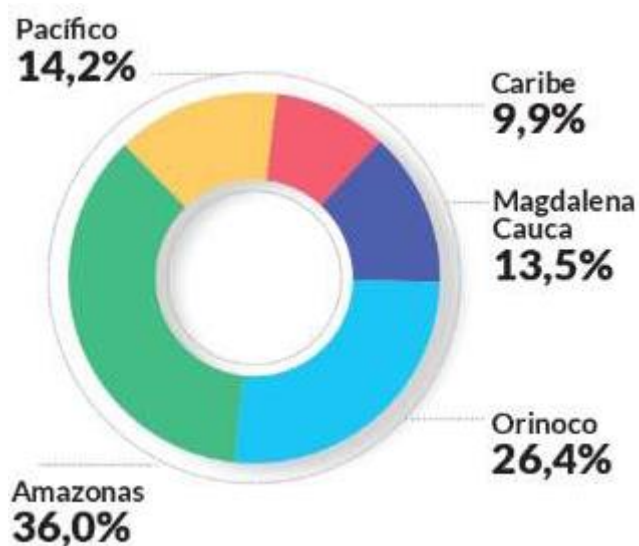
En la siguiente figura, se puede apreciar las nuevas tecnologías de evapotranspiración, que son utilizadas en Colombia y permiten una eficiencia en los procesos agrícolas del país.



*Figura 1.* Nuevas tecnologías de evapotranspiración

Fuente: Andi, (2018). Estudio Nacional del Agua. Recuperado de [http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla\\_ENA\\_%202018.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla_ENA_%202018.pdf)

Así mismo, se puede apreciar en la figura 2, la oferta hídrica de Colombia para el año 2018 por cada región:



*Figura 2.* Oferta hídrica de Colombia

Fuente: IDEAM, (2018). Estudio Nacional del Agua. Recuperado de: [http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla\\_ENA\\_%202018.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla_ENA_%202018.pdf)



Finalmente, en la figura 3, se pueden observar, las subzonas hidrográficas con mayor erosión hídrica potencial y transporte de sedimentos, donde Risaralda se encuentra geográficamente en un punto eficiente y estratégico, que genera beneficios a las zonas de cultivos y producción agrícola:

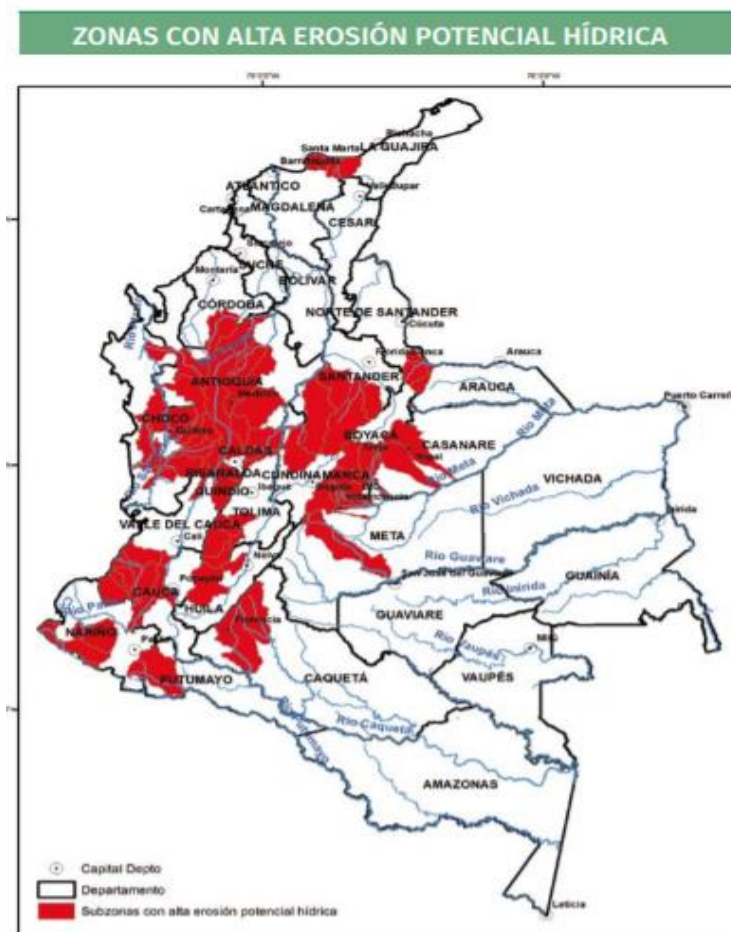


Figura 3. Subzonas hidrográficas con mayor erosión hídrica potencial y transporte de sedimentos

Fuente: Andí, (2018). Estudio Nacional del Agua. Recuperado de: [http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla\\_ENA\\_%202018.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla_ENA_%202018.pdf)

#### 4.2. Marco Jurídico Que Regula El Recurso Agua En Colombia

La legislación nacional según (Torres, 2016). Argumenta que toda una reglamentación jurisprudencial frente al recurso hídrico, de la cual se toma como base los siguientes documentos dentro del marco jurídico; Código de Recursos Naturales Renovables (Dec. 2811/74):

- Estrategia Nacional del Agua (1996)
- Lineamientos de Política para el Manejo Integral del Agua (1996)
- Políticas Ambientales: Humedales, Páramos, Residuos Sólidos, Biodiversidad, Espacios Oceánicos y Zonas Costeras, Producción Más Limpia, Gestión Ambiental Urbana, Salud Ambiental, Políticas Sectoriales: Agua Potable y Saneamiento, Agropecuario, Energía, Transporte, Industrial, entre otros.
- En 2010 fue formulada por parte del Grupo de Recurso Hídrico del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, la Política Nacional de Gestión Integral de Recursos Hídricos, planteada como instrumento orientador de la gestión integral del agua. se contemplan aquí los objetivos y estrategias del país para el uso eficiente del agua, así como el manejo del recurso por parte de todos los sectores, considerando la concertación de los aspectos sociales, económicos y ambientales.

De esta manera, el Código de Recursos Naturales Renovables (Dec. 2811/74), plantea lo siguiente: La Política Nacional de Gestión Integral de Recursos Hídricos tiene un horizonte a 12 años y se implementará a través del Plan Hídrico Nacional, en el que se desarrollarán sus líneas de acción estratégicas, con programas y proyectos específicos para los años (2014 a 2022) los cuales se han desarrollado a corto, mediano y largo plazo. Así mismo, se observa en la tabla 1 la legislación del agua en Colombia según Cruz (2017):

***Tabla 1. Legislación del agua en Colombia***

<b>LEGISLACION DEL AGUA EN COLOMBIA</b>	
<b>NORMA</b>	<b>TEMATICA</b>
<b>Decreto No. 1076 de 2015</b>	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible

<b>Decreto No. 3930 de 2010</b>	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 11 Libro 11 del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones"
<b>Decreto No. 900 de 2006</b>	Todo proyecto que involucre en su ejecución el uso del agua tomada directamente de fuentes naturales y que esté sujeto a la obtención de licencia ambiental, deberá destinar el 1% del total de la inversión para la recuperación, conservación, preservación y vigilancia de la cuenca hidrográfica que alimenta la respectiva fuente hídrica; de conformidad con el parágrafo del artículo 43 de la Ley 99 de 1993
<b>Decreto No. 4742 de 2005</b>	Tasa por utilización de agua
<b>Decreto No.1443 de 2004</b>	Por el cual se reglamenta parcialmente el Decreto-ley 2811 de 1974, la Ley 253 de 1996, y la Ley 430 de 1998 en relación con la prevención y control de la contaminación ambiental por el manejo de plaguicidas y desechos o residuos peligrosos provenientes de los mismos
<b>Decreto No. 1594 de 1984</b>	Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos
<b>Decreto No. 2811 de 1974</b>	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente
<b>Ley No. 99 de 1993</b>	por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA

Fuente: Cruz, 2017. Análisis Y Evaluación De La Huella Hídrica De Un Cultivo De Tomate. Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/16984/CruzGonzalezMauricio2017.pdf;jsessionid=9D7E3BD670671D5BAE6CEF93876C3A1D?sequence=1>

### 4.3. Marco Teórico

Para este caso en particular, se pretende analizar y evaluar la incidencia del cultivo de tomate sobre el recurso hídrico, a través de una investigación analítica, teórico y experimental en los diferentes procesos, que involucran trabajo en campo y el planteamiento académico que

garantice expresar de manera textual los alcances que se logren de manera puntual y específica, a través de los conceptos básicos y generales de la huella hídrica “HH”.

#### **4.3.1. Huella Hídrica.**

La huella hídrica de un individuo, comunidad o empresa según Torres, (2016), “Se define como el volumen total de agua dulce usada para producir los bienes y servicios consumidos por el individuo, comunidad o empresa. El uso del agua se mide con el volumen de agua que se consume, que se evapora y que se contamina”. (p.24).

Según Hídrica (2010):

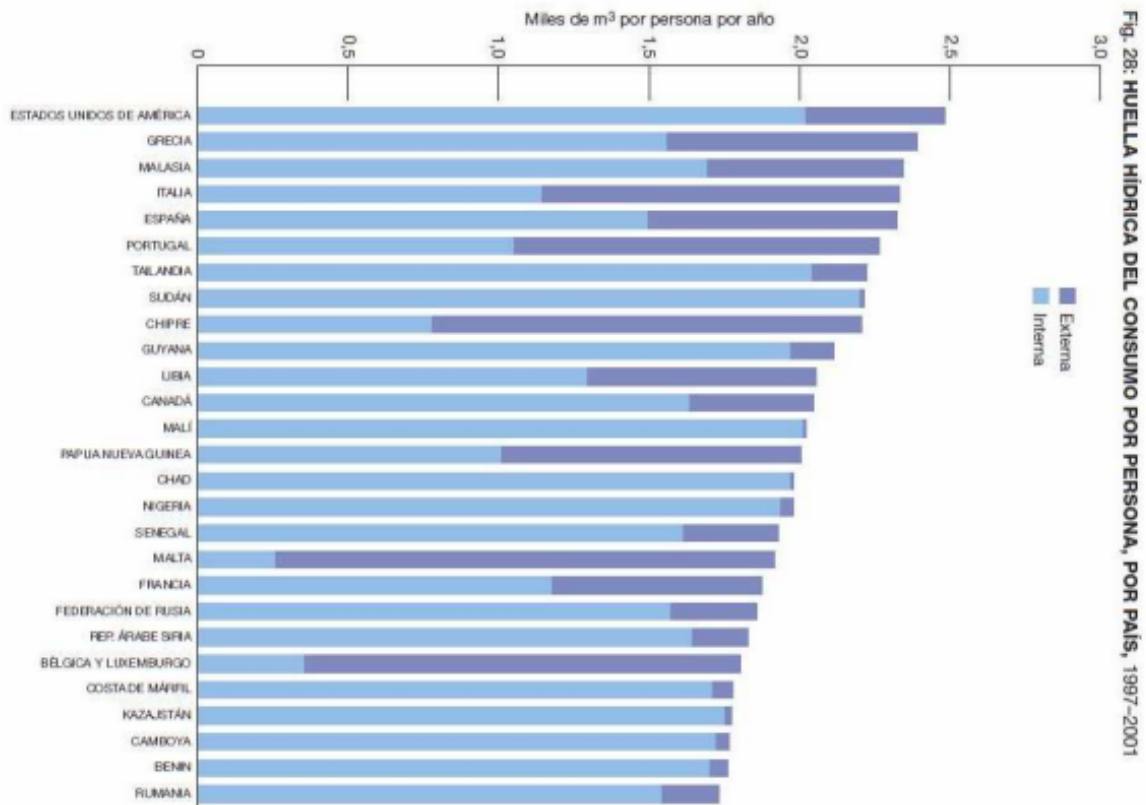
La huella hídrica es un indicador geográficamente explícito, que no sólo muestra los volúmenes de uso del agua y la contaminación, sino también las ubicaciones, sin embargo, la huella de agua no proporciona información sobre cómo afecta a los recursos locales, los ecosistemas y los medios de subsistencia. Las personas usan mucha agua para beber, cocinar y lavar, pero aún más para la producción de cosas tales como alimentos, ropa de algodón, etc. (p.24).

#### **4.3.2. La huella hídrica de una persona.**

Según lo planteado por Centa (2012):

“Es el volumen total de agua dulce consumida y contaminada para la producción de los bienes y servicios consumidos por la persona directamente, a través de nuestras actividades domésticas diarias, e indirectamente, como en el caso del agua necesaria para producir determinados alimentos que consumimos. Suele expresarse en términos de volumen de agua usada en un año, por ejemplo, en m<sup>3</sup> x año”. (p.2).

En la figura 4, se puede observar el comportamiento de la huella hídrica del consumo por persona por país.



**Figura 4. Comportamiento de la huella hídrica del consumo por persona**  
Fuente: Fundación Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (Centa, 2012).

### 4.3.3. La huella hídrica de un país

Así mismo, Centa (2012), plantea que la huella hídrica de un país es:

“Es el volumen total de agua utilizado globalmente para producir bienes y servicios consumidos y contaminados por sus habitantes. Incluye el agua sustraída de ríos, lagos y acuíferos para la agricultura, la industria y el uso domésticos, así como el agua lluvia utilizada para los cultivos. La huella hídrica total de un país tiene dos componentes. La huella hídrica interna es el volumen de agua necesario para cultivar y proporcionar los bienes y servicios que se producen y consumen dentro de ese país. La huella hídrica externa es el resultado del consumo de bienes importados, o, en otras palabras, el agua que se utiliza para la producción de bienes en el país exportador. (p.3)

#### **4.3.4. Importancia De la Medición de la “HH” En El Cultivo De Tomate.**

Teniendo en cuenta que las actividades agrícolas a nivel mundial en sus diferentes ramas utilizan alrededor del 70% del agua consumida en todo el planeta, con el método de medición de la huella hídrica “HH” aplicado al cultivo de “tomate”, podemos establecer estrategias y métodos de riego eficientes que permitan adelantarnos en la planificación del cultivo garantizando así una perspectiva desde una producción responsable aplicado a nuevas políticas y acciones correctivas en función de un uso y ahorro eficiente del recurso hídrico.

De esta manera, Linares, L y Melo, L (2015), plantea que:

La HH por lo tanto ofrece una perspectiva mejor y más amplia sobre cómo un consumidor o productor afecta el uso de sistemas de agua dulce. Se trata de una medida volumétrica del consumo de agua y su contaminación. Lo que no mide es la gravedad de los efectos locales en el medio ambiente del consumo de agua y su contaminación. La HH representa una información explícita a lo largo del tiempo y del espacio sobre cómo el agua es apropiada para diversos fines humanos. (p. 7).

También se puede definir H.H, como guía multidimensional que permite decretar los diversos volúmenes del recurso hídrico a utilizar por cada fuente, teniendo en cuenta índices de volumen de agua contaminada según el tipo de agente, estas valoraciones son esenciales si se tienen en cuenta las áreas establecidas y la zona de producción de tomate en lo que atañe a la cuenca.

A partir de estas nuevas tendencias como lo son la huella hídrica azul, huella hídrica verde y huella hídrica gris, según Tolón, A., Lastra, X., & Fernández, V. (2013), plantea que:

Para la gestión de los recursos naturales, se deben ir generando estrategias para la reducción del consumo de agua, por lo cual la sostenibilidad de los recursos hídricos

consumidos en un proceso, un producto, o por un consumidor o productor, depende de sus propias características (Tamaño de su huella hídrica); y de las condiciones del área geográfica. La sostenibilidad se puede entonces analizar desde una perspectiva ambiental, social o económica según el contexto del sector productivo en el que se está trabajando. (p.9).

#### **4.3.5. Metodología para la medición de la Huella Hídrica en el cultivo de Tomate “HH”.**

La huella hídrica se determinará aplicando la metodología para consumo de agua propuesta por Hoekstra *et al.* (2011), en los dos sistemas productivos de tomate antes mencionados.

La huella hídrica se calcula para cada ciclo productivo teniendo en cuenta las prácticas de manejo particulares aplicadas por cada productor, las condiciones climáticas y las características del suelo de cada lote de producción.

La huella hídrica total para cada ciclo productivo ( $HT_{proc}$ ) es el resultado de la suma de los componentes verde ( $HV$ ), azul ( $HA$ ) (Hoekstra *et al.*, 2011), así:

$$HT_{proc} = HV + HA \left[ \frac{\text{volumen}}{\text{masa}} \right]$$

Para determinar huella hídrica verde ( $HV$ ) y huella hídrica azul ( $HA$ ) en los cultivos se tiene en cuenta la evapotranspiración diaria ( $ET$ ,  $\text{mm d}^{-1}$ ) durante el ciclo productivo (Hoekstra *et al.*, 2011) Este cálculo se desarrolla a partir del modelo de evapotranspiración de Penman-Monteith determinado por la FAO siendo el más empleado en agricultura (Hoekstra *et al.*, 2011). Así mismo, Según el modelo de Penman-Monteith, la evapotranspiración de un cultivo bajo condiciones estándar consiste en la demanda evaporativa de la atmósfera sobre cultivos que crecen bajo condiciones óptimas de agua en el suelo, con características adecuadas tanto de

manejo como ambientales, y que alcanzan la producción potencial bajo las condiciones climáticas dadas. Esta evapotranspiración se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$ET_c[t] = K_c[t] \times K_s[t] \times ET_0[t]$$

Donde  $K_c[t]$  es el coeficiente de cultivo,  $K_s[t]$  es un factor adimensional de reducción de la transpiración que depende del agua disponible en el suelo, toma valores entre cero y uno y  $ET_0[t]$  es la evapotranspiración de referencia ( $\text{mm d}^{-1}$ ).

El valor de  $ET_0$  es la evapotranspiración de referencia, que se puede considerar como un parámetro climático que se calcula a partir de datos meteorológicos y expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad o en diferentes épocas del año. Esta variable no considera las características de cultivo ni los factores del suelo; para éste, se tiene en cuenta una superficie de referencia de un cultivo hipotético de pasto, con una altura de 0.12 m, con una resistencia superficial fija de  $70 \text{ s m}^{-1}$  y un albedo de 0.23. La superficie de referencia es muy similar a una superficie extensa de pasto verde, bien regada, de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo. La resistencia superficial fija representa un suelo moderadamente seco que recibe riego con una frecuencia aproximada de una semana (Allen *et al.*, 2006).

Para el cálculo de  $ET_0[t]$  ( $\text{mm d}^{-1}$ ), se utilizó el programa CROPWAT 8.0, software de la FAO desarrollado para la programación del riego el cual considera los datos sobre el clima, las propiedades del suelo y las características del cultivo como entradas. Dentro de las opciones de CROPWAT 8.0, se eligió calcular  $ET_c$  usando la opción de programación de riego, debido a la posibilidad de especificar el suministro de riego real de cada ciclo de tomate. Este método se recomienda debido a su precisión y aplicabilidad tanto para condiciones óptimas como no óptimas de crecimiento según lo propuesto por (Hoekstra *et al.*, 2011)



A partir de la información sobre la programación de riego, clima y las propiedades y características del cultivo el programa determina cada uno de los factores dentro de la siguiente ecuación arrojando también un valor de la evapotranspiración de referencia.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

En donde  $R_n$ : radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ );  $R_a$ : radiación extraterrestre ( $\text{mm día}^{-1}$ );  $G$ : flujo del calor de suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ );  $T$ : temperatura media del aire a dos metros de altura ( $^{\circ}\text{C}$ );  $u_2$ : velocidad del viento a dos metros de altura ( $\text{m.s}^{-1}$ );  $e_s$ : 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 ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) y  $\gamma$ : constante psicométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

El coeficiente de cultivo  $K_c$  varía en el tiempo, como una función de la etapa de crecimiento de la planta. Durante la etapa inicial y a mediados de temporada, el  $K_c$  es una constante y es igual a las constantes  $K_c \text{ ini}$  y  $K_c \text{ mid}$ , respectivamente. Todos los valores de  $K_c$  son obtenidos a partir de la base de datos CROPWAT 8.0, en la cual se insertan las características propias del cultivo según la temporada.

La etapa inicial está comprendida entre la fecha de siembra y el momento en que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo. La longitud de la etapa inicial depende en gran medida del tipo de cultivo, la variedad del mismo, la fecha de siembra y del clima. El final de la etapa inicial ocurre cuando la vegetación verde cubre aproximadamente un 10% de la superficie del suelo.

Durante el período inicial el área foliar es pequeña y la evapotranspiración ocurre principalmente como evaporación en el suelo. Por lo tanto, el valor de  $K_c$  durante el período

inicial ( $K_c$  ini) es alto cuando el suelo se encuentra húmedo debido al riego o lluvia, y es bajo cuando la superficie del suelo se encuentra seca (Allen y Pereira, 2006).

Durante la etapa de desarrollo del cultivo, el valor de  $K_c$  se incrementará linealmente de  $K_c$  ini a una etapa media de desarrollo de cultivo  $K_c$  mid la cual comprende el período de tiempo entre la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez.

El comienzo de la madurez está indicado generalmente por el comienzo de la vejez, amarillamiento o senescencia de las hojas, caída de las hojas, o la aparición del color marrón en el fruto, hasta el grado de reducir la evapotranspiración del cultivo en relación con la  $ET_o$  de referencia. La etapa de mediados de temporada es relativamente corta para los cultivos hortícolas que son cosechados frescos para aprovechar su vegetación verde.

Durante la etapa de mediados de temporada, el coeficiente  $K_c$  alcanza su valor máximo. El valor de  $K_c$  en esta etapa ( $K_c$  med) es relativamente constante para la mayoría de los cultivos y prácticas culturales como indica (Allen *et al.*, 2006).

La etapa final de la temporada o tardía de crecimiento comprende el período entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha. Se asume que el cálculo de los valores de  $K_c$  y  $ET_c$  finaliza cuando el cultivo es cosechado, secado al natural, alcanza la completa senescencia o experimenta la caída de las hojas, por esta razón el valor de  $K_c$  disminuye linealmente desde  $K_c$  mid hasta  $K_c$  fin (Mekonnen *et al.*, 2011).

El valor de  $K_c$  al finalizar la etapa final ( $K_c$  fin) refleja el efecto de las prácticas de cultivo y el manejo del agua. Si el cultivo es regado frecuentemente hasta el momento de su cosecha en fresco, el valor de  $K_c$  fin será alto. Si se permite la senescencia y secado del cultivo en el campo antes de la cosecha, el valor de  $K_c$  fin será bajo tal y como lo precia (Allen *et al.*, 2006).

Para la fase inicial que corresponde a los 30 primeros días, la  $K_c$  tiene un valor de 0.60; en la fase de desarrollo que corresponde a los 45 días seguidos se realiza una interpolación entre el

valor de  $K_c$  de la fase inicial y mitad de temporada; en la fase de mitad de temporada correspondiente a los siguientes 30 días el valor de  $K_c$  empleado es 1.15. Para el final de temporada que hace referencia a los días restantes para terminar el ciclo productivo se hace otra interpolación entre la  $K_c$  de mitad de temporada y la de final de cultivo; para final de cultivo se utiliza un valor de  $K_c$  de 0.80.

El valor de  $K_s$  (reducción de la transpiración) se calcula sobre una base diaria como una función de la humedad disponible en el suelo máxima y real en la zona de las raíces:

$$K_s[t] = \left\{ \frac{S[t]}{(1-p) \times S_{max}[t]} \right\} \text{ si } S[t] < (1-p) \times S_{max}[t]$$

Donde  $S[t]$  es la humedad disponible en el suelo real en el tiempo  $t$  (en mm);  $S_{max}[t]$  es el máximo de agua disponible en el suelo en la zona radicular, es decir, el agua disponible en el suelo en la zona radicular cuando el contenido de agua del suelo está a capacidad de campo (mm); y  $p$  es una fracción de  $S_{max}$  que indica la cantidad de agua que un cultivo puede extraer de la zona de las raíces sin sufrir estrés hídrico (Mekonnen *et al*, 2011).

Este parámetro también lo calcula el programa CROPWAT8.0 a partir de las características del suelo en la zona y del tipo de cultivo.

#### **4.3.6. Tipos de medición de la Huella Hídrica “HH”.**

##### **- Huella Hídrica “HH” Verde.**

La huella hídrica verde, es el volumen de agua lluvia consumida por la planta durante toda la etapa de producción. De esta forma la huella hídrica es el equivalente a la evaporación del cultivo anteriormente calculada. Así mismo, es considerada como apropiación humana de agua almacenada en el suelo para un uso antrópico indica el grado de competencia del sector agropecuario con los ecosistemas naturales.

Con el valor de la ETc se determina el uso de agua en el cultivo (UAC Verde, mm<sup>3</sup> ha), multiplicando el valor de ETc por el factor de 10 para expresar el valor en m<sup>3</sup> ha.

$$\text{UAC Verde} = \text{ETc} * 10$$

Con los valores de UAC Verde y el de rendimiento (ton m<sup>3</sup>), se determina la HV (m<sup>3</sup> t).

$$\text{HV} = \frac{\text{UAC Verde}}{\text{rendimiento}}$$

En el sistema productivo bajo invernadero, el valor de huella hídrica verde es cero ya que dentro del invernadero no hay aporte de agua por precipitación, este dato se debe tener muy preciso para este tipo de riego ya que se tiende a confundir en el registro de datos información capturada en campo.

- **Huella Hídrica “HH” Azul.**

La huella hídrica azul, es la apropiación humana de agua de los sistemas hídricos superficiales, subsuperficiales y subterráneos para una inercia antrópico que no retorna a la cuenca origen, marca los conflictos por uso en relación a la oferta hídrica disponible y, por tanto, aporta a establecer la vulnerabilidad del agua en una cuenca. De esta manera, Para determinar la HH azul en el sistema productivo a campo abierto se consideran dos componentes: uno en donde se tiene en cuenta el suministro de agua por riego en la cual, la huella azul se calcula a partir de la evapotranspiración total menos la precipitación, y la otra teniendo en cuenta el requerimiento hídrico del cultivo en donde se considera únicamente el aporte de agua por precipitación. Los cálculos se realizan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\text{ET Azul Total} = \text{ETtotal} - \text{ETc Verde}$$

$$ET\ Azul = ETc\ mm\ dec - Eff\ lluvia.\ mm\ dec$$

Con el valor de ET Azul total se determina el uso de agua azul en el cultivo (UAC Azul m<sup>3</sup> ha) multiplicando por el factor de 10 para expresar el valor en m<sup>3</sup> ha

$$UAC\ Azul\ m^3\ ha = ET\ Azul\ Total * 10$$

Después se determina la huella hídrica azul teniendo en cuenta el rendimiento de cultivo aplicando la siguiente ecuación:

$$HA = \frac{UACAzul}{rendimiento}$$

Posteriormente se calcula *ET Azul* total para determinar *UAC Azul m<sup>3</sup> ha* y con las ecuaciones anteriormente descritas.

Se asumió dentro de la metodología que *ETc* que dentro de los invernaderos fue del 75% de la *ETc* calculada por el modelo con datos climáticos externos, tal como fue indicado y revisado por Chapagain y Orr (2009).

#### - **Huella Hídrica “HH” Gris.**

Para el caso puntual de esta investigación, no se efectuó medición de este tipo de huella hídrica, sin embargo, es oportuno manifestar que en el caso en que se quiera determinar la huella hídrica gris se deberán considerar algunas sustancias contaminantes incluyendo el valor obtenido para el contaminante más crítico ya que representa el mayor volumen de agua empleado. Para el propósito de encontrar un indicador general de la contaminación del agua, la huella hídrica gris se basa en la sustancia contaminante más crítica. Por otro lado, si se quiere especificar el valor por separado de huella hídrica gris de una sustancia contaminante también se puede realizar según lo indica (Hoekstra *et al.*, 2011).

Es importante precisar que esta cifra ya está por encima de la disponibilidad de agua de más de 40 países. Es en estos casos que un país con limitados recursos hídricos puede preferir importar productos agrícolas que sean intensivos en el consumo de agua requerida para su producción.

Así pues, un país con escasez física o económica de agua depende de sus importaciones de agua virtual para satisfacer la demanda. Entendiéndose la escasez física como el acercamiento o la superación de los límites de sostenibilidad en el aprovechamiento de los recursos hídricos, y la escasez económica como la limitación al acceso de agua debido al limitado capital financiero, institucional y/o humano del país. (Parada, 2012)

Es así como si se quisiera en algún momento efectuar dicha medición y el cálculo de la huella hídrica gris para esta zona se tendría que crear una visión espacial del impacto que está tiene en el cultivo de “tomate” sobre la zona alta de la cuenca del Río Otún, presiones generadas sobre el recurso hídrico por la utilización y disposición en los procesos, llegando incluso al análisis desde el origen.

La utilización e implementación de esta metodología busca establecer mecanismos y una herramienta que brindará bases para la evaluación de los consumos y gastos generados en los diferentes procesos productivos del tomate, dando pie a la optimización y potencialización de estos en la zona de estudio, garantizando así que con menos aprovechamiento del recurso hídrico se obtenga una mayor productividad y eficiencia en este tipo de cultivos.

La cuenca hidrográfica como espacio de interacción socio ecológica, en la cual confluyen diversidad de actores, sirve como soporte para las relaciones entre el aprovisionamiento de los servicios ecosistémicos y las interacciones sociales, propias de los procesos de desarrollo que dan lugar a los diferentes cambios en las coberturas y usos del suelo. Estas dinámicas requieren a corto y mediano plazo acciones puntuales de planificación, orientadas no solo a la

gestión de los recursos hídricos, sino a garantizar un equilibrio entre el componente social y económico, representado en el aprovechamiento de los recursos naturales existentes en estos territorios de una manera armónica y sociable.

El Río Otún no está ajeno a estas competencias, si bien se constituye como la principal fuente abastecedora de agua para la ciudad de Pereira, Dosquebradas (Risaralda), parte importante de Cartago (Valle), también es un territorio estratégico por los diferentes servicios ecosistémicos que allí se desarrollan. Las dinámicas naturales, económicas y sociales presentes en la cuenca media y alta del Río Otún, han generado el desarrollo de proyectos de investigación orientados a fortalecer la Gestión Integral de Recurso Hídrico –GIRH, así como procesos enfocados a su planificación mediante la formulación y ejecución del Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas. (POMCA Río Otún).

De acuerdo con CTA, GSI-LAC, COSUDE, IDEAM (2015), la subzona hidrográfica perteneciente al Río Otún y otros directos al Cauca (área hidrográfica Magdalena-Cauca) presenta un Índice de Presión Hídrica a los Ecosistemas –IPHE en una categoría “crítica”, siendo una cuenca con competencia entre el sector agropecuario y los ecosistemas estratégicos para la provisión de servicios ecosistémicos, principalmente asociado a la ampliación de la frontera agrícola y en parte al turismo descontrolado.

Finalmente, y de acuerdo con el ajuste al Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Otún realizado en la fase de socialización y ejecución en el presente año, la unidad geográfica “Zona Alta” ubicada entre el nacimiento del río Otún y cercanías de la bocatoma multipropósito Nuevo Libaré (zona ubicada aguas debajo del área de estudio) presenta Índice de Uso del Agua – IUA asociado a la gran demanda para uso doméstico. Cabe resaltar que en esta zona se configuran actividades agrícolas y pecuarias que pueden aumentar la presión sobre el recurso hídrico.

A partir de lo anterior, se considera pertinente realizar un estudio más detallado de la dinámica del recurso hídrico a partir de la utilización del indicador de Huella Hídrica, garantizando así evaluar los sistemas tradicionales de producción y las nuevas alternativas para el uso y ahorro eficiente del recurso hídrico en esta zona de importancia ecosistémica para los municipios de Pereira, Dosquebradas, Cartago.

#### **4.3.7. Evapotranspiración**

Dentro de los ciclos naturales del agua en los procesos de crecimiento de un cultivo se dan varios y complejos procesos que, aunque aparentemente sencillos deben tenerse muy en cuenta en los cálculos para la medición de la huella de la huella hídrica “HH”, la Evapotranspiración es uno de estos procesos, y se trata de un fenómeno netamente físico que marca un cambio de estado del ciclo del agua de líquido a vapor. Esto también se contempla en los procesos de sublimación que observamos cuando el agua está en forma de nieve o hielo y pasan de forma directa a vapor sin pasar por un estado líquido.

Ahora bien, la evaporación tiene lugar desde la superficie del suelo y la vegetación y se da prácticamente desde el momento mismo que sucede la precipitación. Debido a varias razones naturales como las temperaturas, al viento, y la acción de la radiación solar, las gotas de agua que habían precipitado, acaban evaporándose. Podemos observar muy clara mente este fenómeno en las superficies de agua tales como ríos, en los lagos y embalses. También ocurre desde el suelo con el agua infiltrada al subsuelo. Suele evaporarse desde las zonas más profunda a lo más superficial de agua recién infiltrada o también en las áreas de descarga, por consiguiente, es importante tener en cuenta este dato dentro de la medición y obtención de datos en la zona objeto de estudio.

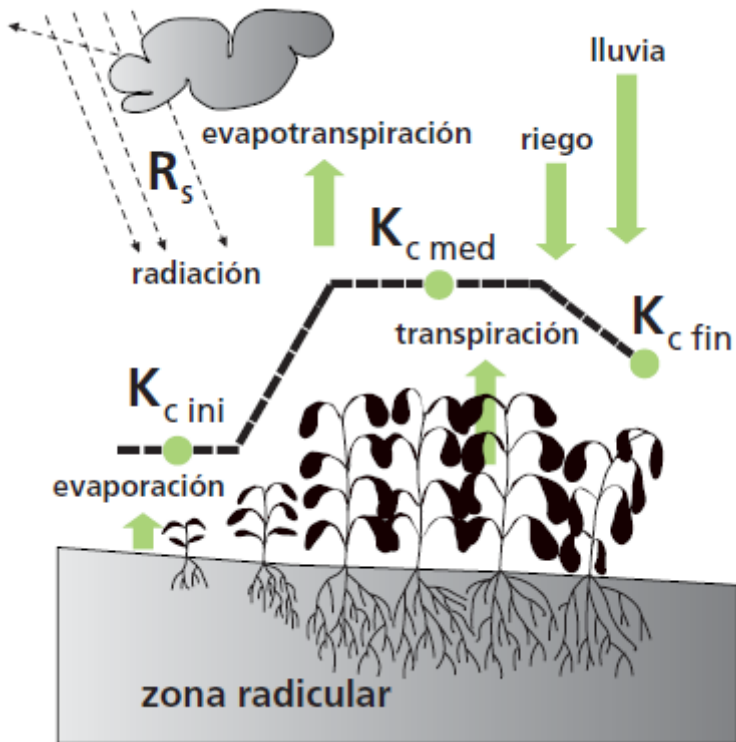
Por otro lado, el proceso de transpiración. Se trata de un fenómeno totalmente biológico que tiene muchos seres y para este caso puntual las plantas. Proceso seguido por el cual pierde



agua y la vierten a la atmósfera. Las plantas toman agua a través de las raíces desde el subsuelo. Parte de esta agua es aprovechada para su crecimiento y procesos nutritivos en funciones vitales y otra parte lo transpiran y emiten a la atmósfera.

Cabe mencionar que la ET es verde, cuando el agua proviene de la precipitación y es azul cuando el agua proviene del riego. En general, la cantidad de agua que transpiran las plantas es mucho mayor a la que retienen. Por lo tanto, la transpiración se considera como el consumo de agua por la planta; también es importante considerar las pérdidas de agua por evaporación del suelo tal y como lo precisa (Bolaños, 2011).

En la mayoría de los casos, la evapotranspiración se estima indirectamente por medio de un modelo que utiliza datos sobre el clima puntualmente de la zona o área de estudio, las propiedades del suelo y las características propias del cultivo. Hay muchas maneras alternativas para modelar ET y el crecimiento del cultivo. Uno de los modelos de uso frecuente es el modelo CROPWAT modelo que implementaremos dentro de esta investigación para la obtención de datos y resultados precisos, este modelo fue elaborado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.



**Figura 5. Evapotranspiración**

Fuente: (FAO, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, 2010).

#### 4.3.8. Características y Condiciones del Cultivo de Tomate “*Solanum Lycopersicum*”, en el País.

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una hortaliza perteneciente a la familia de las Solanáceas. De acuerdo con cifras de la FAO, su producción mundial es de alrededor 100 millones de toneladas al año (aproximadamente el 15 % de la producción total de hortalizas) como lo indica (Corpoica, 2007) De acuerdo con la FAO/ONU, entre 1985 y 2005, el consumo mundial per cápita tuvo un crecimiento cercano al 36% al pasar de 14 a 19 kg año<sup>-1</sup>.

Dentro de los principales países productores de tomate se ubican China, EE.UU, Turquía, India, Egipto, Italia, Irán, España, Brasil, México, Portugal, Grecia y Chile, produciendo el 65% de todo el volumen mundial. De este porcentaje, EE.UU. produce el 30% y la producción de la Unión Europea y China generan el 25 y 14%, respectivamente (Corpoica, 2007) El 70%

de la producción se destina a la elaboración de pastas, salsas, polvo de tomate, tomates deshidratados, concentrados y tomate pelado en trozos o cubos información tomada de (Asohorfrucol, 2006).

Para el contexto nacional, el tomate es el segundo cultivo hortícola que más se consume en Colombia, constituye el 15.98% de cultivos hortícolas tal y como lo indica (Jaramillo 2009). Su consumo anual per cápita es de 9.4 kg garantizando aproximadamente producción de 400,000 toneladas por un área de 16,000 ha.

Su producción es común a casi todas las regiones; sin embargo, dicho proceso se concentra principalmente en los departamentos de Cundinamarca, Norte de Santander, Valle del Cauca, Boyacá, Huila, Antioquia, **Risaralda** y Caldas sembrándose un total de 8,161 ha, a través del método productivo a campo abierto, y 607 ha implementado mediante el sistema de invernadero. El rendimiento promedio nacional según el Dane es de 18.91 y 93.77 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Boyacá es el principal departamento contribuyendo con el 28.4% de la producción nacional. Durante 2010, el área cosechada fue de 967 ha con una producción de 90,717 t y un rendimiento de 93.77 t ha<sup>-1</sup> (Dane, 2010). La principal zona productora de tomate en Boyacá es la provincia del Alto Ricaurte, la cual se encuentra enclavada en la Cordillera Oriental, y está compuesta por una serie de valles montañosos con altitudes que van desde los 2035 hasta los 2675 msnm. En esta zona se encuentran explotaciones en invernadero (300 hectáreas aproximadamente) y a campo abierto (alrededor de 80 hectáreas), distribuidas entre Villa de Leyva, Sáchica, Ráquira, Santa Sofía, Sutamarchán y Tinjacá. Dentro de los cultivos sembrados de tomate se encuentran: el tipo larga vida, Ichiban, Monito, Carpía y el tomate denominado Chonto según (Cárdenas, 2015).

El municipio de Villa de Leyva es el principal productor con un 53% de la producción del departamento. Durante 2011, municipios vecinos como Sáchica, Sutamarchán y Santa Sofía contribuyeron con 18.9% de la producción del departamento según lo precisa el (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2012) y el (Consejo municipal de Villa de Leyva, 2012).

Santander es otro departamento importante de producción nacional, el cual produce 20,764 t representando el 6,5% de producción nacional, en un área cosechada de 779 ha con un rendimiento de 26.6 t ha<sup>-1</sup>. Según (Ena, 2013) En este departamento se encuentra la provincia de Guanentá situada al sur-oriente del departamento, siendo su capital el municipio de San Gil. Presenta climas frío y templado, en los que la actividad económica principal es la agricultura, destacándose el cultivo de tomate producido bajo el sistema a campo abierto.

#### **4.3.9. Sistema Productivo y Generalidades Del Tomate En Colombia.**

Antes de indicar el sistema productivo, es importante precisar su origen esta es una especie que tiene dos centros de origen: uno en la parte noroccidental de Suramérica que se extiende en las zonas montañosas de Perú y Ecuador (Esquinas y Nuez, 1995) y otro en el imperio Azteca, en Tenochtitlan, lugar donde los conquistadores Españoles conocieron esta especie y desde donde la introdujeron a Europa. En ambos lugares hubo un proceso de domesticación según lo indica (Smith 1994).

Teniendo en cuenta lo anterior y que un sistema de producción agrícola, se puede definir como el conjunto de componentes físicos, bióticos, económicos y socio-culturales que se encuentran en permanente interacción para la generación y obtención final de un producto o recurso.

Se puede definir que el tomate en Colombia es cultivado básicamente a través de dos sistemas de producción: los cuales se denominan; a campo abierto donde se cultivan en la mayoría de los casos los tomates tipo “Chonto” esta práctica se precisa como subóptimas, y

bajo invernadero en sistemas relativamente intensivos que permiten tener control de las condiciones ambientales necesarias del cultivo, garantizando producciones optimas en menos tiempo.

Altura aproximada sobre el nivel del mar entre 0 y 1,500 m.s.n.m temperatura optima entre 15 y 25°C, humedad relativa: 60 y 85%, el requerimiento hídrico indica precipitaciones entre 1.500 y 2.500 mm/año, bien distribuidas, suelos profundos de textura franca, rango de pH se adapta bien a pH ácido entre 6 y 7, observaciones a tener en cuenta durante el proceso de producción alta susceptibilidad a las heladas, al exceso de agua y a la falta de luz.

- **Suelo.**

La producción de tomate se realiza bajo invernadero o al aire libre. Bajo condiciones de invernadero, no es exigente en cuanto a suelos, pero sí requiere de un buen drenaje, por lo que es importante construir canales que eviten la acumulación de agua en el suelo. Requiere de un alto contenido de materia orgánica y suficiente agua. Es importante tener en cuenta que el tomate debe disponer de suelos bien aireados con la capacidad de almacenar agua, aunque prefiere suelos sueltos con textura franca y altos contenidos de materia orgánica. El pH debe oscilar entre 6 y 7. La conductividad eléctrica óptima está entre 1,5 y 20 dS/m. La productividad y sostenibilidad de los suelos dependen de un manejo adecuado de las propiedades físicas (textura, densidad, porosidad, entre otras), las cuales determinan la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

La textura precisa suelos con cantidades aproximadamente iguales de arena, limo y arcilla, cuya textura ha de ser franca. Los denominados suelos medianos son ricos en nutrientes, no se encharcan y son fáciles de cultivar. Son considerados los mejores suelos para la producción agrícola.

La densidad aparente determina la fertilidad y el grado de compactación del suelo. Puede variar entre 0,3 – 0,8 g/cm<sup>3</sup> en los suelos con alto contenido de materia orgánica o suelos arcillosos, y entre 1,3 – 1,8 g/cm<sup>3</sup> en suelos con textura arenosa o compactados según (Suárez, 1986). Los suelos con densidad aparente mayor a 1,8 g/cm<sup>3</sup> limitan el desarrollo radical.

Con respecto a la porosidad importante para el movimiento y retención del agua en el suelo. El tamaño para dar equilibrio entre los macroporos y los mesoporos está entre 1 y 3 mm, pues permite el suministro de aire adecuado para el desarrollo de los cultivos. La capacidad de retención de agua es una de las características más importantes del suelo para cultivos ya que determina la cantidad y frecuencia de los riegos como lo indica el mismo (Suárez, G., 1986).

#### - **Condiciones Climáticas.**

El tomate es una hortaliza de clima cálido y moderado, susceptible a heladas y temperaturas bajas. Crece en temperaturas que oscilan entre 20 a 25°C en el día y de 15 a 20 °C en la noche, favoreciendo así el desarrollo normal de los procesos bioquímicos, el crecimiento vegetativo, la floración y la fructificación.

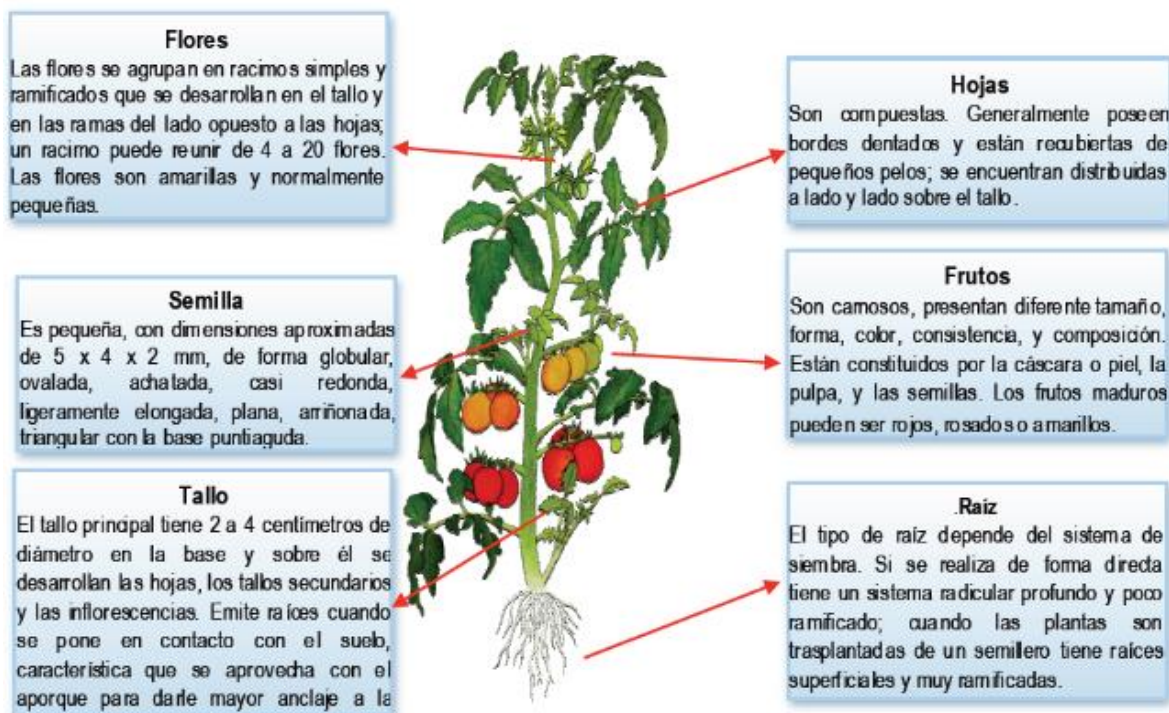
Bajo invernadero la temperatura mínima para la producción de tomate es de 8-12°C. Temperaturas inferiores y prolongadas debilitan la planta generando progresiva decadencia o muerte. La temperatura máxima no debe superar los 32° C, ya que a temperaturas superiores se estimulan los procesos bioquímicos y la toma de nutrientes, siendo excesivos y agotadores para la planta; además, con las altas temperaturas se presentan desórdenes fisiológicos, se detiene la floración y la planta puede incluso llegar a morir.

La humedad relativa ideal para el desarrollo, crecimiento y fertilidad del cultivo de tomate oscila entre el 60% y el 85%. Se requiere de 6 a 8 horas diarias de luz. En lo que nos compete a nosotros el riego se debe suministrar frecuentemente y de manera uniforme, ya que la

insuficiencia de agua influye negativamente en el desarrollo y en la producción tal y como lo precisa (Escobar y Lee, 2001).

#### 4.3.10. Descripción Botánica y Morfológica de Tomate.

El tomate es una planta perenne anual de porte arbustivo; se desarrolla de forma rastrera semirrecta o erecta. Según el hábito de crecimiento, las variedades se dividen en determinadas e indeterminadas. En las variedades determinadas el crecimiento es limitado, de tipo arbustivo, bajo, compacto y la producción de fruto se concentra en un periodo relativamente corto. Las indeterminadas presentan inflorescencias laterales y su crecimiento vegetativo es continuo según (CENTA, 1996).



**Figura 6. Descripción botánica y morfológica del tomate.**

Fuente: Corpoica, 2007.

Las características físico-químicas indican que el fruto es fuente de vitaminas A, B1, B2, B6, C y E, y de minerales como fósforo, potasio, magnesio, manganeso, zinc, cobre, sodio, hierro y calcio. Tiene un importante valor nutricional ya que incluye proteínas, hidratos de

carbono, fibra, ácido fólico, ácido tartárico, ácido succínico y ácido salicílico. El aporte de cada 100 g de nutrientes del tomate en agua es del 93,5%. En cuanto a calorías es de 23 kcal, proporcionando al organismo la energía que necesita para realizar las actividades diarias. La cantidad de aminoácidos del tomate se combinan para formar proteínas, las cuales son usadas por el organismo para formar los músculos y también son necesarias para mantener la masa muscular.

Las características organolépticas se definen en su forma aunque la mayoría de los frutos son redondeados, su forma puede diferir según la variedad (esférica, alargada, periforme, etc.). El tamaño y peso varía de entre los 3 centímetros (tomate cherry) hasta más de 10 centímetros (milano o larga vida), el peso puede variar entre 80 y 300 gramos, su color determinante se observa de verde a rojo, de acuerdo a la variedad y el grado de maduración del producto su sabor es general y ligeramente ácido con un particular toque dulce.


	Elemento	Cantidad	Elemento	Cantidad
	Agua	93,50%	Calcio	7mg
	Proteína	0,9 g	Hierro	0,7mg
	Grasa	0,1g	Vitamina A	1,1UI
	Calorías	23 kcal	Vitamina B1	0,05mg
	Carbohidratos	3,3g	Vitamina B2	0,02mg
	Fibra	0,8g	Vitamina C	20mg
	Fósforo	19mg	Niacina	0,6mg

Figura 7. Composición nutricional del tomate por 100 gramos de tomate fresco  
Fuente: Recuperado de: <http://vyhsaludables.blogspot.com/>

#### 4.3.11. Ciclo Fenológico del Cultivo de Tómate.

El cultivo de tomate presenta varias etapas de desarrollo durante su crecimiento, las cuales difieren en cuanto a las necesidades de agua y nutriente frente al desarrollo mismo de la



planta. Es importante resaltar que los tiempos son indicativos, ya que pueden ser diferentes dependiendo de la variedad, del manejo del cultivo y de la zona en la cual se establece el cultivo (SQM, 2015).

Para el establecimiento de la planta, se indica que el tomate es un cultivo que puede ser anual o perenne. Germina de cuatro a siete días después de sembrada la semilla. La raíz empieza a desarrollarse y comienza la formación de la parte aérea de la planta, su crecimiento vegetativo en este período indica que la planta crece rápidamente, floreciendo y desarrollando frutos. Pasados 70 días, el desarrollo vegetativo es mínimo, así como la acumulación de materia seca en hojas y tallos.

La floración y cuaja inicia alrededor de 20-40 días después del trasplante (dependiendo de la variedad, las condiciones medioambientales y el manejo del cultivo) y continúan durante el resto del ciclo de crecimiento. Con el fin de promover la cuaja, se realiza la polinización por medio de abejas, viento y aplicación de hormonas (auxinas).

El fruto inicia a desarrollarse y a crecer acumulando en este periodo la mayor cantidad de materia seca en la fruta a un ritmo relativamente estable, logrando en poco tiempo la madurez fisiológica de la fruta entre 80 a 120 días después del trasplante. La cosecha es permanente; sin embargo, se puede ver limitada por factores climáticos (heladas) o factores externos determinados en la estabilidad del mercado, como indicadores económicos (precio del tomate).

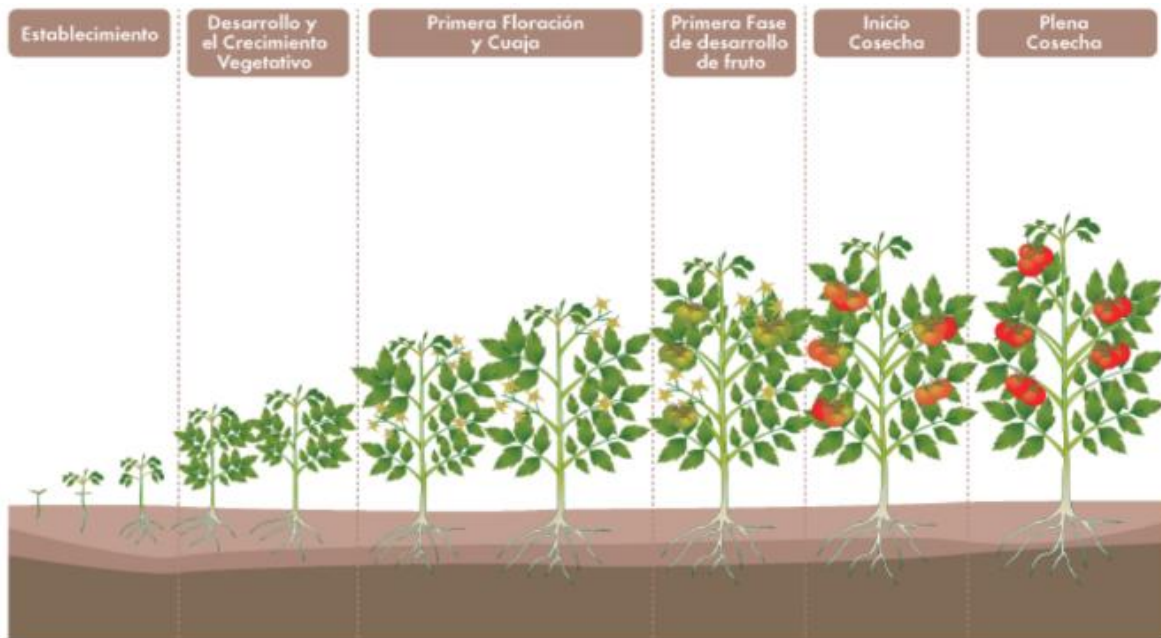


Figura 8. Ciclo fenológico del cultivo de tomate  
Fuente: SQM, 2015.

#### 4.3.12. Índice De Presión Hídrica En Los Ecosistemas

Estudios nacionales referentes a índices relativos al agua efectuados con anterioridad al ENA 2014, denominan el indicador de índices de presión al recurso hídrico como “Escasez de Agua Azul y Escasez de Agua Verde”. El IDEAM ha considerado pertinente, cambiar este nombre con el fin de obtener coherencia y conformidad con trabajos anteriores realizados, por Índice de Agua no Retornada a la Cuenca (IARC) e Índice de presión Hídrica a los Ecosistemas (IPHE) respectivamente.

El crecimiento de la frontera agrícola, afecta de manera directa y tangencial la sostenibilidad del abastecimiento en el tiempo de los servicios ecosistémicos en las cuencas. Se han determinado 6 clases de valores que admiten determinar el estado del indicador, en cada una de las subzonas en Colombia. Estas son estado Crítico, valores mayores a 1; Muy Alto valores entre 0.8 y 1; Altos, para valores entre 0.5 y 0.8; Moderado, valores entre 0.3 y 0.5 y Bajo y Muy Bajo para valores por debajo de 0.3.

La tabla que se presenta a continuación, indica la posición que ocupa el Río Otún en lo referente al Índice de Presión Hídrica a los Ecosistemas (IPHE), ubicando esta cuenca en el octavo lugar entre las 22 subzonas hidrográficas (SZH), presentando un IPHE, crítico.

El cálculo de Índice de Presión Hídrica a los Ecosistemas, se consigue dividiendo la sumatoria de la “H.H”. Verde total del sector agropecuario, entre la Disponibilidad de Agua Verde (DAV) total, por subzona Hidrográfica;

Entonces la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$IPHE = \frac{\sum HHVERDE}{DAV}$$

**Tabla 2. Subzonas Hidrográficas Con IPHE Crítico.**

SZH	Subzona hidrográfica	Área hidrográfica	IPHE
3501	Río Metica (Guamal-Humadea)	Orinoco (3)	1,77
4505	Río Luisa	Amazonas (4)	1,47
2634	Río Cali	Magdalena Cauca (2)	1,44
2405	Río Sogamoso	Magdalena Cauca (2)	1,34
2314	Río Opón	Magdalena Cauca (2)	1,26
2903	Canal del Dique margen derecho	Magdalena Cauca (2)	1,22
1204	Río Canalete y otros arroyos Directos del Caribe	Caribe (1)	1,21
2613	Río Otún y otros directos al Cauca	Magdalena Cauca (2)	1,21
2303	Directos al Magdalena entre ríos Seco y Negro (md)	Magdalena Cauca (2)	1,20
1303	Bajo Sinú	Caribe (1)	1,19
1206	Arroyos Directos al Caribe	Caribe (1)	1,18
2637	Ríos Las Cañas, Los Micos, y Obando	Magdalena Cauca (2)	1,16
2120	Río Bogotá	Magdalena Cauca (2)	1,14
2607	Río Guachal (Bolo, Fraile y Parraga)	Magdalena Cauca (2)	1,13
2904	Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura al mar Caribe (mi)	Magdalena Cauca (2)	1,10
2609	Río Amaime y Cerrito	Magdalena Cauca (2)	1,09
2615	Río Chinchiná	Magdalena Cauca (2)	1,07

1116	Río Tolo y otros Directos al Caribe	Caribe (1)	1,07
2601	Alto Río Cauca	Magdalena Cauca (2)	1,04
2632	Ríos Guabas, Sabaletas y Sonso	Magdalena Cauca (2)	1,04
2612	Río La Vieja	Magdalena Cauca (2)	1,02
5310	Río Anchicayá	Pacífico (5)	1,00

Fuente: Evaluación multisectorial de la huella hídrica en Colombia (2014).

El Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) del Río Otún (2017), elaborado por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda “CARDER”, con el convenio del Consorcio de Ordenamiento Cuenca Otún (2016), ilustra el uso del suelo en la cuenca del Río Otún.

El área total del POMCA Otún 2017, asciende a 56.840 Hectáreas y está ubicado en el centro occidente de Colombia; en lo referente a la cobertura y usos de la tierra y específicamente al uso agrícola se observa un alto porcentaje dedicado a café y cultivos permanentes arbustivos con el 4.81% de cobertura, cultivos de caña y plátano con 1.54%, la sumatoria de sorgo y maíz el 0.22% y finalmente leguminosas confinadas entre las que se ubican el Tomate con el 0,02%, equivalente a 1.5 Hectáreas aproximadamente.

La siguiente tabla con información extraída del POMCA Río Otún 2017, muestra el posicionamiento de las leguminosas confinada “Tomate” frente a otros cultivos predominantes en la cuenca del Río Otún.

**Tabla 3. Posicionamiento de las leguminosas confinada “Tomate” frente a otros cultivos predominantes en la cuenca del Río Otún.**

Categoría del cultivo	Tipo de cultivo	Ha.	%
<b>Cereal</b>	Maíz	102	0,22
	Sorgo	19,6	
<b>Leguminosas</b>	Confinados	1,5	0,02
<b>Hortalizas</b>	Tomate	--	0,05

<b>Cultivos Permanentes</b>	Caña	--	1,54
<b>Herbáceos</b>	Plátano	--	
<b>Cultivos Permanentes</b>	Café	--	4,81
<b>Arbustivos</b>	Perm. Arbustivos	--	
<b>Cultivos permanentes arbóreos</b>	Cítricos	--	0,5
<b>Pastos limpios</b>		--	6

Fuente: Elaboración propia (POMCA 2017)

El uso y la implementación de esta metodología a través de la Huella Hídrica como herramienta de apoyo a la gestión integral del recurso hídrico han sido adoptados en instituciones nacionales. Teniendo en cuenta las proyecciones de demanda hídrica total para Colombia a 2022, elaboradas en el marco del Estudio Nacional del Agua –ENA por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible –MADS y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM en el año 2014, ubican al sector agrícola con los requerimientos más altos en comparación con los demás sectores socioeconómicos, proyectándose un uso de agua total de 39.526 millones de metro cúbicos, representando un incremento del 135,8% en comparación con la información disponible para el año 2012, así mismo es importante evidenciar que para el año 2018 según el reporte de avance del estudio nacional del agua se observa que el sector agrícola cuenta con un 66% del agua concesionada del País.

La información disponible en el año 2010, 2014 y 2018 del ENA (estudio que se realiza cada 4 años) ratifican los requerimientos del sector agrícola en términos de recurso hídrico, siendo necesaria la implementación de acciones puntuales frente a su racionalización, así como un uso eficiente.

## **5. Aspectos Metodológicos**

### **5.1. Tipo de investigación**

La metodología de investigación abordada es de carácter descriptivo, ya que “Se propone este tipo de investigación para la alineación de la información a la que se accederá a lo largo de la investigación, es describir de modo sistemático las características de una población, situación o área de interés” (Tamayo, 1987, pág., 44). Por cuanto, el estudio requiere evaluar e identificar la gestión integral del recurso hídrico en la producción de un tipo de cultivo de Tomate, a través de dos sistemas de riego; el Tradicional y Automatizado Invernadero.

La naturaleza de la información será de carácter cualitativo, ya que “su función puede ser describir o generar teoría a partir de los datos obtenidos” (Lerma, 2001, p. 37), es decir, cada una de las variables expuestas en el análisis del contexto. Cabe destacar que esta investigación también utilizara información de carácter cuantitativo, debido a que hace énfasis a un tipo de pensamiento deductivo donde se evalúa la “recolección de datos para probar una hipótesis por medio de una medición numérica y el análisis estadístico para establecer patrones, comportamiento y comprobar teorías (Hernández et al., 2014), lo que permitirá evaluar el desempeño de los diferentes procesos de ejecución de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica.

El método de estudio es experimental, dado en este tipo de estudios se manipula una o más variables por parte del investigador, con el fin de tener un control de su comportamiento, conocer sus puntos de aumento o disminución de las variables y el efecto que generan en los diversos comportamientos observadas. De acuerdo con Murillo (s.f), este método se basa en:

Hacer un cambio en el valor de una variable (variable independiente) y observar su efecto en otra variable (variable dependiente). Esto se lleva a cabo en condiciones rigurosamente

controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular. (p.5)

Así mismo, el método desarrollado será el de observación directa, ya que se considera efectivo y eficiente al ser uno de los métodos más utilizados e históricamente el más antiguo. Su aplicación es muy eficaz cuando se consideran estudios de procesos de ejecución de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica. Algunos procesos de campo permiten una observación directa, pues el elevado volumen de contenido manual puede ser fácilmente verificado mediante la observación visual.

Este método, al no producir, todas las respuestas no disipan todas las dudas, por lo cual generalmente está acompañado de entrevistas y discusión con los productores de tomate, ya que la simple observación, sin el contacto directo y verbal con el ejecutante, no permite la obtención de datos realmente importantes para el análisis, además de tener un costo elevado, pues el método, para ser completo, necesita un tiempo muy prolongado.

De igual forma, la presente investigación adopta la metodología cuantitativa no experimental en tiempo transversal. Cuantitativo debido a que hace énfasis a un tipo de pensamiento deductivo donde se evalúa la “recolección de datos para probar una hipótesis por medio de una medición numérica y el análisis estadístico para establecer patrones, comportamiento y comprobar teorías (Hernández et al., 2014), lo que permitirá evaluar e identificar la gestión integral del recurso hídrico en la producción de un tipo de cultivo de Tomate, a través de dos sistemas de riego; el “Tradicional y Automatizado Invernadero. No experimental transversal puesto que solo se realiza la recopilación de información con el fin de detallar sus variables o estudiar su recurrencia e interrelación en un determinado momento en un tiempo establecido, es no experimental por que esta se realiza sin manipular las variables,

se basa en la observación de cómo se dan las cosas en su contexto natural para después ser correctamente analizados, allí los sujetos de estudios son observados en su ambiente natural.

## **5.2.Diseño experimental**

Se ejecutarán los diversos aspectos metodológicos a través del planteamiento desarrollado por Hoekstra et al., (2011) en el documento “The Water Footprint Assessment Manual”, Así mismo, se tendrá en consideración los lineamientos concretos y la ubicación geográfica, las cuales están contempladas y propuestas por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura -IITA en la “Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica”.

El enfoque y la elección de la metodología experimental se desarrollaron basado en los siguientes aspectos:

- Caracterización de la zona de estudio en términos de gestión de recurso hídrico.
- Análisis de la huella hídrica.
- Formulación de estrategias.

### **5.2.1. Caracterización de la zona de estudio en términos de Gestión de Recurso Hídrico**

La fase del proyecto se sitúa en describir los contextos actuales de los sistemas de producción agrícola en la cuenca media del río Otún, lo cual permitirá identificar las dinámicas y sus diversos procesos, los cuales requieren la utilización del recurso hídrico para de esta manera poder saber cómo están las condiciones y herramientas utilizadas para el proceso productivo.

Se realizará la revisión bibliográfica y la información secundaria la cual está relacionada con la zona de estudio, especialmente la cuenca media del río Otún, como actividad inicial. Se logrará una caracterización inicial que permita determinar la dinámica de la producción agrícola en la zona de estudio como resultado, y su relación con la empleabilidad del recurso hídrico.



Se ejecutarán múltiples visitas de campo y las valoraciones respectivas en los cultivos objetivo priorizados, para la obtención de la siguiente información que permitirá determinar el cálculo de la H.H.:

- Personalización e identificación de los usos del suelo.
- Fichas climáticas y datos de precipitación para la cuenca media del río Otún.
- Datos e información de riego de los cultivos priorizados.
- Particularidades del suelo en el área de estudio.

### **5.2.2. Análisis de Huella Hídrica**

A partir de la metodología propuestas enfocada a identificar la gestión integral del recurso hídrico en la producción de un tipo de cultivo de Tomate, a través de dos sistemas de riego; el “Tradicional y Automatizado Invernadero, cabe resaltar que el desarrollo se basa en 3 etapas. Estas fases estarán sujetas y alineadas a establecer diversos componentes, los cuales son:

#### **A. Definición de objetivos y alcances.**

Se debe determinar y establecer cuál será el objeto de estudio, para crear un enfoque claro y conciso sobre el propósito a desarrollar y la definición de las variables que se pretenden evaluar. De esta manera, su orden estará encaminada a la evaluación la huella hídrica para el cultivo de tomate en la zona de estudio.

Es necesario dar prioridad a los cultivos que generar mayor trascendencia en el sector y en la zona, logrando un alcance bien detallado, apoyados en aspectos ambientales, sociales, culturales y económicos.

#### **B. Utilización y caracterización de los recursos hídricos.**

Por medio de la utilización y caracterización del recurso hídricos, se podrá generar la contabilidad de la Huella Hídrica en los sistemas de producción agrícola evaluados, así mismo, se procede a la aplicación de la metodología planteada, con base al modelo seleccionado (Water

Footprint Network). De esta manera, se ejecutará y cumplirá con el cálculo de la Huella Hídrica Verde y Huella Hídrica Azul en los cultivos de tomate en la primera fase del proyecto.

- Cálculo de la evapotranspiración del cultivo.

A partir de ICA (2017a), se manejará y se llevará a cabo el cálculo de la evapotranspiración de cultivos recomendado por la FAO (Food and Agriculture Organization). La evapotranspiración del cultivo (ETc) es calculada, como la evapotranspiración de referencia (ET0) multiplicada por el coeficiente del cultivo Kc:

$$ETc = Kc \times ET0$$

En donde:

ETc: Evapotranspiración potencial del cultivo

Kc: Coeficiente del cultivo.

ET0: Evapotranspiración de referencia

El cálculo de la evapotranspiración de los cultivos evaluados estará basado en la implementación de los softwares CROPWAT (FAO) y Clima/ET0 (FAO), con aplicación en el cálculo de la HH.

Así mismo, se evaluarán y se determinarán los componentes azul y verde de la huella hídrica de los cultivos evaluados, partiendo de la evapotranspiración de los cultivos, se realizarán los cálculos correspondientes a las H.H. Verde y H.H. Azul, aplicando lo siguiente:

$$\text{Requerimiento de riego} = \text{Requerimiento hídrico de cultivo} - \text{Precipitación efectiva}$$

$$ET_{\text{azul}} = \min(\text{Riego neto total}, \text{Requerimiento de riego})$$

$$ET_{\text{verde}} = \min(\text{Requerimiento hídrico de cultivo}, \text{Precipitación efectiva})$$

### **C. Estimación de la Huella Hídrica y comparación con otros cultivos**

Al generar los resultados correspondientes a través del software CropWat 8.0 y las dinámicas de uso del recurso en terreno de estudio, se ejecutará la estimación de las diferentes huellas

hídricas. Así mismo, la información base sobre la cual se realiza el cálculo de los requerimientos hídricos pertenecerá a las dinámicas propias de la zona de estudio. De igual forma, se ejecutarán a las tipologías en el proceso productivo que se lleva a cabo en la finca, sobre la cual se suministró la información respecto a los rendimientos del cultivo.

### **5.2.3. Formulación de estrategias**

Partiendo de los resultados conseguidos en el cálculo de la H.H., así como las dinámicas de la producción agrícola para los cultivos estimados, se crearán y se proponen diversas estrategias que contribuirán a disminuir la presión sobre el recurso hídrico, a través de nuevas técnicas disponibles.

La base de la formulación de las estrategias se basa en instrumentos de planificación propuestos e implementados a nivel de cuenca hidrográfica, lo que permite una coherencia, eficiencia, y articulación de conservación del recurso.

## **6. Resultados y discusión**

A continuación, se presenta la información recolectada en el trabajo de campo, inicialmente se realiza una localización desde una perspectiva macro y micro del área de estudio, donde caracteriza el cultivo, se muestran los resultados de los elementos de promoción y finalmente los comentarios de la aplicación, para posteriormente realizar el análisis de los resultados. Cabe resaltar que esta investigación de campo se soporta sobre los datos reportados por las estaciones Hidroclimatológicas (antes de la bocatoma nuevo libare) y la estación climatológica Lisbrán

### **6.1. Caracterización de la zona de estudio - Macrolocalización**

- Departamento de Risaralda

El departamento de Risaralda es uno de los 32 departamentos de Colombia. Cuenta con una población de 863.663 habitantes. La capital es Pereira que cuenta con el 56% de su población total y las principales ciudades son Dosquebradas, Santa Rosa de Cabal y La Virginia.

Cuenta con una superficie de 4.140 km<sup>2</sup> lo que representa el 0.36 % del territorio nacional. Limita por el Norte con los departamentos de Antioquia y Caldas, por el Este con Caldas y Tolima, por el Sur con los departamentos de Quindío y Valle y por el Oeste con el departamento de Chocó. (DANE, 2013)

Está conformado por una zona central de topografía ligeramente ondulada con una altura promedio inferior a los 2.000 msnm. Esta zona esta bordeada por las cordilleras Central y Occidental, la Central supera los 4.500 msnm en los Nevados de Santa Isabel y Quindío y la Occidental alcanza en promedio los 4.000 msnm en el Cerro Tatamá; las dos cordilleras están separadas por el cañón del río Cauca. (Gobernación de Risaralda, 2013)

Cabe resaltar que las cabeceras de los Municipios se encuentran entre identificados por 4 pisos térmicos determinados, así: cálido (8.9%), medio (51%), frío (31%) y páramo (8.9%). La temperatura promedio de la región oscila entre 18 y 21 °C.

- Cuenca del Rio Otún

Esta investigación se focaliza en la cuenca hidrográfica del río Otún la cual abarca un área de 568.41 Km<sup>2</sup>, corresponde a la vertiente Occidental de la Cordillera Central y su piedemonte, que nace en el caño Alsacia, afluente de la laguna del Otún, a una altura de 3980 m.s.n.m. y desemboca en el río Cauca a los 875 m.s.n.m., tras un recorrido de 60.8 Km, en sentido ESE-WNW, siendo sus principales afluentes a nivel de subcuencas: Río Azul, Río Barbo, Río San José, Quebrada Combia y Quebrada Dosquebradas. (POMCA Río Otún, 2017).

La cuenca del río Otún, cuenta con una red meteorológica de 46 estaciones, de estas solo 26 presentan la mayor extensión de datos. Las entidades que involucran el monitoreo son: el IDEAM, CENICAFE, la CHEC y la REDH operada por el grupo EIS de la UTP. Para esta investigación, las más relevantes son: La estación climatológica (EC), Lisbrán; Las estaciones meteorológicas Especiales (ME), San Juan, San José, Mundo Nuevo y el Lago; Pluviómetros (PV), Playa Rica, Nuevo Libare y Combia; Pluviógrafos (PG), Planta de Tratamiento y por último Sinóptica Principal (SP), Aeropuerto Matecaña.

La cuenca ha sido dividida en tres tramos:

- Cuenca alta, que va desde su nacimiento hasta las Microcuencas Volcanes y La Bananera – La Bella.
- Cuenca media, inicia en la quebrada San José, hasta la desembocadura de la quebrada Dosquebradas.

- Cuenca baja, a partir de la microcuenca Combia Alta hasta su desembocadura en el río Cauca.

La figura 9, permite la identificar la localización de la cuenca del río Otún y su ubicación geopolítica.



**Figura 9. Ubicación de la cuenca río Otún.**

Fuente: POMCA Río Otún 2017.

Según datos del documento CARDER (2008), El perfil longitudinal del río Otún, es cóncavo hacia la parte alta. La pendiente varía desde un 27% en la parte alta hasta 5% en la parte media y a un 2% en la parte baja, significando que la velocidad del flujo, su capacidad de erosión y arrastre de materiales disminuye aguas abajo, garantizando de alguna manera que en la parte alta de la cuenca la oxigenación sea más alta garantizando en términos de descontaminación unas condiciones óptimas por el modelo hidráulico del mismo.

La cuenca del río Otún se asemeja a una forma oval oblonga, lo que significa que es poco susceptible a las crecidas, ya que su coeficiente se aleja de 1, que es cuando la cuenca es más peligrosa por su tendencia a ser redonda. Esta forma de la cuenca, significa que el tiempo de concentración es mayor, es decir, que retarda la acumulación de las aguas al paso del río por su punto de desagüe. (CARDER, 2008).

En la tabla 4, se detallan los parámetros morfométricos de la cuenca del río Otún, según datos de la CARDER:

**Tabla 4. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Otún**

PARÁMETRO	VALOR
Ancho promedio (Ap)	6.62 Km
Factor de forma (Ff)	0.09
Coefficiente de compacidad (Kc)	2
Densidad de drenajes	3.60 Km/Km <sup>2</sup>

Fuente: CARDER (2008).

De acuerdo al estudio publicado por la CARDER (2004) denominado “Sectorización Hidrográfica Del Departamento de Risaralda”, construido por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda “CARDER”, para ese año, la cuenca del río Otún estaría conformada por 5 subcuencas que se dividen en:

- Río Barbo
- Río Azul
- Quebrada Dosquebradas
- Río San José
- Quebrada Combia

Es importante detallar, que según CARDER (2004), estas contienen “50 Microcuencas y franjas hidrográficas con áreas que oscilan entre 300 y 2500 hectáreas”.

- Oferta hídrica de la cuenca del Río Otún

En el año 1997 se ejecutó el primer estudio de oferta y demanda hídrica en la zona oriental del Departamento, margen derecha del Río Cauca (subregión 1), por la CARDER, las

Empresas Públicas de Pereira (desaparecidas) y el Comité de Cafeteros del Departamento de Risaralda. Este estudio se realizó por medio del postgrado en aprovechamiento de recursos hidráulicos de la Universidad Nacional de Medellín, utilizando el Software Hidrosig. Java.

Este Software permitió modelar algunas variables hidrometeorológicas como evaporación, temperatura y precipitación; crea y proyecta cálculos hidrológicos a largo plazo, establece caudales máximos y mínimos, en periodos de retorno puntuales, por el procedimiento de las características medias y cálculo de curva de duración de caudales en cualquier lugar de la zona de estudio, teniendo como materias la investigación general hidrográfica seleccionada por las diferentes entidades ya nombradas, incluso el IDEAM, la CHEC y consultores privados.

Es importante precisar también que la Empresa Aguas y Aguas de Pereira ha realizado la actualización de este balance hídrico en los años 2004 y 2009, como entidad beneficiada de la concesión de aguas de esta fuente en mayor caudal, obteniendo resultados de caudal medio de 9.86 m<sup>3</sup>/s en la cuenca alta del río Otún (estación la Bananera). Partiendo de los 9.86 m<sup>3</sup>/s, caudal medio a la altura de la estación la Bananera, reduciendo el 25% correspondiente al caudal ecológico o sea 1.77m<sup>3</sup>/s, se tiene como oferta hídrica neta disponible en la cuenca alta del río Otún 8.09m<sup>3</sup>/s. (CARDER 2008).

En la tabla 5 se detallan las áreas y los porcentajes de utilización de los suelos, a lo largo de la cuenca del Río Otún, según los datos publicados por el SIG de la CARDER (2014). En ella se evidencia que, en los municipios de Pereira y Santa Rosa de Cabal, sumados el uso agrícola y pecuario, superan el área de bosque y se acercan al área de paramo lo cual brinda una idea de las causas de la presión ejercida sobre la misma.



**Tabla 5. Usos de Suelo Rural agrupados por Municipios.**

Municipio	Agrícola		Pecuario		Bosque		Vegetación De Páramo	
	Área (Ha)	%	Área (Ha)	%	Área (Ha)	%	Área (Ha)	%
Pereira	3967,7	8,2	4558,2	9,5	5916,6	12,3	6046,1	12,6
Dosquebradas	2367,2	4,9	1668,0	3,5	1432,2	3,0	0,0	0,0
Santa Rosa de Cabal	469,9	1,0	2796,3	5,8	12314,9	25,6	4265,9	8,9
Marsella	12,1	0,0	93,3	0,2	11,3	0,0	0,0	0,0
<b>Total</b>	<b>6816,9</b>	<b>14,1</b>	<b>9115,8</b>	<b>19,0</b>	<b>19675,0</b>	<b>40,9</b>	<b>10312,0</b>	<b>21,5</b>

Fuente SIG (CARDER – 2014).

## 6.2. Caracterización del área de investigación

### - Microlocalización

La investigación se llevó a cabo en la Vereda plan del manzano bajo, municipio de Pereira, departamento de Risaralda; esta vereda limita por el margen izquierdo del Rio Otún, con el corregimiento de la Florida, específicamente en la finca venteaderos, del municipio de Pereira, el cual corresponde a clima frio moderado, y según la clasificación Holdrigge pertenece a bosque muy húmedo premontano bajo (bm-PB), a una altura de 1800 m.s.n.m., con temperatura promedio de 17 grados.- El clima de la vereda es templado y con una temperatura media de 16,97°C, una velocidad del viento promedio media de 53,568Km/día, una humedad promedio de 90,00%, precipitación total para el año 2017 de 2309,40mm, una evaporación total de 753,60mm y una radiación solar promedio media de 295,84W/m<sup>2</sup>. Esta zona, se caracteriza por tener grandes cultivos de hortalizas, de las cuales predomina el tomate como la más cultivada, con más de 260 hectáreas, al igual es productora de muchos productos hortícolas de la canasta familiar, abasteciendo los mercados de grandes centros poblados como la ciudad de Pereira, Armenia, Manizales y Norte del Valle. En la figura 10, se presenta la ubicación geográfica del punto de investigación o sitio donde se desarrollan los trabajos de

campo, teniendo a su vez como referencia la información estadística proporcionada por las estaciones antes descritas:



**Figura 10. Ubicación geográfica de la zona de estudio - finca venteaderos**

Fuente: Google Maps

En este sentido se indica información relevante en lo concerniente a pluviosidad, temperatura, radiación, presión, humedad, velocidad del viento, precipitación y evaporación en esta zona de la cuenca:

- El área de investigación se define dentro de la finca de Rubén Darío Duque, propietario y dueño del cultivo que tiene 6 años, está ubicada a los 1.780 m.s.n.m., en el piso térmico templado; a las coordenadas 4°44'60" N y 75°36'34" O, con un área de cultivo de 4500 m<sup>2</sup> a una temperatura entre los 26° y 28° máximo.
- El terreno es ondulado con una pendiente del 25,50%, se encuentra ubicada en la margen izquierda del Rio Otún.
- Los suelos de este predio se identificaron de tipo franco arcilloso y franco los cuales permiten una retención hídrica idónea para el cultivo de "Tomate" - "Solanum Lycopersicum"

- La base económica de la finca de estudio se basa principalmente en el cultivo de tomate.

### 6.2.1. Caracterización del cultivo

La característica del cultivo del predio se precisa a continuación:

- Proceso de siembra

Siembra bajo invernadero a una altura de 4 a 5 metros según la pendiente del terreno, con una distancia entre surcos de 110 cm y una distancia entre plantas de 51 cm. Con esta distribución del cultivo se logra plantar 10.000 matas por hectárea. En las figuras 11 y 12 se puede detallar lo mencionado anteriormente:



**Figura 11. Características del cultivo**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 12. Sistema de siembra bajo invernadero**

Fuente: Elaboración propia

De igual manera, es importante resaltar que la planta tiene un peso promedio entre 7 y 8 kg, generando una producción en escala del cultivo en diferentes temporadas un promedio de 70 toneladas. Así mismo, se determinó que las plantas empiezan a producir a los 90 días y tienen un promedio de vida de 6 meses (180 días). En la figura 13 se puede observar la producción de tomate recolectada:



**Figura 13. Producción de tomate recolectada.**

Fuente: Elaboración propia

- Fertilización del cultivo

El sistema de abonado se realiza por medio de los tanques reservarios, los cuales se utilizan para realizar el riego al cultivo. En la figura 14 se observan los tanques que utiliza:



**Figura 14. Tanques Reservarios.**

Fuente: Elaboración propia

Este proceso tiene una periodicidad de 3 veces por semana, sin embargo, puede variar entre 1 y 2 veces por semana con respecto a las lluvias presentadas. Cuando se presenta un solo riego a la semana, se adiciona más contenido de Ca, Mg, K, B. Cabe resaltar que ya no se aplica gallinaza y la fumigación se realiza por medio de exfoliación, sin embargo, dado el aumento de las plagas que afectan el cultivo del tomate como la Caracha, la cual afecta directamente la fruta y la flor de la planta, se ha tenido que duplicar el uso de fungicidas y agroquímicos, los cuales se prepararan en las zonas partes altas del cultivo para evitar los vertimientos hacia la quebrada que se encuentra a 25 metros. En la figura 15 se detallan los agroquímicos utilizados:



**Figura 15. Fungicidas y agroquímicos para el cultivo.**

Fuente: Elaboración propia

Entre las prácticas ambientales que se destacan del manejo de este cultivo es la desinfección de los envases y elementos utilizados para la aplicación de los agroquímicos y el asocio con el Dilo rural para recogerlos. Así mismo, la utilización de fungicidas naturales como el extracto de ají para combatir las plagas y enfermedades. En la figura 16 se observa el trabajador realizando el proceso de fertilización de la tierra por medio de fungicidas naturales:



**Figura 16. Procesos de fertilización de suelo en el cultivo.**

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, en la figura 17, se observa el lugar donde se realizan los procesos de preparación y desinfección a una altura considerable que no afecte al cultivo:



**Figura 17. Lugar de procesos de preparación de fungicidas y desinfección**  
Fuente: Elaboración propia

- Usos del recurso Hídrico en el cultivo

El cultivo maneja un sistema tecnificado de riego por goteo, el cual se realiza solo cuando se va a realizar la siembra, en la figura 18 se puede observar la adaptación del sistema por goteo a los surcos donde se encuentran sembradas las plantas



**Figura 18. Adaptación del sistema por goteo para el cultivo**  
Fuente: Elaboración propia

Así mismo, el cultivo posee unos tanques Reservarios, los cuales se llenan con aguas lluvias y se utilizan para realizar los riegos constantes en la semana, entre 1 y 3 riegos dependiendo el clima, como se mencionó anteriormente. En la figura 19 se observa uno de los tanques utilizados:



**Figura 19. Tanque Reservario para el riego del cultivo**

Fuente: Elaboración propia

Es importante resaltar que los propietarios del cultivo, tienen unos promedios del uso hídrico que requiere el cultivo, de los cuales afirman que en promedio una planta requiere de 50 litros de agua en todo su proceso y etapas del cultivo, las cuales se mencionan en el siguiente punto.

En la figura 20, se observan las plantas con las mangueras del riego:





**Figura 20. Mangueras para el riego del cultivo**

Fuente: Elaboración propia

- Etapas del cultivo

Se divide en 4 etapas claves:

1. Planeación
2. Siembra
3. Cultivo
4. Poscultivo

### **6.3.Requerimiento Hídrico del cultivo**

Para obtener una mayor certeza sobre el propósito de los aspectos que se pretenden evaluar, es necesario establecer inicialmente el objetivo del estudio. En este sentido, su estructuración estará enfocada en la evaluación la huella hídrica para el cultivo de tomate en esta zona.

Para la definición del alcance se considera necesario priorizar los cultivos de tomate “*Solanum Lycopersicum*” que predominan en el área o predio seleccionado, los cuales estarán apoyados en aspectos sociales, ambientales y económicos.

- Valoración de la Huella Hídrica

Inicialmente se procede a desarrollar la metodología de H.H. de acuerdo con el modelo seleccionado (Water Footprint Network). En este sentido, se realizará el cálculo de la Huella Hídrica Verde y Huella Hídrica Azul en los cultivos de tomate “*Solanum Lycopersicum*”. Para la aplicación de la metodología de H.H en este documento, se procede a aplicar las formulas propuestas por la FAO (2006), donde se resalta la importancia de contar con información de variables como: la temperatura, la precipitación, la presión de vapor, la temperatura media del aire entre otras, etc.

1. Calculo de evapotranspiración

El primer paso del proceso, consiste en el cálculo de la evapotranspiración, y se define de forma mensual la cantidad de agua lluvia o del riego que retiene el suelo, la cual pueda extraer el cultivo en su zona radicular. Para estos cálculos se utiliza el programa CropWat 8.0, el cual por medio del método de Penman-Monteith, realiza los calculos para tener una referencia acerca de la evapotranspiración del cultivo, siguiendo los lineamientos de la FAO y los análisis de laboratorio determinados.

A continuación, se muestra la ecuación a utilizar en el cálculo de la evapotranspiración tal como se propuso en el diseño metodológico:

- Ecuación 1: Evapotranspiración ajustada:

$$ETa = Kc ETo$$

2. Determinación de los componentes azul y verde de la huella hídrica de los cultivos evaluados.

Para el cálculo de las H.H Verde y Azul, se parte de la información de la evapotranspiración de los cultivos y se aplican las formuladas propuestas en la metodología:

- *Ecuación 2: Requerimiento de riego = Requerimiento hídrico de cultivo –Precipitación efectiva*
- *Ecuación 3: ET<sub>azul</sub> = min (Riego neto total, Requerimiento de riego)*
- *Ecuación 4: ET<sub>verde</sub> = min (Requerimiento hídrico de cultivo, Precipitación efectiva)*

### **6.3.1. Determinación de la Huella Hídrica Azul y verde del cultivo de tomate por medio del Software CropWat 8.0**

Para determinar la H.H del cultivo de tomate, es necesario tener información de los requerimientos de agua de los cultivos y los requisitos de riego apoyados en los datos de clima y suelo. A continuación, se proceden a describir los datos que se tomaron en cuenta para el cálculo de la H.H en el software:

- Registros hidroclimatológicos

Los registros Hidroclimatológicos extraídos de la Red Hidroclimatológica de Risaralda del año 2017, los cuales se tomaron como base para alimentar el software y realizar los cálculos con dicha información.

A continuación en la tabla 6, se muestran los registros hidroclimaticos para el año 2018 del departamento de Risaralda en la estación de Lisbran:

**Tabla 6. Registros Hidroclimáticos para el año 2017 del departamento de Risaralda**

Fecha: 2018		Red		Hidroclimatológica		del		Departamento		de		Risaralda	
Registros: 12 de 12		Revisó:		Ing.Física		July		Andrea		Taborda		Ríos	
		Aprobó:		Ph.D.		Juan		Mauricio		Castaño		Rojas.	
		Director										REDH.	
		Contacto: <a href="http://www.utp.edu.co/hidroclimatologica">www.utp.edu.co/hidroclimatologica</a>											
Mes	Temperatura			Vel. Viento		Presión	Humedad	Precipitación	Evap	Radiación solar			
	Máx	Media	Mín	Máx	Media	Media	Media	Total	Total	Máx	Media		
Enero	26.60	16.41	8.60	1.30	0.58	653.70	89.71	191.60	79.75	1275.00	292.33		
Febrero	26.80	17.44	8.60	1.30	0.63	653.70	88.51	252.00	72.03	1386.00	370.90		
Marzo	28.40	17.64	9.70	1.30	0.60	654.53	81.82	71.60	85.68	1329.00	349.67		
Abril	26.80	16.48	9.70	1.30	0.54	623.53	58.36	71.00	70.18	1512.00	277.23		
Mayo	26.60	16.62	9.30	2.20	0.51	615.34	45.51	299.00	79.71	1236.00	256.21		
Junio	27.50	17.39	9.80	1.30	0.55	615.20	49.76	163.00	86.43	1252.00	291.26		
Julio	26.90	17.40	10.00	1.30	0.54	615.08	54.08	80.40	86.49	1287.00	294.92		
Agosto	28.30	17.13	7.80	1.80	0.67	615.82	55.31	76.60	84.58	1278.00	382.07		
Septiembre	28.80	17.01	7.70	1.80	0.60	614.26	57.05	234.60	91.54	1441.00	329.44		
Octubre	26.30	16.78	9.20	1.80	0.57	615.02	56.06	412.00	71.38	1342.00	312.40		
Noviembre	26.20	18.25	10.30	1.30	0.53	614.99	60.90	278.80	65.23	1299.00			
Diciembre	27.60	21.13	9.50	1.30	0.59	614.81	69.69	43.40	72.62	1290.00			
TOTAL								2174.00	945.62				
PROM	27.23	17.47	9.18	1.50	0.58	625.50	63.90			1327.25	315.64		

Fuente: Red Hidroclimatológica de Risaralda del año 2018, (2019).

Después de obtenidos los datos, se procede a realizar las conversiones necesarias para subirlos al software y realizar la simulación correspondiente al requerimiento del recurso hídrico en el cultivo.

La tabla 7 establece la igualdad en la conversión de metro / segundo a kilómetro / día, teniendo en cuenta el siguiente parámetro:

$$1 \text{ metro/ segundo} = 86,4 \text{ km/ día}$$

**Tabla 7. Conversión de medidas**

Mes	Vel Viento	Equivalencia	Km / día
Enero	0,58	86,4	50,112
Febrero	0,63	86,4	54,432
Marzo	0,6	86,4	51,84
Abril	0,54	86,4	46,656
Mayo	0,51	86,4	44,064
Junio	0,55	86,4	47,52
Julio	0,54	86,4	46,656
Agosto	0,67	86,4	57,888
Septiembre	0,6	86,4	51,84
Octubre	0,57	86,4	49,248
Noviembre	0,53	86,4	45,792
Diciembre	0,59	86,4	50,976
<b>TOTAL</b>			
<b>PROM</b>	0,575833333	86,4	49,752

Fuente: Elaboración propia

#### 6.4. Cálculos de la HH con CropWat 8.0

Para calcular el Requerimiento de Agua del Cultivo (RAC), es indispensable ejecutar los los 3 modulos del software en los cuales se realizan los calculos correspondientes a las variables de: Clima/ETo, Precipitación, Cultivo y Suelo.

- Primer modulo

El Clima/ETo, requiere ser alimentado con la información recolectado en la REDH; el software realiza los cálculos automáticamente, es importante aclarar, que previamente se debe realizar la configuración de los datos a insertar en el software.

En la figura 21, se puede observar los resultados calculados por el software, los cuales son: la radiación o la Energía y la Evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo):

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

País: Colombia Estación: Lisbran

Altitud: 1691 m. Latitud: 4,75 °N Longitud: 75,61 °W

Month	Temp Min	Temp Max	Humidity	Wind	Sun	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/día	horas	MJ/m²/día	mm/día
January	8,6	26,6	89	50	11,9	26,0	4,39
February	8,6	26,8	88	54	13,0	28,8	4,87
March	9,7	28,4	81	51	10,5	25,8	4,68
April	9,7	26,8	58	46	11,4	27,0	4,70
May	9,3	26,6	45	44	11,0	25,3	4,30
June	9,8	27,5	49	47	11,4	25,2	4,33
July	10,0	26,9	54	46	11,7	25,9	4,44
August	7,8	28,3	55	57	11,2	26,1	4,66
September	7,7	28,8	57	51	12,1	28,0	4,94
October	9,2	26,3	56	49	11,5	26,6	4,53
November	10,3	26,2	60	45	10,5	24,0	4,09
December	9,5	27,6	69	50	12,0	25,6	4,37
Average	9,2	27,2	63	49	11,5	26,2	4,52

**Figura 21. Información para cálculo de Rad.y ETo.**

Fuente: CropWat 8.0 - 2018.

- Segundo modulo

El segundo módulo se basa en el cálculo de la precipitación efectiva, por medio de la información suministrada en la REDH, se toma como base la precipitación total de cada mes y del año anterior.

A continuación, en la figura 22, se observa el cálculo de la precipitación efectiva por medio del método “FAO/AGLW”, el cual es propuesto por la ONU como el método más apropiado para realizar estas medidas relacionadas con la alimentación y la agricultura:

	Precipit.	Prec. efec
	mm	mm
<b>Enero</b>	191,6	129,3
<b>Febrero</b>	252,0	177,6
<b>Marzo</b>	71,6	33,3
<b>Abril</b>	71,0	32,8
<b>Mayo</b>	299,0	215,2
<b>Junio</b>	163,0	106,4
<b>Julio</b>	80,4	40,3
<b>Agosto</b>	76,6	37,3
<b>Septiembre</b>	234,6	163,7
<b>Octubre</b>	412,0	305,6
<b>Noviembre</b>	278,8	199,0
<b>Diciembre</b>	43,4	16,0
<b>Total</b>	<b>2174,0</b>	<b>1456,5</b>

**Figura 22. Cálculo de la precipitación efectiva.**

Fuente: CropWat 8.0 - 2018.

- Tercer modulo

En este módulo se ingresan los datos de cultivo y de suelo, los datos de cultivo requeridos se obtuvieron por medio del estudio “Evapotranspiración del cultivo-Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos” propuesto la FAO, (2006). Los datos de cultivo entonces para el modelamiento en CROPWAT se pueden observar en la tabla 8:

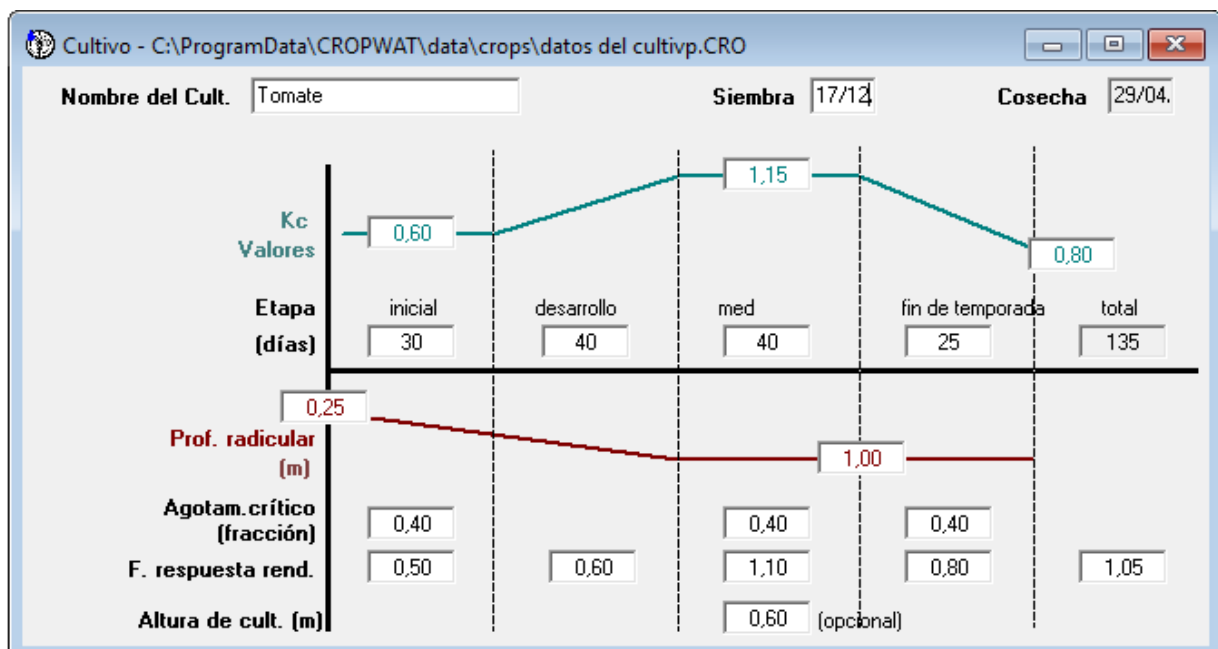
**Tabla 8. Coeficiente único del cultivo Kc.**

Datos	Subdatos	Valor	Unidad de Medida
Cultivo de tomate	Nombre	tomate	Texto
	Siembra	enero	fecha
	KC	1,2	
	Etapa inicial	30	Dias
	Etapa Desarrollo	40	Dias

Etapa Media	40	Dias
Etapa Fin	25	Dias
Total etapas	135	Dias
Prof. Rad	1,5	m
Agotamiento Critico	0,4	Fraccion
Factor Respuesta	1,05	Fraccion
Altura de Cultivo	0,6	m

Fuente: FAO, Estudio de Riego y Drenaje (2006).

La figura 23, muestra el módulo totalmente diligenciado con información del cultivo:



**Figura 23. Valores Kc para el cultivo de Tomate.**

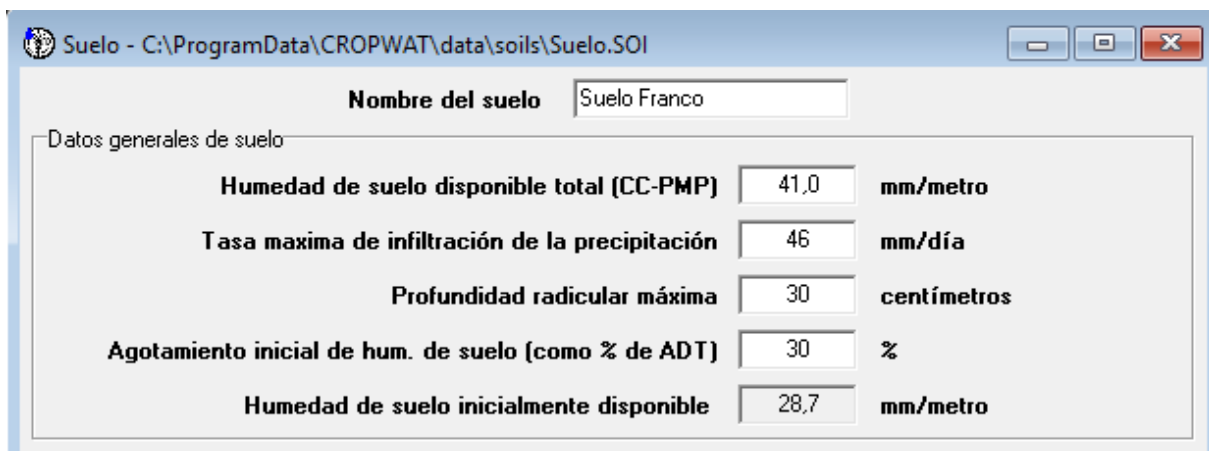
Fuente: CropWat 8.0 - 2018.

Entre los parámetros del cultivo de tomate, que se requieren para alimentar el Software CropWat 8.0 como datos generales del suelo, son:

- La humedad de suelo disponible total (ADT)
- La Tasa máxima de infiltración se expresa en mm por día
- La Profundidad radicular máxima
- El Agotamiento inicial de la humedad del suelo



La figura 24, muestra el módulo Suelo diligenciado en el software, como parte fundamental del proceso para el cálculo correcto del Requerimiento de Agua del Cultivo (RAC):



The screenshot shows a software window titled 'Suelo - C:\ProgramData\CROPWAT\data\soils\Suelo.SOI'. The window contains a form for entering soil data. The 'Nombre del suelo' field is filled with 'Suelo Franco'. Below this, a section titled 'Datos generales de suelo' contains five rows of parameters, each with a text input field, a numerical value, and a unit:

Parámetro	Valor	Unidad
Humedad de suelo disponible total (CC-PMP)	41,0	mm/metro
Tasa maxima de infiltración de la precipitación	46	mm/día
Profundidad radicular máxima	30	centímetros
Agotamiento inicial de hum. de suelo (como % de ADT)	30	%
Humedad de suelo inicialmente disponible	28,7	mm/metro

**Figura 24. Parámetros del cultivo del tomate (suelo)**

Fuente: CropWat 8.0 - 2019.

- Requerimientos de Agua del Cultivo (RAC).

Finalmente y después de haber diligenciado los cuatro módulos iniciales, el Software CropWat 8.0 efectúa los cálculos correspondientes al Requerimiento de Agua del Cultivo (RAC).

Estos cálculos dan como resultado los requerimientos de riego para el cultivo en gestión, en unidades decadiarias en total de todo el cultivo, en la figura 25 se muestran los resultados correspondientes a la cosecha:

Requerimiento de Agua del Cultivo

Estación ETo: Lisbran      Cultivo: Tomate

Est. de lluvia: lisbran      Fecha de siembra: 17/12/2019

Mes	Decada	Etapa	Kc	ETc	ETc	Prec. efec	Req. Riego
			coef	mm/día	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Dic	2	Inic	0,60	2,62	10,5	0,0	10,5
Dic	3	Inic	0,60	2,62	28,9	6,4	22,5
Ene	1	Inic	0,60	2,63	26,3	32,5	0,0
Ene	2	Des	0,62	2,72	27,2	46,1	0,0
Ene	3	Des	0,75	3,42	37,6	50,5	0,0
Feb	1	Des	0,90	4,22	42,2	59,9	0,0
Feb	2	Des	1,03	5,03	50,3	68,3	0,0
Feb	3	Med	1,14	5,48	43,8	49,3	0,0
Mar	1	Med	1,15	5,46	54,6	22,6	32,0
Mar	2	Med	1,15	5,38	53,8	4,3	49,6
Mar	3	Med	1,15	5,39	59,3	6,5	52,8
Abr	1	Fin	1,13	5,30	53,0	5,2	47,7
Abr	2	Fin	1,00	4,69	46,9	2,3	44,7
Abr	3	Fin	0,86	3,91	39,1	25,4	13,6
					<b>573,3</b>	<b>379,4</b>	<b>273,3</b>

**Figura 25. Requerimiento de Agua del Cultivo (RAC) del tomate.**

Fuente: CropWat 8.0 - 2019.

En este punto, es indispensable aclarar que este cultivo utiliza e recurso hídrico de fuentes superficiales o subterráneas por medio de un sistema de riego que esté debidamente estructurado y legalizado ante la autoridad ambiental correspondiente, dado que los riegos se realizan por medio de una manguera, con un permiso previo para el uso de agua para este proceso agroindustrial. Dado lo anterior, la HHA se da en base a la cantidad de agua que se necesita para recuperar la pérdida de evapotranspiración.

Como se puede observar en la figura 15, existe una relación directa entre la Evapotranspiración potencial del cultivo ETc decadiaria y la precipitación efectiva decadiaria que tiene un efecto directo en el Requerimiento del Riego, ya que cuando la Precipitación efectiva alcanza un valor superior a la Evapotranspiración, este obtiene un valor de cero.

Con base a esta cosecha, se observa que el requerimiento de riego es 273,3 mm, equivalentes a 2733 m<sup>3</sup>/Ha. Entonces según lo anterior, se observan unos índices que indican la necesidad de agua para disminuir el déficit en algunos periodos del año.

Esta situación tiene efectos directos en la sostenibilidad y estabilidad de la cuenta hídrica, así como en la productividad del cultivo, ya que el cultivador se ve obligado a tomar decisiones entre diversas opciones que permitan mitigar el impacto de la insuficiencia.

Entre estas opciones, las más comunes se basan en la creación y destinación de nuevas parcelas para los cultivos, sin embargo, no es muy rentable dado que incrementa los costos de producción por el aumento del uso de insumos y fertilizantes. La segunda opción, consiste en que el cultivador para compensar los bajos niveles productivos del cultivo, opta por sobre pasar el límite de protección agrícola, el cual linda con el río Otún, aprovechando la ubicación estratégica del predio.

#### **6.4.1. Estimación de la Huella Hídrica Verde**

La huella hídrica verde es el resultado del cociente entre el agua utilizada por el cultivo que proviene tanto de la precipitación efectiva como del rendimiento del cultivo.

La precipitación efectiva para el periodo de estudio fue de: 1456,5 mm.

$$HHV = \text{Precipitación efectiva } (P_{ef}) / Y = m^3 / T$$

Y= Rendimiento del cultivo en Ton/m<sup>2</sup>.

Para el caso del cultivo de tomate (*solanum Lycopersicum*), en el área de estudio, se estima un rendimiento de 17 Ton/Ha, lo que equivale a 0,0017 Ton/m<sup>2</sup>

$$HHV = 1,456 \text{ m} / 0,0017 \text{ Ton m}^2 = 856 \text{ m}^3 / T$$

Entonces, dado lo anterior, según los cálculos realizados por el software CropWat 8.0, valor de la Huella Hídrica Verde para este cultivo de tomate es de 856 m<sup>3</sup>/Ton.

#### **6.4.2. Estimación de la Huella Hídrica Azul**

Esta se refiere al consumo de aguas superficiales y subterráneas, su fórmula es la siguiente:

$$HHA = AUC \text{ (proveniente del riego)} / Y = m^3 / T$$

Según los resultados del RAC, el cultivo presenta una necesidad de compensar el recurso hídrico por evapotranspiración por medio de agua proveniente de otras fuentes, para esto, se pueden implementar diversas estrategias como un sistema de riego manual o automatizado.

Para la cosecha se obtuvo un total de 573.3 mm/dec que corresponde a 0.057 m/año.

Entonces, la fórmula para el cálculo de la HHA es la siguiente:

$$HHA = 0,0573 \text{ m} / 0,0017 \text{ Ton m}^2 = 33,71 \text{ m}^3 \text{ T}$$

Entonces, dado lo anterior, según los cálculos realizados por el software CropWat 8.0, valor de la Huella Hídrica Azul para este cultivo de tomate es de 33,71 m<sup>3</sup>/Ton

#### **6.4.3. Análisis general de los resultados**

Después de realizar los cálculos de la Huella hídrica verde y azul, es posible determinar que la cosecha del cultivo no requiere de riego durante los meses de enero y febrero; por lo cual, la necesidad de riego correspondiente a los meses de menor precipitación del área de estudio, de todo el año, o sea 273,3 mm para la cosecha se puede reemplazar con la implementación de un sistema especializado en captación y almacenamiento de aguas lluvias; lo cual aumenta la planificación y programación en el riego, logrando satisfacer las deficiencias presentadas en cuanto al recurso hídrico del cultivo en los meses que se caracterizan por traer sequía. Lo anterior, ha sido un impulso para mejorar la competitividad y mitigar el daño causado por el crecimiento de la frontera del cultivo con las fuentes hídricas, especialmente la del Río Otún, y

así mismo, ha permitido tener un mayor control de las actuales parcelas y evitar destinar nuevas parcelas para el mismo cultivo.

Por su parte, los resultados dados por los cálculos del software CropWat 8.0 demuestran que la huella hídrica verde es la más representativa con 856 m<sup>3</sup>/Ton, con respecto a la huella Azul, la cual obtuvo un total de 33,71m<sup>3</sup>/Ton. El escenario anterior, evidencia una alta necesidad de consumo de aguas superficiales y subterráneas para el cultivo, lo cual tiene correlación con lo hallado en el estudio de campo, donde se evidencian que los riegos por medio del sistema de goteo solo se utiliza en el proceso de siembra y no se vuelve a utilizar, dado que no hay un conocimiento técnico y especializado en la utilización de este sistema de forma periódica.

Por último, se destaca que en el trabajo de campo fue posible identificar que los factores más críticos en cuanto al uso del recurso hídrico en la zona, fueron los costos y el bajo interés por la implementación de nuevos sistemas de riego, ya que las condiciones hidroclimáticas de la zona benefician los cultivos, evitando realizar procesos estructurados de riego, sin embargo, esto se ve reflejado en los niveles de producción, pues la ausencia de estos métodos evidencian una baja productividad del cultivo.

### **6.5.Estrategias para fortalecer el recurso hídrico y sus usos agrícolas**

La situación actual de las fuentes hídricas representa una gran amenaza para la sostenibilidad de la población en general, puesto que por medio de este recurso se fabrica y proceso la mayor parte de alimentos y productos que se consumen a diario. Sumado a esto, el acelerado crecimiento de la población aumenta los índices de consumo, los cuales afectan el sistema, en el cual los recursos cada vez son más insuficientes para cubrir la alta demanda global.

Dado lo anterior, es indispensable generar estrategias que permitan realizar una gestión efectiva del recursos hídrico sin comprometer las necesidades de la población mundial, estrategias cuyo enfoque sea reducir el consumo de agua y la huella hídrica generada por la actividad agrícola, que para este caso específico se basa en la cuenca del Rio Otún y el cultivo de tomate en la zona.

- Fertilización del suelo

De acuerdo con Guillén (2007), la fertilización del suelo está basada, inicialmente en la utilización de residuos orgánicos disponibles, principalmente estiércoles, y fertilizantes inorgánicos de origen natural, lo cual experimentó un cambio drástico a partir de la década de 1950, con el desarrollo de los fertilizantes inorgánicos N-P-K, lo que contribuyó en gran medida a aumentar los rendimientos de los cultivos.

Guillén (2007), indica que el objetivo de la fertilización es aplicar el fertilizante en el momento oportuno y en el lugar adecuado para que puedan ser aprovechados por la planta de una mejor manera, los fertilizantes deben ser aplicados al momento de la siembra o a los ocho días después de la siembra, teniendo cuidado que estos no entren en contacto con la semilla, contribuyendo a que las raíces lo absorban oportunamente.

Por lo cual, se recomienda aplicar un plan de fertilización que se adapte a las necesidades tanto del cultivo como del cultivador, ya que en este punto se deben tener en cuenta los propósitos fundamentales del cultivo, generar altos niveles de rentabilidad o la estructuración de un cultivo sostenible y sustentable, con beneficios para todos. En cuanto al primer propósito, es importante resaltar que los costos son un factor fundamental al momento de tomar cualquier decisión, ya que un aumento en la estructura de costos puede causar pérdidas y márgenes negativos al cultivador. Por otro lado, el segundo propósito, se enfoca claramente en implementar no solo una visión de sostenibilidad, sino también una filosofía sostenible en

la actividad agrícola realizada, cuyo caso específico es el cultivo de tomate en esta zona por medio de prácticas que reduzcan el consumo del recurso hídrico de la cuenca del Río Otún, la cual es considerada la fuente hídrica más grande y propicia de la zona.

- Análisis de las características del suelo

La rotación de cultivos, es un proceso elemental para garantizar mejores rendimientos en los cultivos, por lo cual, es de suma importancia que se ejecuten estudios que permitan determinar que cultivos son determinantes para evitar la fatiga del suelo y disminuir la contaminación causada por la actividad agrícola.

Así mismo, se recomienda a los cultivadores de la zona, realizar un análisis exhaustivo de las características del suelo, con el fin de identificar los nutrientes y elementos mayores incluyendo los niveles de azufre (S) y elementos menores que este contenga, para posteriormente formular el plan de fertilización que junto con el análisis del suelo, garanticen un uso óptimo de los macronutrientes naturales y una reducción de la huella ambiental en general.

- Recolección y almacenamiento de aguas lluvias.

Finalmente, se propone utilizar una técnica para la recolección y almacenamiento de aguas lluvias como una solución viable y óptima para reducir el impacto del IPHE en la cuenca media del río Otún (zona de estudio), específicamente en los cultivos tomate ser utilizada como fuente hídrica en temporadas de verano o sequía.

Estos sistemas tienden a ser limitantes para el cultivador dado su alto costo de adquisición e implementación, sin embargo, existen métodos artesanales, que pueden ser fabricados e instalados de la misma forma, con el fin de aprovechar al máximo este recurso. Entre estos sistemas se destaca la cubierta de la vivienda, por medio de la cual se almacena el agua en tanques recolectores y se transporta por canales hasta las áreas de riego.





## **Conclusiones.**

Inicialmente, de forma general se concluye que el recurso hídrico es un factor de alta importancia para el desarrollo económico, social y ambiental de una nación, puesto que es un recurso clave para el fortalecimiento de la actividad agrícola, el cual está ligado directamente al nivel de competencia del país en la economía global. Así mismo, se concluye que las estrategias y tendencias planteadas con relación a la implementación de sistemas sostenibles en el campo son insuficientes para satisfacer la alta demanda global, por ende, es necesario recurrir a nuevos estudios que permitan incidir directamente en la optimización de los procesos, con el fin de mitigar el impacto ambiental generado por la actividad.

Con relación a los resultados de los cálculos del software CropWat, se concluye que existen unas necesidades del recurso hídrico en diferentes periodos del cultivo, específicamente a partir del mes de diciembre y nuevamente en marzo; donde la pérdida de agua por evapotranspiración es superior a cero y se presenta un escenario donde existe una pérdida del recurso del cultivo, debido a las condiciones climatológicas de estas épocas del año.

Con base a la Huella Hídrica Verde y Azul generadas en la actividad del cultivo de tomate para la zona de estudio en gestión, se concluye que el cultivo genera un Huella Hídrica total de 889,71 m<sup>3</sup>/Ton, de la cual solo el 3,79% hace parte de la HHA, es decir, lo que se genera a partir del consumo de aguas superficiales y subterráneas, es muy poco con relación al consumo de agua utilizada del cultivo proveniente de la precipitación efectiva y del rendimiento del cultivo o HHV. Entonces, se evidencia que el cultivo tiene mayores requerimientos de aguas en las temporadas donde la precipitación es más baja, causando una reducción en los rendimientos del cultivo. Sin embargo, el modelo aún sigue conservándose sostenible económicamente.

Posteriormente, después de ejecutado el trabajo de campo, se concluye que la implementación de un sistema de riego tecnificado y previamente avalado por los entes

regulatorios, es indispensable para aumentar la productividad, puesto que según los resultados del análisis anteriormente expuesto, se evidencian unos requerimientos hídricos en el cultivo, que disminuyen los rendimientos y obligan a los agricultores a la destinación de nuevas parcelas con el fin de recoger las cosechas proyectadas y no presentar pérdidas. Así mismo, se resalta la importancia de implementar técnicas que mejoren la productividad y disminuyan los impactos ambientales generados en todo el proceso.

Finalmente, se concluye que la metodología de Huella Hídrica en Colombia se encuentra en una etapa de implementación, puesto que los agricultores no conocen estos métodos, ya sea porque no lo requieren, como es el caso específico de este estudio, puesto que por las condiciones hidroclimáticas de la zona permiten omitir estos procesos.

## **Recomendaciones.**

Inicialmente, se recomienda evaluar las características del suelo con el fin identificar sus fortalezas y debilidades nutricionales, esto con el fin de implementar unos estándares en cuanto al plan de fertilización propuesto anteriormente.

También, se recomienda al agricultor, utilizar sistemas de riego tecnificados como el de goteo, el cual garantiza un uso óptimo del recurso hídrico según las necesidades del cultivo.

Posteriormente, se recomienda desarrollar un sistema de recolección y almacenamiento de aguas lluvias, con el fin de satisfacer optimizar las fuentes hídricas del cultivo y obtener mayor productividad del mismo.

Así mismo, es importante realizar otro estudio donde se haga una evaluación de la Huella Hídrica Gris (HHG) determinando las características y efectos que causan los fertilizantes que se utilizan para mejorar el aporte nutricional tales como: el Nitrógeno, Fosforo y Potasio, que son los principales.

Finalmente, es de gran utilidad para la UNAD realizar estos acercamientos en campo con los estudiantes que cursan el último semestre, dado que esto permite al alumno poner a prueba la aplicación de los conocimientos técnicos adquiridos en el proceso académico y contrarrestarlo con la práctica, realizando procesos de retroalimentación con la institución cuya finalidad se estructura en el conocimiento de las necesidades específicas del contexto en general, en esta caso específico la actividad agrícola de la región, para estructurar su plan académico en torno a la satisfacción de insuficiencias.

## Referencias

- ANDI. (2018). Estudio Nacional del Agua. Recuperado de [http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla\\_ENA\\_%202018.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla_ENA_%202018.pdf)
- CARDER. (2008). Plan de Ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del Río Otún. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/259962900/Plan-de-Ordenacion-y-manejo-de-La-cuenca-hidrografica-del-Rio-otun>
- CARDER. (ENERO de 2010). Acuerdo de Manejo para el Área Del Parque Lineal Río Otún.
- Centa (2012). Huella hídrica. Recuperado de <http://www.centa.gob.sv/2015/>
- Composición nutricional del tomate por 100 gramos de tomate fresco (2012). Verduras y Hortalizas. Recuperado de: <http://vyhsaludables.blogspot.com/>
- Cruz, 2017. Análisis Y Evaluación De La Huella Hídrica De Un Cultivo De Tomate. Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/16984/CruzGonzalezMauricio2017.pdf;jsessionid=9D7E3BD670671D5BAE6CEF93876C3A1D?sequence=1>
- Hernández, R. y Fernández, C. y Baptista, M. (2014). Metodología de la Investigación McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V
- Hoekstra, A.Y., Chapagain Ashok, K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M., (2011). Thewater footprint assessment manual: setting the global standard. Earthscan.
- IDEAM, Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua. ENA 2018. Bogotá, D.C., 2018. 2018, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios. Recuperado de: [http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla\\_ENA\\_%202018.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/Cartilla_ENA_%202018.pdf)
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura - IICA, International (2017) Evaluación de la huella hídrica en cuencas hidrográficas: experiencias piloto en Latinoamérica / – San José, C.R

- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura –IICA (2017a) Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica. Unión Europea,. – San José, C.R.: IICA, 2017.
- Lerma, H. (2001). Metodología de investigación: Propuesta, anteproyecto y proyecto. (5ª ed.). Bogotá: Eco Ediciones Ltda.
- Linares, L., & Melo, L. (2015). Evaluación de la huella hídrica del cultivo de fresa en una finca del municipio de sibaté, cundinamarca. Bogotá: Universidad de la Salle.
- Murillo, J. (S.f). MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN DE ENFOQUE EXPERIMENTAL. (En línea). Universidad Nacional de Educacion Enrique Guzman y Valle. Recuperado de: <http://www.postgradoune.edu.pe/pdf/documentos-academicos/ciencias-de-la-educacion/10.pdf>
- Reis, c. C. (2009). Norma iso 26000: Guía sobre responsabilidad social. ISO Recuperado de:[http://api.ning.com/files/ls7o\\*qna7cscd6cgdz\\*x7t\\*7\\*qeee\\*suijhr3rouwcewidw0v\\*schdoaqofn-bb7durpppincoagwz6adsaitfdf 8d5j/responsabilidad\\_socialiso260001.pdf](http://api.ning.com/files/ls7o*qna7cscd6cgdz*x7t*7*qeee*suijhr3rouwcewidw0v*schdoaqofn-bb7durpppincoagwz6adsaitfdf 8d5j/responsabilidad_socialiso260001.pdf)
- Richard G. Allen, L. S. (2006). Estudio Fao Riego y Drenaje Evapotranspiración del Cultivo. Fao, Organización de Las Naciones Unidas Para La Agricultura y la Alimentación, Roma. Recuperado de: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021367/Evapotranspiraciondelcultivo.pdf>
- Risaralda, C. A. (FEBRERO de 2017). POMCA Río Otún 2017. Recuperado de: <https://drive.google.com/drive/folders/1LoVOH0MBnae5hJlu6sFTEjoYjNywwp5J>
- SENGE, P. J. (2009). LA REVOLUCION NECESARIA. BOGOTA: NORMA S.A.
- Tamayo, M. (1987). Aprender a investigar (1ª ed.). Santa fe de Bogotá: Editorial Arfo

Tolón, A., Lastra, X., & Fernández, V. (2013). HUELLA HÍDRICA Y SOSTENIBILIDAD DEL USO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS. M+A: Revista Electrónica de Medioambiente, 14(1), 56. Recuperado de:  
<https://search.proquest.com/docview/1448245542>