

**ANÁLISIS DE HUELLA HIDRICA DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS DE  
TOMATE A CAMPO ABIERTO Y BAJO INVERNADERO EN COLOMBIA**

ANDRÉS JULIÁN PRIAS GÓMEZ

UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA  
MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES

BOGOTÁ

2015

**ANÁLISIS DE HUELLA HIDRICA DE LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS DE  
TOMATE A CAMPO ABIERTO Y BAJO INVERNADERO EN COLOMBIA**

**ANDRÉS JULIÁN PRIAS GÓMEZ**

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ciencias Ambientales

Director de tesis

Carlos Ricardo Bojacá Aldana

Ingeniero Agrónomo PhD

UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA

MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES

BOGOTÁ

2015

Nota de Aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bogotá D.C, Septiembre 04 de 2015

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profesor Carlos Ricardo Bojacá, director del trabajo de grado, por facilitarme los datos del proyecto de investigación y guiarme estrictamente en cada uno de los títulos.

A Dios por su bendición. A mis padres y Maye por la compañía, apoyo y compromiso durante este periodo de formación, a mis abuelos, tías Aurora y Judith y primos por alentarme y a mis amigos Fabio Cajamarca y Alexander Perdomo por sus enseñanzas a nivel personal, académico y profesional.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN</b> .....	<b>4</b>
<b>PALABRAS CLAVE</b> .....	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>5</b>
<b>KEY WORDS</b> .....	<b>5</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>6</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>8</b>
2.1 GENERAL.....	8
2.2 ESPECÍFICOS.....	8
<b>3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>9</b>
<b>4. HIPÓTESIS</b> .....	<b>10</b>
<b>5. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>11</b>
<b>6. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
6.1 IMPACTO AMBIENTAL.....	13
6.2 HUELLA HÍDRICA.....	14
6.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	15
6.4 EL CULTIVO DE TOMATE.....	17
6.4.1 <i>Sistemas Productivos de Tomate en Colombia.</i> ....	19
6.4.2 <i>Sistema productivo a campo abierto</i> .....	19
6.4.3 <i>Sistema productivo bajo invernadero</i> .....	20
<b>7. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>22</b>
<b>8. MARCO LEGAL</b> .....	<b>25</b>
<b>9. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>27</b>

9.1 INFORMACION PRIMARIA.....	27
9.2. HUELLA HÍDRICA .....	29
9.2.1 HUELLA VERDE.....	33
9.2.2 HUELLA AZUL.....	34
9.2.3 HUELLA GRIS .....	35
<b>10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>39</b>
10.1 HUELLA HÍDRICA VERDE.....	39
10.1.1 Huella hídrica verde a campo abierto .....	39
10.2 HUELLA HÍDRICA AZUL .....	41
10.2.1 Huella hídrica azul a campo abierto .....	41
10.2.2 Huella hídrica azul bajo invernadero .....	43
10.3 HUELLA HÍDRICA GRIS.....	44
10.3.1 Huella hídrica gris a campo abierto.....	44
10.3.2 Huella hídrica gris bajo invernadero.....	46
10.4 HUELLA HÍDRICA TOTAL.....	48
10.4.1 Huella hídrica total a campo abierto.....	48
10.4.2 Huella hídrica total bajo invernadero.....	49
<b>11. CONCLUSIONES.....</b>	<b>51</b>
<b>12. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>53</b>
<b>13. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>55</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>TABLA 1.</b> MÍNIMA, PROMEDIO Y MÁXIMA FRACCIÓN DE LIXIVIACIÓN Y ESCORRENTÍA ( $\alpha$ ) PARA NUTRIENTES, METALES Y PESTICIDAS. ....	37
<b>FIG 1.</b> HISTOGRAMA PARA LA HUELLA HÍDRICA VERDE EN EL SISTEMA A CAMPO ABIERTO EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER. ....	40
<b>FIG 2.</b> HISTOGRAMA PARA LA HUELLA HÍDRICA AZUL EN EL SISTEMA A CAMPO ABIERTO EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER. ....	42
<b>FIG 3.</b> HISTOGRAMA PARA LA HUELLA HÍDRICA AZUL EN EL SISTEMA BAJO INVERNADERO EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ. ....	43
<b>FIG 4.</b> HISTOGRAMA PARA LA HUELLA HÍDRICA GRIS EN EL SISTEMA A CAMPO ABIERTO EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER. ....	45
<b>FIG 5.</b> HISTOGRAMA PARA LA HUELLA HÍDRICA GRIS EN EL SISTEMA BAJO INVERNADERO EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ. ....	47

## **RESUMEN**

El tomate es la segunda hortaliza más consumida en Colombia, su producción es común en casi todas las zonas del país produciéndose actualmente 376,645 toneladas en aproximadamente 11,304 ha. Teniendo en cuenta su importancia en el país y su alta demanda, existe una inquietud sobre la implicación que tiene este cultivo en el consumo de agua, por lo cual el presente trabajo tiene como objetivo realizar una comparación de los sistemas productivos representativos de este cultivo en el país, a campo abierto y bajo invernadero, a partir del levantamiento de inventarios de prácticas e insumos utilizados en dos de las principales zonas productoras del país: provincia de Alto Ricaurte (Boyacá) y provincia de Guanenta (Santander). La herramienta utilizada para la cuantificación del impacto ambiental del recurso agua fue la huella hídrica considerando sus tres componentes: verde (HV), azul (HA) y gris (HG). Los resultados obtenidos fueron 17411.6 m<sup>3</sup>.ton<sup>-1</sup> de huella hídrica total para campo abierto y 1207.4 m<sup>3</sup>.ton<sup>-1</sup> de huella hídrica total para el sistema de producción bajo invernadero. A partir de estos resultados se establecieron algunas posibles causas de los impactos hallados y se identificaron puntos críticos dentro de los procesos productivos, de esta forma se proponen algunas recomendaciones para la mitigación del impacto del recurso hídrico en los sistemas productivos estudiados.

## **PALABRAS CLAVE**

Agua, indicadores de impacto ambiental, sostenibilidad, impacto ambiental



## **ABSTRACT**

The tomato is the second most consumed vegetable in Colombia, production is common in almost all areas of the country currently producing approximately 11,304 ton 376.645 ha. Given its importance in the country and high demand, there is a concern about the implication of this crop in water consumption, so this paper aims to make a comparison of the representative crop production systems in the country, open field and greenhouse, from rising inventory of practices and inputs used in two of the main producing areas of the country: province of Alto Ricaurte (Boyacá) and Guanentá Province (Santander). The tool used to quantify the environmental impact of water resources was the water footprint considering its three components: green (HV), blue (HA) and gray (HG). The results were 17411.6 m<sup>3</sup>.ton<sup>-1</sup> total water footprint for open and 1207.4 m<sup>3</sup>.ton<sup>-1</sup> total water footprint system for greenhouse production. From these results some possible causes of the impacts found were established and identified critical points in the production process, thus some recommendations for mitigating the impact of water resources in the studied production systems are proposed.

## **KEY WORDS**

Water, indicators of environmental impact, sustainability, environmental impact

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso más importante para la vida y ocupa cerca de un 75% de la superficie del globo; sin embargo, menos del 1% es apta para sostener la vida humana en un planeta con una capacidad ambiental limitada y que está sometido a una gran presión antrópica a causa del crecimiento demográfico y el modelo de desarrollo actual.

La población mundial ha aumentado significativamente durante los últimos 50 años, en el año 2011 llegó a los 7,000 millones de individuos, y se estima que para el año 2024 la cifra aumentará en 1,000 millones más y para el año 2045 la población mundial será cercana a los 9,000 millones de seres humanos (WWF, 2012). Este crecimiento demográfico es un indicador de la presión ejercida sobre los recursos naturales del planeta, sin embargo la cuestión más relevante se centra en identificar y cuantificar el impacto real de diferentes actividades humanas sobre sus recursos naturales. De esta manera es necesario la creación e implementación de nuevas herramientas que permitan realizar mejor la planificación y el manejo de los recursos hídricos, que ayuden a mantener un balance entre su uso, por parte de los humanos, y la protección de los ecosistemas proveedores de los mismos (Builes, 2013).

El concepto de huella hídrica (HH), desarrollado por Hoekstra y Chapagain (2008), surge con el objetivo de promover un uso del agua eficiente y sostenible permitiendo la planificación y la gestión adecuada de los recursos hídricos. La huella hídrica de un producto se define como el volumen total de agua dulce que se utiliza para producir dicho producto (Hoekstra *et al.*, 2011) y se divide en tres componentes: azul, verde y gris. La huella hídrica azul se refiere al volumen de agua superficial y subterránea consumida (evaporada) como resultado de la producción de un bien; la huella hídrica verde se refiere al agua lluvia consumida y la huella hídrica gris se refiere al volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes con base en las normas existentes de calidad del agua ambiente.

En el mundo, se ha encontrado que las actividades agrícolas y pecuarias consumen aproximadamente el 85% del agua dulce (Hoekstra *et al.*, 2011). De esta manera es importante analizar la demanda hídrica de las actividades y productos relacionados con esta actividad económica para asegurar el uso eficiente y sostenible del recurso hídrico.

El cultivo hortícola más importante en cuanto a producción y comercio mundial es el tomate, el cual se utiliza para la elaboración de pastas, salsas, polvo de tomate, tomates deshidratados, concentrados, tomate pelado en trozos o cubos y también así como para su consumo en fresco (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006). De acuerdo con cifras de la FAO, la producción mundial de tomate es de alrededor de 100 millones de toneladas al año (aproximadamente el 15% de la producción total de hortalizas, excluida la papa) (FAO, 2013).

En Colombia, el tomate es el segundo cultivo hortícola que se consume, su producción es común en casi todas las zonas; sin embargo, se concentra principalmente en los departamentos de Cundinamarca, Norte de Santander, Valle del Cauca, Boyacá, Huila, Antioquia, Risaralda y Caldas. Actualmente el país produce 400.000 toneladas de tomate en aproximadamente 16.000 ha, de las cuales 16,25% son bajo invernadero (ENA, 2013).

Ha pesar de su importancia económica en el país, hasta el momento poco se conoce sobre el impacto ambiental generado por este cultivo bajo sus dos sistemas productivos: a campo abierto y bajo invernadero.

De esta forma el presente trabajo tiene como propósito, analizar el uso del recurso hídrico empleado en los dos sistemas productivos de tomate utilizados en Colombia, mediante la determinación de la huella hídrica. Para dicho propósito se determinó la huella hídrica de los sistemas en dos regiones representativas de los departamentos de Boyacá y Santander.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 General**

Comparar el impacto ambiental, respecto a consumo de agua, de los dos sistemas productivos de tomate aplicados en Colombia.

### **2.2 Específicos**

Determinar la huella hídrica para el sistema productivo a campo abierto aplicado en Colombia representado por el sistema utilizado en la provincia de Guanenta (Santander).

Establecer la huella hídrica para el sistema bajo invernadero y representado por el sistema de cultivo empleado en la provincia del Alto Ricaurte (Boyacá).

Analizar diferencias entre los dos sistemas productivos de tomate en Colombia, en términos de su impacto ambiental respecto al consumo de agua.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Actualmente, en la agricultura existe una preocupación por el alto consumo del recurso hídrico. A nivel nacional esta preocupación también es evidente al tratar de buscar alternativas en los sistemas productivos para que generen un menor impacto y al mismo tiempo manteniendo unos óptimos niveles de rendimiento.

En Colombia, uno de los principales sistemas hortícolas es el tomate encontrándose distribuido en todas las regiones del país. Su cultivo, a través de los sistemas a campo invernadero y bajo invernadero, genera deterioro al medio ambiente pero hasta el momento no se ha realizado la comparación de los dos sistemas respecto al consumo del recurso hídrico. Debido a la ausencia de esta información no se ha podido establecer cuál de los dos sistemas ocasiona un mayor impacto sobre el ambiente en este aspecto.

Con base en lo anterior el presente trabajo pretende responder la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál de los dos sistemas productivos representativos de tomate en Colombia, a campo abierto o bajo invernadero, ocasiona el mayor impacto ambiental cuantificado a través del indicador de huella hídrica?

#### **4. HIPÓTESIS**

Si el sistema de cultivo ejerce un efecto sobre el impacto ambiental entonces el impacto sobre el recurso hídrico del sistema a campo abierto será diferente al del sistema bajo invernadero.

## 5. JUSTIFICACIÓN

La agricultura es la base de nuestra alimentación considerándose la primera opción para acceder a una seguridad alimentaria. Sin embargo, esta actividad se relaciona directamente como una de las que más deterioran el ambiente por el gasto excesivo de agua potable y producción de gases de efecto invernadero en su cadena completa de producción y suministro (Hoekstra *et al.*, 2011).

El crecimiento demográfico, junto con cambios de las preferencias en la dieta y el aumento de la demanda de biocombustibles, ejercerá mayor presión sobre los recursos de agua dulce en el planeta (Rockstrom *et al.*, 2009). El uso consuntivo de agua tanto de la precipitación y riego para la producción de cultivos alimentarios y forrajeros, se espera que aumente en 0.7% por año a partir de su nivel estimado de 6.4 billones de  $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$  desde 2,000 hasta 9,060 mil millones de  $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$  con el fin de alimentar adecuadamente a la población global de 9.2 millones en 2050 (Hoekstra *et al.*, 2011). La creciente escasez de agua dulce ya es evidente en muchas partes del mundo.

En este sentido se convierte en necesidad mundial, modificar e implementar esquemas de riego y prácticas de manejo que aumenten la producción de agua reduciendo su consumo, partiendo de la cuantificación de los sistemas productivos actuales mediante indicadores como la huella hídrica. Los sistemas productivos de cada tipo de cultivo y su manejo pueden ser diferentes, por lo cual se hace necesario cuantificar el recurso hídrico por producto y de manera local teniendo en cuenta sus características.

Uno de los cultivos con alta demanda a nivel mundial es el tomate, el cual según 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 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 (Jaramillo, 2009).

Teniendo en cuenta la importancia de este producto y la demanda que tiene a nivel nacional es importante determinar los impactos que tiene respecto al recurso hídrico. De esta manera, este trabajo tiene como objetivo aportar información sobre el consumo de agua en los dos sistemas representativos de tomate en Colombia, bajo invernadero y campo abierto, con el fin de promover investigación en sistemas que aumenten la eficiencia del agua en cultivos de tomate en el país.



## 6. MARCO TEÓRICO

### 6.1 IMPACTO AMBIENTAL

Los indicadores ambientales son aquellos que evalúan el estado y la evolución de determinados factores ambientales como pueden ser el agua, el aire, el suelo entre otros. Muchos de estos, expresan simplemente parámetros puntuales, y otros pueden obtenerse a partir de un conjunto de parámetros relacionados por cálculos complejos.

Algunos ejemplos de indicadores ambientales son los niveles de contaminación acústica, niveles de contaminación atmosférica, porcentaje de agua que recibe un tratamiento adecuado, porcentaje de residuos recogidos selectivamente, entre otros.

A nivel mundial, el consumo de productos agroalimentarios ha sido siempre reportado entre los tres principales sectores responsables de la generación de impactos ambientales, contribuyendo entre el 10 y 12% de los gases de efecto invernadero a nivel mundial (Smith, 2007).

La agricultura representa el 70% del consumo global de agua dulce y es una fuente significativa de contaminantes responsables de la degradación de la calidad del agua dulce (Page *et al.*, 2012).

Anteriormente, se estimaba el uso de agua considerando únicamente las captaciones de fuentes superficiales y subterráneas y no se tenía en cuenta el uso de agua dulce en la producción de bienes o servicios. Es así como Hoekstra en 2002 propuso las bases conceptuales y dio nombre al indicador de sostenibilidad que describe este consumo. Este indicador se ha denominado “huella hídrica” o “huella del agua” y busca evaluar el consumo e impacto de agua dulce en una cadena entera de producción o de todas las etapas de algún servicio incluyendo

las materias primas e insumos. Actualmente este indicador es empleado por muchos gobiernos, empresas e investigadores en todo el mundo.

## 6.2 HUELLA HÍDRICA

La huella hídrica es un indicador de uso de agua dulce que considera no sólo el uso directo de agua de un consumidor o productor, sino también el uso indirecto del agua. Se ha considerado como un indicador global de la apropiación de recursos de agua dulce. La huella hídrica de un producto se define también como el volumen de agua dulce utilizado para producir un producto a lo largo de la cadena de suministro. Por otro lado es un indicador multidimensional, que incluye tanto los volúmenes consumidos de agua por fuentes como los volúmenes contaminados. Todos los componentes de una huella hídrica total se especifican geográfica y temporalmente (Hoekstra *et al.*, 2011)

En un área geográficamente delimitada (por ejemplo, una provincia, nación, área de captación o cuenca fluvial), la huella hídrica es igual a la suma de las huellas hídricas de todos los procesos que tienen lugar en esa zona (Hoekstra *et al.*, 2011) En productos y servicios también es importante considerar las huellas hídricas de todos los procesos, entendiéndose huellas hídricas como el volumen de cada tipo de agua según el origen o utilización que tenga, de esta manera estas dos características también determinan la metodología para su cuantificación.

La huella hídrica azul representa el consumo de los recursos de agua azul, entendiéndose esta como el agua dulce que se toma de fuentes superficiales y subterráneas tales como los ríos, lagos y acuíferos confinados a lo largo de la cadena de suministro de un producto. Este consumo hace referencia a la pérdida de masa del agua de la superficie de tierra disponible en un área de influencia. Estas pérdidas se producen cuando el agua se evapora, vuelve a otra zona de captación, al mar o se incorpora en un producto (Hoekstra *et al.*, 2011)

El agua verde es la precipitación que llega al suelo y que no se pierde por escorrentía, almacenándose temporalmente en la parte superior del suelo o en la vegetación. De ésta forma la huella hídrica verde es el volumen de agua de lluvia consumida durante el proceso de producción. Este tipo de huella es relevante en los productos agrícolas y forestales, ya que es igual a la evapotranspiración de los cultivos y plantaciones más el agua incluida en el producto cosechado. Por último, la huella gris se define como el volumen de agua que se requiere para diluir los contaminantes (sustancias químicas) hasta el punto en que la calidad del agua se mantenga según las normas existentes de calidad del agua en el ambiente (Franke, 2013).

En la actualidad se tienen tres metodologías principales para cuantificar el uso del agua, sustentadas en los principios del análisis del Ciclo de Vida. Estas tres metodologías son: Evaluación del impacto del consumo de agua dulce (Bradley *et al.*, 2012) índices y metodologías de escases de agua y una aproximación teniendo en cuenta como análisis de ciclo vida (Mila *et al.*, 2009) y evaluación de la huella hídrica (Hoekstra *et al.*, 2011), sin embargo, la metodología más empleada en este tipo de estudios es la evaluación de la huella hídrica de acuerdo con Hoekstra (2011).

### **6.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN**

Para la determinación de la huella hídrica en sistemas agrícolas es fundamental partir del requerimiento y evaporación del recurso hídrico. Para esto, se aborda el concepto de evapotranspiración (ET), el cual combina estos dos procesos. El primero hace referencia a la evaporación de agua del cultivo mediante la superficie del suelo y la segunda hace referencia a la transpiración propia del cultivo.

La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). El agua se evapora de superficies, tales como lagos, ríos, caminos, suelos y la vegetación húmeda (Chapagain *et al.*, 2006).

Para que el agua pase a vapor se requiere energía, la cual es proporcionada por la radiación solar directa y la temperatura ambiente del aire. La fuerza necesaria para retirar el vapor de agua de una superficie evaporante es la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie evaporante y la presión de vapor de agua de la atmósfera circundante. A medida que ocurre la evaporación, el aire circundante se satura gradualmente y se retira a la atmósfera, este proceso se vuelve cada vez más lento hasta detenerse completamente. (Allen *et al*, 2006) El reemplazo del aire saturado por un aire más seco depende fundamentalmente de la velocidad del viento, radiación, temperatura del aire y la humedad de la atmósfera circundante. Estos son parámetros climatológicos que se deben tener en cuenta para evaluar el proceso de evaporación.

En el suelo, el grado de cobertura del cultivo y la cantidad de agua disponible en la superficie evaporante, son dos factores que influyen en el proceso de evapotranspiración. Existen zonas, en las que el suelo es capaz de proveer agua para satisfacer su demanda de evapotranspiración y en estas es suficiente considerar las condiciones meteorológicas. Sin embargo, existen otras zonas en las que el intervalo de lluvia y riego es grande y la capacidad del suelo de conducir la humedad cerca de la superficie es reducida, entonces el suelo no tiene la capacidad de proveer agua para satisfacer la demanda de evapotranspiración, el agua se agota y los horizontes superiores de suelo se secan. En este momento la disponibilidad limitada de agua ejerce un control sobre la evaporación del suelo (Chapagain *et al.*, 2006).

En ausencia de cualquier fuente de reabastecimiento de agua a la superficie del suelo, el proceso de evaporación disminuye rápidamente y puede terminar en un corto periodo de tiempo (Chapagain *et al.*, 2006).

La transpiración consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos de la planta y su remoción hacia la atmósfera. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio del vapor con la atmósfera es controlado por la abertura de los estomas. Los cultivos pierden agua en mayor parte a través de los estomas. Esta, junto con algunos nutrientes se absorbe por las raíces y se transporta a través de la planta. Casi toda el agua absorbida del suelo se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte en parte de los tejidos vegetales.

La radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y el viento también deben ser considerados en su determinación de la transpiración debido a que la transpiración también depende del aporte de energía, la presión de vapor y la velocidad del viento. Otros aspectos que también deben ser considerados a la hora de evaluar la transpiración en un cultivo son el contenido de agua del suelo, su capacidad de conducir el agua a las raíces, su salinidad, las características del cultivo, el medio donde se produce, el estado de desarrollo del cultivo, el medio donde se produce y sus prácticas de manejo como el riego (Chapagain *et al.*, 2006).

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no existe una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos. Aparte de la disponibilidad de agua en los horizontes superficiales, la evaporación de un suelo cultivado es determinada principalmente por la fracción de radiación solar que llega a la superficie del suelo. Esta fracción en la mayoría de casos disminuye a lo largo del desarrollo del cultivo a medida que la cobertura vegetal genera más sombra sobre el suelo. En las primeras etapas de desarrollo, el cultivo pierde agua principalmente por evaporación directa del suelo, pero a medida que se desarrolla y aumenta su cobertura, la transpiración se va convirtiendo en el proceso principal. En el momento de la siembra, aproximadamente el 100% de la evapotranspiración ocurre en forma de evaporación, mientras que cuando la cobertura vegetal es completa, más del 90% de la evapotranspiración ocurre como transpiración (Chapagain *et al.*, 2006).

#### **6.4 EL CULTIVO DE TOMATE**

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) (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>.

Los principales países productores de tomate son 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 dedica a la elaboración de pastas, salsas, polvo de tomate, tomates deshidratados, concentrados y tomate pelado en trozos o cubos (Asohorfrucol, 2006).

En el contexto nacional, el tomate es el segundo cultivo hortícola que más se consume en Colombia, constituyendo el 15.98% de cultivos hortícolas en el país (Jaramillo 2009). Su consumo anual per cápita es de 9.4 kg y tiene una producción de 400,000 toneladas en 16,000 ha. (Ena, 2013).

Su producción es común a casi todas las regiones; sin embargo, la producción 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, utilizando el sistema de producción a campo abierto y 607 ha utilizando el sistema bajo invernadero. El rendimiento promedio nacional es de 18.91 y 93.77 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Dane, 2010).

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 (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 (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2012) (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, un área cosechada de 779 ha con un rendimiento de 26.6 t ha<sup>-1</sup>. (Ena, 2013) En este departamento se encuentra la provincia de Guanentá situada al sur-oriental 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.

#### **6.4.1 Sistemas Productivos de Tomate en Colombia.**

Un sistema de producción agrícola se define como el conjunto de componentes físicos, bióticos, económicos y socio-culturales que se encuentran en permanente interacción para generar productos y recursos (Fao, 2001).

El tomate es cultivado principalmente bajo dos sistemas de producción: a campo abierto donde se cultivan los tomates tipo “chonto” utilizando prácticas subóptimas, y bajo invernadero en sistemas relativamente intensivos que han adoptado prácticas como el fertirriego, la poda periódica de estructuras vegetales y el empleo de sistemas de tutorado (Bojaca *et al.*, 2013).

#### **6.4.2 Sistema productivo a campo abierto**

Este tipo de sistema productivo se caracteriza por estar abierto a la intemperie, por esta razón no es posible obtener unas condiciones controladas climáticas de temperatura y humedad, lo que hace que el rendimiento por cosecha sea más bajo.

En los sistemas productivos a campo abierto, el rendimiento promedio obtenido es aproximadamente entre 1.5 a 2 kg planta<sup>-1</sup> (Corpoica, 2007). Este tipo de sistema, se presenta en zonas con elevaciones entre 0 y 2100 msnm que van desde clima

templado a frío. Sin embargo, las condiciones climáticas que prevalecen en estas regiones son de cambios extremos de temperatura y humedad relativa que favorecen el ataque de plagas y enfermedades, lo que obliga al agricultor a utilizar mayor cantidad de pesticidas y fertilizantes para lograr una mayor productividad. Lo anterior aumenta los costos de producción disminuyendo la rentabilidad y causando graves daños de contaminación del medio ambiente (Corpoica, 2007).

### **6.4.3 Sistema productivo bajo invernadero**

En el país, se han identificado diferentes zonas aptas para el cultivo de tomate gracias a la introducción del modelo productivo bajo invernadero. Esta es una tecnología que permite la optimización de la interacción planta clima en un amplio rango de clima. (Bojaca *et al.*, 2009).

En el sistema bajo invernadero se cultivan principalmente tomates tipo larga vida, cuyo uso principal se enfoca al consumo fresco en ensaladas o como parte de comidas rápidas como hamburguesas.

La producción de tomate bajo invernadero en Colombia se concentra en nueve departamentos, siendo el departamento de Boyacá el principal contribuyente con 36% de la producción nacional. Durante 2010, el área sembrada en Boyacá fue 221 ha con una producción de 26,823 para una productividad de 121.3 t ha<sup>-1</sup> (Ena, 2013).

Este sistema productivo, se caracteriza por desarrollarse al interior de una estructura de madera o metálica, cubierta por láminas de polietileno de baja densidad. Dentro de estos ambientes es posible controlar en cierto grado la temperatura y humedad permitiendo establecer un microclima que mejora las condiciones climáticas a las cuales se ven expuestas las plantas. En Colombia, los invernaderos no cuentan con ningún sistema de control activo de clima y la ventilación se realiza de manera natural a través de aperturas fijas en los techos de los invernaderos y cortinas móviles presentes en los mismos (Corpoica, 2007).



Con el uso de invernaderos, accesorios y otras adaptaciones climáticas, se trata de facilitar la programación de las cosechas, mejorar la productividad del sistema de cultivo, optimizar la calidad de los productos y minimizar la incidencia de plagas y enfermedades. El desarrollo vegetativo del tomate bajo invernadero es de 80 a 90 días, edad en la que se inicia su cosecha, la cual se extiende hasta los 150 a 180 días de acuerdo con el manejo agronómico que se le dé, obteniéndose en promedio dos cosechas por año (Corpoica, 2007).

Las ventajas del sistema de producción bajo invernadero son que brinda protección contra condiciones climáticas extremas como la presencia de rocío el cual representa riesgo en la inversión del cultivo; permite control sobre ciertos factores climáticos como la precipitación; se pueden obtener cosechas fuera de época; preserva la estructura del suelo, ahorro en costos de producción al disminuir la aplicación de fertilizantes y plaguicidas y por otro lado hay un aprovechamiento más eficiente del área de cultivo (Corpoica, 2007).

Por otro lado, este sistema presenta desventajas. Se requiere de una alta inversión inicial, es necesario contar con una infraestructura cuyo costo depende de los materiales con que se construya. Requiere personal especializado en las diferentes labores del cultivo y manejo del clima.

A nivel nacional, este tipo de cultivo ha ido en aumento durante los últimos años, causando cambios en el paisaje, variaciones de flujo del ecosistema así como aumento en el uso de insumos y generación de residuos (Parrado *et al.*, 2009).

## 7. ESTADO DEL ARTE

Respecto a la huella hídrica en sistemas agrícolas se han realizado muchas investigaciones a nivel internacional, sin embargo los trabajos más citados respecto a este tema son los realizados por Hoekstra, quien desarrolló el concepto de huella hídrica. A continuación se encuentran algunas investigaciones de referencia sobre este indicador de impacto ambiental en sistemas agrícolas a nivel mundial y nacional.

En la investigación de Hoekstra y Hung realizada en el 2002 se cuantificaron los volúmenes de todos los flujos de comercio de agua virtual entre naciones en el período 1995-1999 para reportar los saldos de comercio de agua virtual de las naciones en el contexto de aguas nacionales, necesidades y disponibilidad del recurso hídrico. Los resultados indicaron que el volumen global de comercio de agua virtual del sector agrícola entre las naciones fue de  $695 \text{ Gm}^3 \text{ año}^{-1}$  en promedio. Esta cifra corresponde al 13% del agua utilizada para la producción agrícola en el mundo  $5,400 \text{ Gm}^3 \text{ año}^{-1}$  (Rockström *et al*, 2001). Esto significa que la producción agrícola en el mundo no se utiliza para el consumo interno, sino para la exportación (en forma virtual). Por otro lado, el estudio reporta que los países con mayor exportación neta de agua virtual son: Estados Unidos, Canadá, Tailandia, Argentina y la India. Los países con mayor importación neta de agua virtual en el mismo periodo son: Sri Lanka, Japón, los Países Bajos, la República de Corea y China (Hoekstra, 2002).

El estudio realizado por Mekonnen y Hoekstra con título agua azul, verde y gris de cultivos y productos derivados de los cultivos, tuvo como objetivo cuantificar la huella hídrica del sector agrícola mundial durante el periodo 1996 a 2005 con una metodología de alta resolución considerando un modelo de balance de agua dinámico. Este estudio muestra que en promedio, las huellas hídricas de los cultivos primarios por tonelada de cultivo son: azúcar ( $200 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ), verduras ( $300 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ), raíces y tubérculos ( $400 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ) y frutas ( $1,000 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ). La huella hídrica varía, sin embargo, a través de diferentes cultivos por categoría de cultivos y por región de producción. Por otro lado el análisis de las huellas hídricas de los diferentes biocombustibles demuestra que el bioetanol tiene una huella hídrica inferior que el biodiesel (Hoekstra *et al.*, 2011).

Para la determinación de huella hídrica en el cual se evidencia la agricultura como uno de los principales aportantes a huella hídrica en la cadena de producción de un producto alimenticio, Aldaya y Hoekstra (2010) analizaron el uso del agua en relación con dos productos típicos de los consumidores italianos: pasta y pizza. En este, se encuentra que el impacto de huella hídrica de estos productos se concentra en el primer paso de la cadena de suministro de puré de tomate y mozzarella, es decir en la fase de cultivo, mientras que los otros productos como el pan de trigo utilizado para la base de la pizza no tienen grandes impactos en huella hídrica (Hoekstra *et al.*, 2010).

En el 2008, Chapagain realizó una investigación que reunía los métodos para determinar la huella hídrica a nivel local caracterizando la cultura del cultivo de tomate en España. El autor comparó el análisis de ciclo de vida y la huella ecológica concluyendo la importancia de la aplicación de la huella hídrica en estos métodos. Como resultado obtuvo que la Unión Europea consume 957,000 toneladas de tomates frescos españoles al año y que en España se evaporan 71 Mm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> de agua. De igual manera se requerirían 7 Mm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> de agua para diluir los nitratos lixiviados en España, además la producción de tomate evapora 297 Mm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> y contamina 29 Mm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> de agua dulce (Chapagain, 2008).

Por otra parte, e involucrando otros indicadores de impacto ambiental se encuentra la investigación realizada por Page en 2012. En ésta se determinó que cada kilogramo de tomate fresco suministrado a Sydney, aporta una huella hídrica y de carbono de 5 a 53 L de agua y de 0.39 a 1.97 kg CO<sub>2</sub> eq respectivamente, dependiendo de cada tipo de sistema de producción (Page, 2012). Este estudio afirma que la variación de los valores de los indicadores corresponde al tipo de sistema productivo, los que aportaban significativamente en huella de carbono, disminuían en huella hídrica; además concluyen que la causa de mayor contribución en estos dos indicadores se debe principalmente al transporte y la calefacción artificial en los invernaderos.

Una investigación realizada por Aldaya que tiene como nombre “la huella hídrica virtual exportada en España” consistió en analizar la huella hídrica verde, azul y

gris de la producción de tomate en España considerando los sistemas productivos representativos en el país. También se comparan las productividades respecto a las disposiciones de aguas superficiales y subterráneas. El resultado principal del estudio muestra que la huella hídrica total de 1 kilogramo de tomate producido en España es de 236 litros por kilogramo como promedio nacional. La huella hídrica varió en los diferentes lugares dependiendo principalmente del clima local y el sistema de producción. El promedio de huella hídrica verde española asciende a alrededor de 5%, el componente azul a 36% y el componente gris a 59% del total (Aldaya, 2010). Finalmente el estudio reporta que la huella gris de los sistemas de riego es mucho más baja que la de los sistemas de secano debido al rendimiento en los sistemas de riego.

En el contexto nacional, Arévalo (2011), tuvo como objetivo determinar los impactos asociados al desarrollo de las actividades económicas, sociales y sus implicaciones frente a la disponibilidad del recurso hídrico. Este estudio encontró que la huella hídrica del sector agrícola colombiano para el año 2008 fue: huella hídrica verde  $34,242 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ , huella hídrica azul  $2,804 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ , huella hídrica gris  $2,098 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$  para un total de huella hídrica de  $39,144 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ . También indicó que el cultivo con el mayor impacto fue el café mientras que por tipo de huella hídrica, fue el café para la huella verde, el arroz y la palma africana para huella azul y nuevamente el café para huella hídrica gris (Arevalo, 2011).

Otro estudio sobre huella hídrica en el sector agrícola en Colombia fue el realizado por Builes (2009) en el que cuantificó la huella hídrica azul, verde y gris de las actividades agrícolas y pecuarias de un área geográficamente delimitada en la cuenca del río Porcè, centro occidente de Colombia. La huella hídrica agrícola total de la cuenca fue de  $250 \text{ Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ , para el periodo de 2005- 2010, discriminada en 93% de huella verde, 5% de huella azul y 2% de huella gris. Finalmente, el estudio reportó que el café es el cultivo que más aporta a la huella hídrica de consumo con un 31%, seguido por la caña, papa y plátano con valores del 19, 15 y 8%, respectivamente (Builes, 2013).

## 8. MARCO LEGAL

Considerando el marco jurídico de Colombia se pueden considerar los siguientes documentos en los que se ha tratado de regular el consumo de los recursos hídricos dando cumplimiento al concepto de desarrollo sostenible, el cual es definido por la ley 99 en su artículo tercero como “el proceso que conduce al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida y al bienestar social, sin agotar la base de recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades”. Por otro lado, el artículo primero de la misma ley aclara que todos los procesos en el país, incluyendo el de producción agrícola deben causar el menor impacto en el ambiente.

Respecto al recurso hídrico en la legislación nacional se encuentra el decreto 1480 de 2007 por el cual, se priorizan el ordenamiento y la intervención de algunas cuencas hidrográficas y tiene como objetivo que las autoridades ambientales competentes inicien su proceso de ordenación y manejo y que las entidades territoriales adopten las medidas necesarias para prevenir y mitigar los factores de riesgo.

Otros documentos que hacen referencia al marco jurídico de la gestión del agua en Colombia son el 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: Biodiversidad (Dec 607 de 2011), Humedales (Dec 624 de 2007), Páramos (Resol 0893 de 2003), Espacios Oceánicos y Zonas Costeras (2000), Producción Más Limpia (Ley 1252 de 2008), Residuos Sólidos (Dec 1713 de 2002), Gestión Ambiental Urbana (2008), Salud Ambiental (Dec 2972 de 2010), Políticas Sectoriales: Agua Potable y Saneamiento (ley 142 de 1994), Agropecuario Ley 1377 de 2010).

Respecto al uso y calidad de agua se encuentra el Decreto 1541 de julio 26 de 1978 y el reglamentario del decreto Ley 2811 de 1974 los cuales mencionan un

régimen especial para ciertas categorías de aguas como las aguas lluvias, las subterráneas y las aguas minerales y termales. Por otro lado existen otros artículos en la Constitución Política relacionado con la calidad de los recursos hídricos. El Código Civil (Artículos 677 a 684 y 891 a 896), el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, el Decreto Reglamentario 1541 de 1978 y el código Sanitario Nacional o Ley 9 de 1979) son enfáticos respecto a la calidad del recurso hídrico.

Como complemento a la legislación relacionada con el manejo del recurso hídrico, fue formulada la Política Nacional de Gestión Integral de Recursos Hídricos, por parte del Grupo de Recurso Hídrico del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en el 2010 como instrumento orientador de la gestión integral del agua. En el documento se formulan 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 ambientales, sociales, y económicos.

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 a implementar en el corto plazo (2014), medio plazo (2018) y largo plazo (2022). La estructuración del Plan Hídrico Nacional se plantea como resultado de un proceso concertado multisectorial regionales, con resultados orientados a contribuir al logro de las metas nacionales (Arévalo *et al.*, 2011).

Actualmente el concepto de Huella Hídrica no se encuentra el marco jurídico de Colombia, sin embargo, se ha manifestado interés en conocer estudios nacionales certificados por Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo, IDEAM y otras corporaciones ambientales gubernamentales para concertar el concepto de huella hídrica e incorporarlo como herramienta de política en el futuro (Arévalo *et al.*, 2011).

## **9. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **9.1 INFORMACION PRIMARIA**

La información primaria de clima, suelo y cultivo para la determinación de la huella hídrica fue levantada en la provincia del Alto Ricaurte en el departamento de Boyacá para el sistema bajo invernadero y en la provincia de Guanentá en el departamento de Santander para el sistema a campo abierto.

La provincia del Alto Ricaurte está integrada por siete municipios, de la cual hacen parte Gachantivá, Ráquira, Sáchica, Santa Sofía, Sutamarchán, Tinjacá y Villa de Leyva (capital). Se ubicada en la zona central del departamento, hacia el costado noroccidental. Limita por el oriente con la provincia Centro, por el oeste con la provincia de Occidente, por el Norte con el departamento de Santander y por el sur con el departamento de Cundinamarca. Ocupando 1485 km<sup>2</sup> que equivale al 6.4% del área del departamento de Boyacá.

La provincia, está comprendida entre alturas que van desde 1750 hasta 3400 m.s.n.m. lo que la ubica entre los pisos térmicos templado a frío. Cuenta con el río Ráquira o Sutamarchán el cual sirve de suministro hídrico principal para la provincia ya que esta recoge las aguas de todos los afluentes de los municipios que la conforman. Existen áreas de páramos, dentro de las cuales se tiene el Cerro Pan de Azúcar, al noroeste del Páramo de Rabanal, localizado entre Ráquira y Samacá y la Cuchilla de Peñas Aguilas y Peñas Blancas, localizadas entre los Municipios de Saboyá y Sutamarchán.

La economía de la provincia del Alto Ricaurte se basa principalmente en la ganadería, con la cría de ganado vacuno (7450 cabezas), minería (mármol traventino, minas de yeso, caliza, caolín y arcilla) y agricultura. Sus principales productos agrícolas son la caña de azúcar, papa, haba, maíz, arveja, yuca, café, frijol, trigo, hortalizas, en donde sobresalen las legumbres, el tomate y los frutales como uchuva, mora, curuba, guayaba, naranja, durazno, feijoa y fresa.

La Provincia de Guantán está situada al sur-oriente del departamento, siendo su capital el municipio de San Gil, presenta climas entre frío y templado lo que permite su producción agrícola como actividad económica principal en la que se destaca los cultivos de maíz, frijol, la yuca, ají, arracacha, algodón y fique, a nivel artesanal sobresale por sus trabajos en algodón, mármol y cerámica.

La información fue recolectada durante un periodo de tres años y corresponde a: entradas y salidas del sistema, información climática e información de suelos durante diferentes ciclos productivos tomando como unidad de análisis el lote de cultivo para el sistema a campo abierto, y el invernadero para el sistema productivo bajo invernadero. Para el sistema a campo abierto se tomó la información de 22 ciclos productivos y para el sistema productivo bajo invernadero se registraron 39.

La estrategia para tomar datos sobre las entradas y salidas de materiales e insumos consistió en la realización de entrevistas semanales a los agricultores involucrados. Durante dichas entrevistas se le preguntaba al agricultor acerca de los productos aplicados, dosis, cantidad de riego y producción obtenida durante la semana.

La información climática se recolectó mediante estaciones climáticas portátiles que se instalaron en cada zona de cultivo. Las estaciones medían temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, precipitación y radiación solar global. Esta información se almacenó en base horaria para cada uno de los ciclos de cultivo registrados. Para el caso bajo invernadero, se instalaron dos termocuplas, una actuando como bulbo seco y otra como bulbo húmedo, que registraron la temperatura y la humedad relativa al interior del área de cultivo. Estos sensores fueron ubicados en la zona central del invernadero, dentro de una cápsula de color blanco con el fin de evitar la influencia directa de la radiación sobre los mismos.

Para la información sobre suelos se realizó análisis físico químico tomando muestras al comienzo y final de cada ciclo productivo con el fin de determinar la clase textural y los contenidos de nitrógeno, fósforo y potasio.



## 9.2. HUELLA HÍDRICA

La huella hídrica se determinó aplicando la metodología para consumo de agua propuesta por Hoekstra *et al.* (2011), junto a la Guía de Apoyo 3 para la contabilidad de huella hídrica gris (Franke, 2013) en los dos sistemas productivos de tomate. La huella hídrica se calculó 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 ( $HA$ ) y gris ( $HG$ ) (Hoekstra *et al.*, 2011), así:

$$HT_{proc} = HV + HA + HG \left[ \frac{\text{Volumen}}{\text{Masa}} \right] \quad (1)$$

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).

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:

$$ET_c[t] = K_c[t] \times K_s[t] \times ET_0[t] \quad (2)$$

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  $E_{to}$  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  $E_{To}[t]$  ( $\text{mm d}^{-1}$ ), se utilizó el programa CROPWAT, 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, se eligió calcular  $E_{Tc}$  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 (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.

$$E_{To} = \frac{0,408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (3)$$

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 ( $m \cdot s^{-1}$ );  $e_s$ : 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 ( $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$ ) y  $\gamma$ : constante psicrométrica ( $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$ ).

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, en la cual se insertan las características propias del cultivo según 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 ( $K_c \text{ ini}$ ) 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  $K_c \text{ ini}$  a una etapa media de desarrollo de cultivo  $K_c \text{ mid}$  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 ETo 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 Kc alcanza su valor máximo. El valor de Kc en esta etapa (Kc med) es relativamente constante para la mayoría de los cultivos y prácticas culturales (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 Kc y ETc 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 Kc disminuye linealmente desde Kc,med hasta Kc,fin (Mekonnen *et al.*, 2011).

El valor de Kc al finalizar la etapa final (Kc 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 Kc fin será alto. Si se permite la senescencia y secado del cultivo en el campo antes de la cosecha, el valor de Kc fin será bajo (Allen *et al.*, 2006).

Para la fase inicial que corresponde a los 30 primeros días, la Kc 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 Kc de la fase inicial y mitad de temporada; en la fase de mitad de temporada correspondiente a los siguientes 30 días el valor de Kc 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 Kc de mitad de temporada y la de final de cultivo; para final de cultivo se utiliza un valor de Kc de 0.80.

El valor de Ks (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:

$$K_s[t] = \left\{ \frac{S[t]}{(1-p) \times S_{max}[t]} \right\} \text{ si } S[t] < (1-p) \times S_{max}[t] \quad (4)$$

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 Smax 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 CROPWAT a partir de las características del suelo y del cultivo.

### 9.2.1 HUELLA VERDE

La huella hídrica verde es el volumen de agua de lluvia consumida durante el proceso de producción (Hoekstra, 2011). De esta forma la huella hídrica es el equivalente a la evaporación del cultivo anteriormente calculada.

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.

$$UAC \text{ Verde} = ETc * 10 \quad (5)$$

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

$$HV = \frac{UAC \text{ Verde}}{\text{rendimiento}} \quad (6)$$

En el sistema productivo bajo invernadero el valor de huella hídrica verde es cero ya que dentro de un invernadero no hay aporte de agua por precipitación.

### 9.2.2 HUELLA AZUL

Para determinar la huella azul en el sistema productivo a campo abierto se consideraron dos componentes: uno en donde se considera 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 de cultivo en donde se considera únicamente el aporte de agua por precipitación. Los cálculos se realizaron a partir de las siguientes ecuaciones:

$$ET \text{ Azul Total} = ET_{total} - ET_{c \text{ Verde}} \quad (7)$$

$$ET \text{ Azul} = ET_{c \text{ mm dec}} - Eff \text{ lluvia. mm dec} \quad (8)$$

Con el valor de ET Azul total se determina el uso de agua azul en el cultivo (UAC Azul  $m^3$  ha) multiplicando por el factor de 10 para expresar el valor en  $m^3$ ha.

$$UAC \text{ Azul } m^3 \text{ ha} = ET \text{ Azul Total} * 10 \quad (9)$$

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

$$HA = \frac{UACAzul}{\text{rendimiento}} \quad (10)$$

Posteriormente se calcula la *ET Azul* total para determinar *UAC Azul*  $m^3ha$  y *HH Azul*  $proc\ m^3\ .ton$  con las ecuaciones 7 y 8 anteriormente descritas.

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

### 9.2.3 HUELLA GRIS

La huella gris se define y calcula como el volumen de agua que se requiere para diluir los contaminantes (sustancias químicas) hasta el punto en que la calidad del agua se mantenga según las normas existentes de calidad del agua en el ambiente (Franke *et al.*, 2013).

En esta investigación se cuantificó la cantidad de agua para diluir la carga contaminante de fertilizantes que contienen nitrógeno y fósforo, así como de fungicidas y pesticidas teniendo en cuenta cada uno de los ciclos productivos como se determinó en la huella verde y azul.

La huella hídrica gris de cada contaminante se calculó de manera individual suponiendo que una cierta fracción fija alcanza el agua subterránea o superficial, de acuerdo con la siguiente fórmula (Hoekstra *et al.*, 2011):

$$HGris = \frac{(\alpha \times Apl)}{C_{max} - C_{nat}} \quad (11)$$

Donde  $\alpha$  es un factor adimensional que representa la fracción de lixiviación y escorrentía, *Apl* indica la tasa de aplicación del producto agroquímico (nitrógeno, fósforo o pesticida) expresada en  $kg\ ha^{-1}$ ,  $C_{max}$  es la concentración máxima

aceptable del contaminante y  $C_{nat}$  representa la concentración natural en el cuerpo de agua receptor.

El movimiento de una sustancia química aplicada en suelo es controlado principalmente por las propiedades físico-químicas de un contaminante, los factores ambientales y las prácticas de manejo agrícola. La cantidad de sustancia química que va a llegar a un cuerpo de agua (ya sea subterránea o agua superficial) dependerá de la fracción de lixiviación y escorrentía ( $\alpha$ ) del producto químico aplicado. Este fracción es el porcentaje de sustancia química que se pierde por lixiviación y llega a las aguas subterráneas o a las aguas superficiales por escorrentía (Franke *et al.*, 2013).

Para el cálculo de la lixiviación y la escorrentía del producto agroquímico se tuvo en cuenta la metodología desde su tasa de aplicación. Este enfoque de cálculo es calificado como uno de los preferidos, sin embargo demanda una alta cantidad de datos, dentro de las cuatro maneras de estimar la lixiviación y escorrentía de agroquímicos (Franke *et al.*, 2013). La fracción de la lixiviación y escorrentía se calculó según la siguiente fórmula:

$$\alpha = \alpha_{min} + \frac{\sum_i S_i \times W_i}{\sum_i W_i} \times (\alpha_{max} - \alpha_{min}) \quad (12)$$

Donde  $\alpha_{min}$  y  $\alpha_{max}$  son las fracciones mínimas y máximas de lixiviación y escorrentía para cada nutriente (Tabla 1). Los factores que influyen en la fracción están relacionados con el medio ambiente y las prácticas agrícolas implicadas. Estas se evaluaron cualitativamente otorgando una puntuación (s) que se multiplica por un peso (w) con respecto a la importancia de cada factor. Los factores que influyen en el potencial de lixiviación y escorrentía, sus calificaciones de escala y pesos, para el nitrógeno y el fósforo se pueden encontrar en Franke *et al.* (2013).



**Tabla 1. Mínima, promedio y máxima fracción de lixiviación y escorrentía ( $\alpha$ ) para nutrientes, metales y pesticidas.**

	Nutrientes		Metales	Pesticidas
	Nitrógeno	Fósforo		
Fracción mínima de Lixiviación y escorrentía $\alpha_{min}$	0.01	0.0001	0.4	0.0001
Promedio de la fracción de Lixiviación y Escorrentía $\alpha_{pro}$	0.1	0.03	0.7	0.01
Fracción máxima de Lixiviación y escorrentía $\alpha_{max}$	0.25	0.05	0.9	0.1

Franke *et al.* (2013).

La concentración máxima permisible ( $C_{max}$ ) para el nitrógeno se fijó en 10 mg l<sup>-1</sup>, basado en la legislación de Colombia, mientras que para el fósforo se utilizó un valor de 0.02 mg l<sup>-1</sup>, según lo sugerido por CCME (2004). Las concentraciones de fondo naturales ( $C_{nat}$ ) se establecieron a 1E-04 y 1E-05 kg m<sup>-3</sup> para el nitrógeno y el fósforo, respectivamente (Chapman, 1996).

Para los plaguicidas se siguió el mismo proceso mediante la estimación de su Huella Gris individual basada en la ecuación 10. Las fracciones  $\alpha_{min}$  y  $\alpha_{max}$  fueron igual a 0.0001 y 0.1 (Franke *et al.*, 2013), respectivamente. La determinación de la fracción  $\alpha$  (Ecuación 11) dependía también de factores relacionados con las propiedades químicas de los contaminantes, el suelo, el clima, así como la influencia de las prácticas de manejo.  $C_{max}$  para cada pesticida fue asignado de acuerdo con la actual legislación colombiana, que lo define como una función de la CL50 de pesticidas, en un rango de 1E-07 a 1E-05 kg m<sup>-3</sup> (Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007).

En el caso en que se determine la huella hídrica gris considerando varias sustancias contaminantes como en el presente estudio, se tiene en cuenta 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 de agua gris basado en la sustancia contaminante más crítico es suficiente. Por otro lado, si se quiere especificar el valor por separado de huella hídrica gris de una sustancia contaminante también se puede realizar. (Hoekstra *et al.*, 2011).

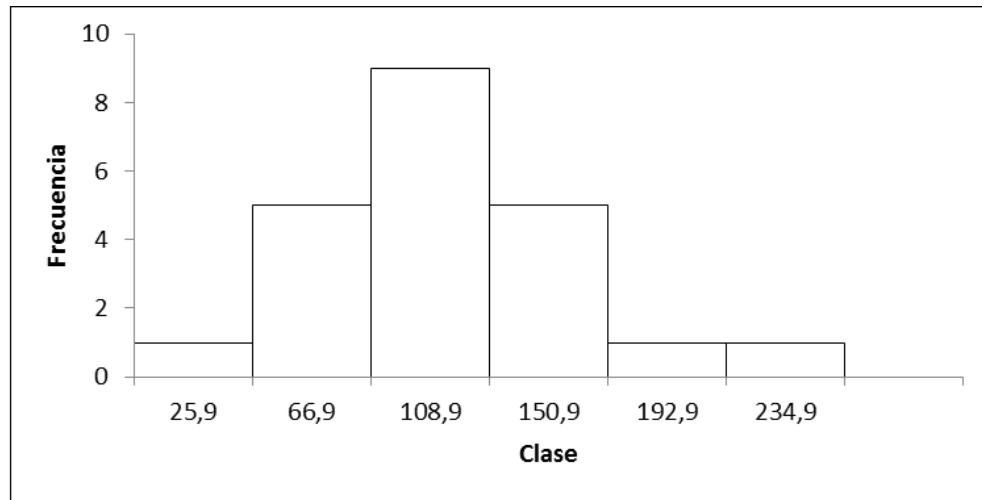
## **10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados y discusión en este estudio se enfocan en la comparación de los sistemas a campo abierto y bajo invernadero en Colombia respecto a huella hídrica, se compara la huella hídrica de tomate con otros países que han realizado el estudio en tomate y también se analiza la huella hídrica respecto a otros productos agrícolas a nivel nacional. Para realizar la comparación en los dos sistemas productivos de tomate es necesario analizar los componentes huella hídrica verde, azul y gris individualmente y después hacer una comparación de la huella hídrica total.

### **10.1 HUELLA HÍDRICA VERDE**

#### **10.1.1 Huella hídrica verde a campo abierto**

Al realizar estadística descriptiva a los datos obtenidos se observa que los valores mínimo y máximo se encuentran considerablemente alejados de la media, lo que hace que la media y la mediana difieran de manera significativa y se consideren como un conjunto no homogéneo. En este sentido se realiza agrupación de datos para mirar el comportamiento de su distribución.



**Fig. 1. Histograma para la huella hídrica verde en el sistema a campo abierto en el departamento de Santander.**

Con la agrupación de datos se puede observar que son solo tres los que generan mayor dispersión y una mayor frecuencia se encuentra entre 25.9 y 150.9  $\text{m}^3.\text{ton}^{-1}$  y la mayor concentración se encuentra entre 66.9 y 108.9  $\text{m}^3.\text{ton}^{-1}$  representando el 45% del total de datos. Teniendo en cuenta esta distribución se puede decir que la huella hídrica verde para el sistema productivo de tomate a campo abierto es 87.9  $\text{m}^3.\text{ton}^{-1}$ .

Si comparamos la huella hídrica verde de Colombia con la de otros países como España que tiene un valor de 118  $\text{m}^3.\text{ton}^{-1}$  se puede observar que en este país es mucho mayor pero hay que considerar que el dato tiene en cuenta el agua virtual exportada no el de producción total y aunque maneja sistemas productivos similares al nuestro, la diferencia puede también radicar en las diferentes prácticas de manejo que adoptan debido a la elevada demanda de producción. Aproximadamente 957,000 toneladas de tomate fresco español se exportan a la Unión Europea. Por otro lado la ubicación geográfica hace que los parámetros climáticos como la lluvia difiera (Chapagain, 2008) (Chico *et al.*, 2010).

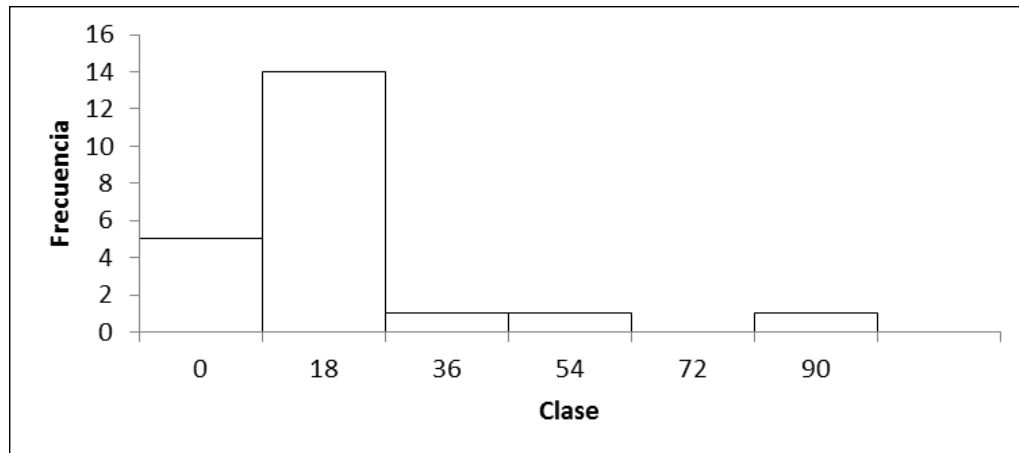
En el contexto nacional, teniendo en cuenta las cifras de producción de la encuesta nacional agropecuaria para el 2008 y el estudio publicado por WWF publicado en 2012 con año de estudio en el 2008, la huella hídrica verde para el sector agrícola fue de 1414.7 m<sup>3</sup>.ton<sup>-1</sup> (Arévalo, 2011) (Ena, 2008).

Sin tener en cuenta el tipo de sistema productivo los cultivos que generan una mayor huella hídrica verde son el café con un 22% del total y el plátano, la caña de azúcar y maíz cada uno con un 13%. Los productos hortícolas en los cuales se encuentra el tomate además de la arveja, cebolla, haba, zanahoria y otros representan el 5% de la huella hídrica verde del sector productivo en el país (Arévalo, 2011).

## **10.2 HUELLA HÍDRICA AZUL**

### **10.2.1 Huella hídrica azul a campo abierto**

En este tipo de sistema el consumo de agua azul es menor y se utiliza únicamente cuando el agua por precipitación no alcanza a cubrir el requerimiento del cultivo en fase de producción. Al igual que los datos obtenidos para la huella hídrica verde se realiza una agrupación de datos para determinar el comportamiento de su distribución.



**Fig. 2. Histograma para la huella hídrica azul en el sistema a campo abierto en el departamento de Santander.**

Al observar los datos agrupados se puede observar que el 86.4 % del total de los datos se encuentran en las primeras dos frecuencias correspondientes a 0 y 36  $m^3 \cdot ton^{-1}$ . Los valores que se encuentran en otras clases corresponden a frecuencias muy bajas entre 0 y 1 datos. Se puede también observar que la segunda clase 18 y 36  $m^3 \cdot ton^{-1}$  tiene el 63.6% de los datos por lo cual se toma como clase representativa del conjunto de datos. Considerando esto, se establece que la huella hídrica azul para el sistema a campo abierto tiene un valor de 26  $m^3 \cdot ton^{-1}$ .

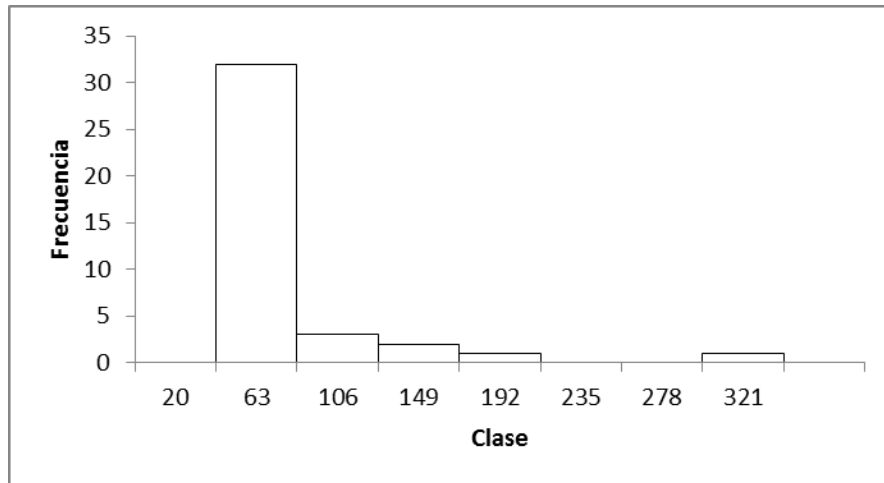
Estudios internacionales sobre huella hídrica en sistemas productivos de tomate no reportan la huella hídrica específicamente en este sistema productivo, aunque si hay una discriminación para el sistema bajo invernadero y las demás huellas hídricas.

A nivel nacional sin discriminar tipo de sistema productivo el cultivo hortícola representa una huella hídrica azul del 5%. El arroz con un 41% de la huella hídrica azul nacional, la palma africana con un 12% y el maíz también con un 12% son los cultivos que más huella hídrica azul aportan debido a la naturaleza de los cultivos,

sus prácticas de manejo y sistemas de oferta y demanda que puede ser nacional o internacional (Arévalo, 2011).

### 10.2.2 Huella hídrica azul bajo invernadero

Se puede observar que los valores de huella hídrica azul para este sistema por ciclo son mayores respecto al sistema a campo abierto debido a que en este sistema productivo, la única entrada de agua para consumo corresponde a agua azul.



**Fig. 3. Histograma para la huella hídrica azul en el sistema bajo invernadero en el departamento de Boyacá.**

Se puede observar que 32 de los 39 datos se encuentran agrupados en una misma clase, la cual tiene valores entre 20 y 63  $\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ , el resto de valores se encuentran representando muy bajas frecuencias. La huella hídrica azul en el sistema bajo invernadero es de 41.5  $\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$  considerando el valor central de la clase representativa.

Si se comparan la huella hídrica azul en los sistemas productivos a campo abierto y bajo invernadero se puede decir que hay una relación de casi el doble. El sistema a campo abierto tiene una huella hídrica de  $26 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$  mientras que el sistema bajo invernadero tiene una huella hídrica de  $41.5 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$ . Esta relación se debe a que el sistema a campo abierto, cuenta con agua por precipitación y en el sistema bajo invernadero es necesario recurrir a fuentes superficiales y subterráneas de agua.

En el contexto internacional, específicamente Australia reporta una huella hídrica azul de  $40 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$  teniendo en cuenta sistemas productivos de tomate con características similares a las de este estudio. En Australia estos sistemas productivos se les denomina como sistemas de baja tecnología aunque también cuentan con otros sistemas bajo invernadero llamados de media y alta tecnología los cuales tienen diferentes materiales y sistemas de calefacción que si bien optimizan la utilización del recurso hídrico, pueden generar otros impactos ambientales como la producción de emisiones de  $\text{CO}_2$  (Page, 2012).

Comparando el sistema bajo invernadero en Colombia con su homólogo en Australia, se puede decir que la diferencia se debe a las prácticas de manejo diferentes por las necesidades de mercado en esta zona.

En España, el reporte para huella hídrica azul para sistemas bajo invernadero es  $84.96 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$  que si bien es más del doble que el valor en Colombia es importante tener en cuenta que la demanda que cubre el tomate en España es mucho mayor (Chico *et al.*, 2010).

### **10.3 HUELLA HÍDRICA GRIS**

#### **10.3.1 Huella hídrica gris a campo abierto**

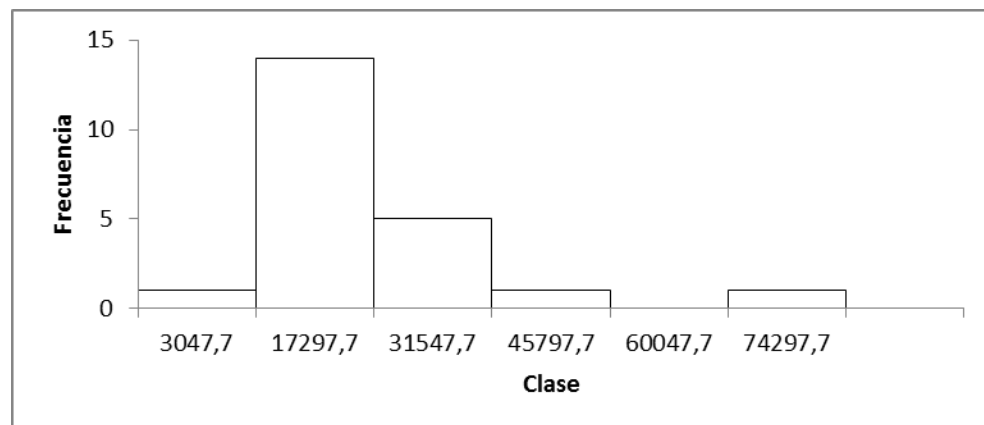
El componente establecido con más frecuencia para huella hídrica gris en el sistema productivo bajo invernadero es el fósforo, representando el 63.6% del total



de los ciclos y en segunda medida se encuentran los pesticidas con un 36.4%. El componente nitrógeno no se establece como huella hídrica gris en ninguno de los ciclos productivos debido a que sus valores son significativamente menores en comparación con los otros, sin embargo, se considera su aporte para comparar huella hídrica gris con otros estudios que lo consideran como componente único.

El valor de cada uno de los tres componentes depende principalmente del factor de lixiviación el cual se define como el porcentaje de sustancia química que se pierde por lixiviación y llega a las aguas subterráneas o superficiales por escorrentía (Franke *et al.*, 2013). Este depende del ambiente del sistema, las prácticas agrícolas implicadas, la concentración máxima y mínima permisible según la legislación del lugar de medición y la tasa de aplicación que tiene el producto.

La huella hídrica gris en este sistema productivo se da principalmente por el aporte de fósforo, que si tiene un valor de lixiviación y unas concentraciones permisibles menores según la legislación, tiene una mayor tasa de aplicación para la mayoría de los ciclos productivos que los otros componentes y por lo tanto requiere un mayor volumen de agua para diluir su concentración a la permisible. A continuación se muestran los resultados de la huella hídrica gris a campo abierto.



**Fig. 4. Histograma para la huella hídrica gris en el sistema a campo abierto en el departamento de Santander.**

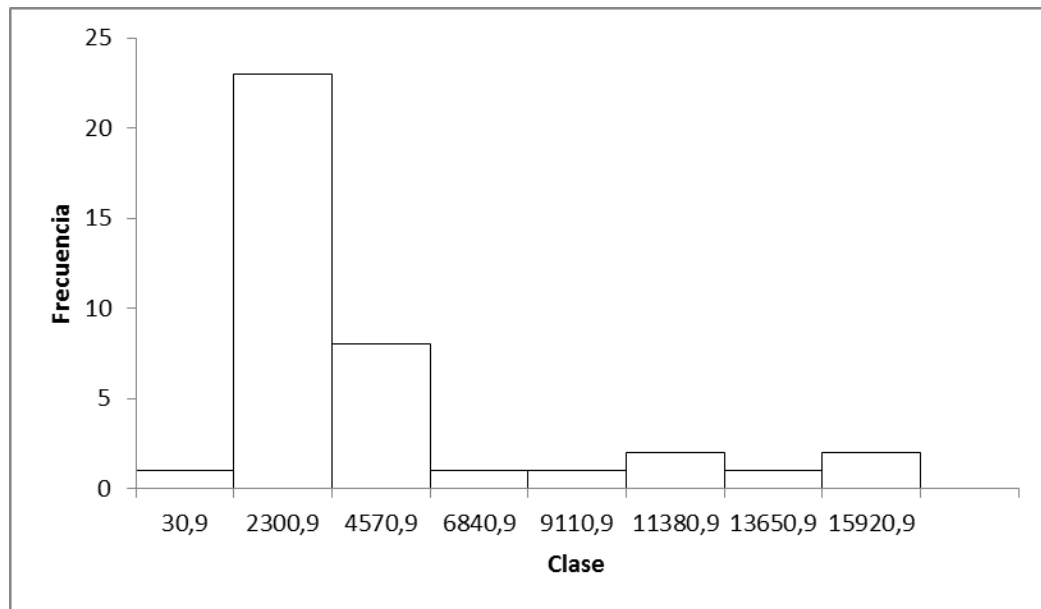
Teniendo en cuenta esta distribución de datos, se puede observar que la mayoría se encuentran entre la clase dos y tres representando el 86.36% de los datos y ubicándose en un rango entre 3047.7 y 31547.7  $\text{m}^3.\text{ton}^{-1}$ . Teniendo en cuenta esta distribución el valor para la huella hídrica gris a campo abierto es 17297.7  $\text{m}^3.\text{ton}^{-1}$  teniendo en cuenta el valor central de las clases representativas.

A nivel internacional, un estudio realizado en 2010 muestra que la huella hídrica gris para los sistemas productivos a campo abierto de tomate en España es de 811.4  $\text{m}^3.\text{ton}^{-1}$  sin embargo considera únicamente el aporte a huella gris por nitrógeno. Si se reporta también únicamente el valor por nitrógeno en este estudio, correspondería a 75.2  $\text{m}^3.\text{ton}^{-1}$  que sería mucho menor al reportado en España y además hace evidente la importancia de la determinación de los otros componentes: fósforo y pesticidas, tenidos en cuenta en el presente estudio (Chico *et al.*, 2010).

En Sidney (Australia) se reporta un valor de 39  $\text{m}^3.\text{ton}^{-1}$  en los sistemas productivos a campo abierto para la huella hídrica gris, estudio en el cual se considera únicamente el consumo por nitratos. Aunque es menor que el aporte por nitrógeno en Colombia se realizaría una mejor comparación si se tienen en cuenta los demás componentes considerados en el presente estudio (Page *et al.*, 2012).

### **10.3.2 Huella hídrica gris bajo invernadero**

El componente establecido con más frecuencia para huella hídrica gris en el sistema productivo bajo invernadero al igual que a campo abierto es el fósforo, representando el 84.6% del total de los ciclos y en segunda medida se encuentran los pesticidas con un 15.4%. El componente nitrógeno no se establece como huella hídrica gris en ninguno de los ciclos debido a que sus valores son significativamente menores.



**Fig. 5. Histograma para la huella hídrica gris en el sistema bajo invernadero en el departamento de Boyacá.**

Teniendo en cuenta los datos agrupados se puede observar que el 58.9% se encuentran en la segunda clase correspondiendo a valores entre 30.9 y 2300.9  $\text{m}^3.\text{ton}^{-1}$  el resto de datos se encuentran en frecuencias bajas. En esta medida y tomando el valor central de esta clase la huella hídrica gris para el sistema bajo invernadero en el departamento de Boyacá es 1165.9  $\text{m}^3.\text{ton}^{-1}$ .

Si se compara el resultado de huella hídrica gris en este estudio para Colombia con un reporte del sistema productivo español para el mismo tipo de sistema el cual arrojó 139.24  $\text{m}^3.\text{ton}^{-1}$  se observa en primera medida que es mucho menor. Sin embargo cabe resaltar que en el estudio español, se considera únicamente el aporte de nitrógeno para la determinación de la huella hídrica gris.

Si en este estudio se considera únicamente el valor de nitrógeno para huella hídrica gris sería 85.9  $\text{m}^3.\text{ton}^{-1}$ . En este caso la huella gris sería menor. Esta diferencia se puede explicar primero porque en España el reporte tiene en cuenta producción nacional, promedio por provincias y en Colombia se considera producción en el departamento de Boyacá, que si bien, es la región con más productividad de tomate bajo invernadero en el país siendo representativa, no

tiene en cuenta toda la producción nacional y por otro lado ambos países tienen diferente demanda (Chico *et al.*, 2010).

En Australia se reporta una huella hídrica gris de  $73 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$  teniendo en cuenta sistemas productivos bajo invernadero con las características similares a las de Colombia, pues en este país manejan cuatro sistemas productivos representativos que son campo abierto, baja, media y alta tecnología bajo invernadero. Este resultado que muestran en el estudio considera únicamente el aporte a huella gris por Nitratos, que si es 15% menor que en Colombia se debe a la ubicación geográfica y las diferencias en prácticas de manejo (Page *et al.*, 2012).

En Colombia, sin discriminar tipo de sistema productivo el café y el arroz ocupan el primer y segundo lugar para huella hídrica gris con valores del 55% y 19% respectivamente. Los cultivos hortícolas y entre ellos el tomate muestran un valor aproximado menor, del 8%.(Arévalo, 2011).

## **10.4 HUELLA HÍDRICA TOTAL**

### **10.4.1 Huella hídrica total a campo abierto**

Teniendo en cuenta los resultados de huella hídrica verde, azul y gris, la huella hídrica total del sistema a campo abierto es  $17411.6 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$ ; el aporte de huella hídrica verde a este valor final es del 0.5%, el de huella azul es 0.15% y la huella gris aporta en un 99.3%. De esta manera se observa que la huella hídrica gris en comparación con la huella hídrica verde y azul para este sistema es mucho mayor, lo que quiere decir que el agua utilizada para diluir la carga contaminante ya sea por nitrógeno, fósforo o pesticidas es la más consumida por el cultivo generando un mayor impacto ambiental.

Estudios internacionales sobre huella hídrica en cultivo de tomate a campo abierto como en Australia y España han reportado valores de  $44 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$  y  $966 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$  respectivamente, en España el 84% de este valor corresponde a huella hídrica

gris. (Page *et al.*, 2010). Es importante resaltar que estos estudios corresponden a diferentes metodologías en la recolección de datos, se basan en información secundaria, no tienen en cuenta el aporte por nitrógeno para huella gris como se realizó en el presente estudio y el tamaño de las regiones y las demandas obedecen a dinámicas económicas diferentes.

#### **10.4.2 Huella hídrica total bajo invernadero**

Considerando los valores obtenidos de huella hídrica azul y huella hídrica gris para el sistema bajo invernadero se obtiene una huella hídrica total de  $1207.4 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$  del cual, el 3.4% representa la huella hídrica azul y 96.5% representa la huella hídrica gris en el sistema productivo, lo que demuestra que la huella hídrica gris y a su vez el uso de fertilizantes y pesticidas representa un mayor impacto ambiental en el consumo de agua.

España, uno de los países europeos con mayor producción de tomates por su demanda internacional reporta una huella hídrica total exportada de  $236 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$ . Se podría hacer una comparación con Colombia si el estudio español considerara el uso por fosfatos y pesticidas así como en el presente estudio (Chico *et al.*, 2010).

En Australia, específicamente Sidney el reporte de huella hídrica en cultivos de tomate es de  $113 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$ , estudio en cual tampoco consideran la huella hídrica gris con sus tres componentes considerados en este estudio. Al igual que el estudio en España que solo consideran el aporte por nitrógeno (Chico *et al.*, 2010). (Page *et al.*, 2012).

A nivel nacional sin tener en cuenta tipo de sistema productivo en específico el cultivo de productos hortícolas y entre estos el tomate se encuentran con un valor estimado no superior al 8% de la huella hídrica total agrícola del país (Arévalo, 2011). Otros cultivos como el café, maíz y arroz reportan la mayor huella hídrica con valores porcentuales del 22, 13 y 12%.

Teniendo en cuenta los datos nacionales por cultivo, se ha estimado que el café para el 2008 exportó 604,629 toneladas principalmente a Estados Unidos, Japón, Alemania, Bélgica y Canadá generando una huella hídrica por unidad de producción de  $11113 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$  y una exportación de agua virtual por comercio que asciende a  $6631 \text{ Mm}^3.\text{año}^{-1}$ . Esta exportación representa el 4% del volumen total de agua circundante por comercio internacional de los productos agrícolas ubicándolo como el quinto producto agrícola de participación global tras el algodón, la soya, el trigo y el cacao.

La palma africana es un producto que se produce en 83 municipios del país y sitúa a Colombia como uno de los mayores exportadores de aceite de palma en el mundo con un valor de producción de 292,137 toneladas después de Malasia, indonesia, Holanda, Nueva Guinea y Tailandia. La huella hídrica de este producto por unidad de masa para el 2008 se estimó de  $3,653 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$  lo que implica una exportación de agua virtual de  $1,067 \text{ Mm}^3.\text{año}^{-1}$ .

Para este mismo año, otro producto que lideró la exportación en Colombia fue el banano, que produciéndose en 144 municipios del país genera un valor de producción de 1, 798,283 toneladas situando al país como quinto exportador después de Ecuador, Malasia, Filipinas y Costa Rica. Su huella hídrica estimada de producción es de  $483 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$  implicando una exportación de agua virtual de  $869 \text{ Mm}^3.\text{año}^{-1}$  y representando menos del 0,3% de volumen global de agua virtual por productos agrícolas, en esta categoría ocupa el puesto 19.

Las flores, que también tienen gran importancia en el comercio internacional y de exportación en el país ubicándolo en el segundo lugar después de Holanda con un valor de producción de 207,707 toneladas, reporta una huella hídrica por producción de aproximadamente  $900 \text{ m}^3.\text{ton}^{-1}$  que implica que el agua virtual exportada se encuentra alrededor de  $190 \text{ Mm}^3.\text{año}^{-1}$ . Este cultivo, es reconocido por contar con sistemas altamente eficientes para el suministro de agua por riego, según Asocolflores, la fuente de agua utilizada proviene 54% de agua lluvia y el 46% de aguas superficiales y subterráneas. Se estima que estos sistemas pueden suministrar agua de riego aproximadamente  $37 \text{ m}^3.\text{ha}.\text{día}^{-1}$  (Arévalo, 2011).

## 11. CONCLUSIONES

Comparando el impacto ambiental, respecto a consumo de agua, en los dos sistemas productivos de tomate aplicados en Colombia, el sistema a campo abierto es el que genera un mayor impacto teniendo en cuenta los aportes por huella hídrica verde, azul y gris. Aunque en el sistema bajo invernadero no se considera el aporte por huella hídrica verde, la diferencia en éste no es significativa como si lo es el aporte por huella hídrica gris.

La huella hídrica gris en el sistema a campo abierto es mayor en cada una de las sustancias aportantes, nitrógeno, fósforo y pesticidas porque las prácticas de manejo corresponden a sistemas con menos control. Al ser sistemas abiertos a la intemperie no es posible obtener unas condiciones controladas climáticas de temperatura y humedad las cuales favorecen el ataque de plagas y enfermedades obligando al agricultor a utilizar mayor cantidad de pesticidas y por otro lado al tener menor aprovechamiento del área de cultivo respecto al sistema a campo abierto y necesitar periodos más largos de producción requiere también de más fertilizantes para lograr una mayor productividad.

La huella hídrica gris aporta aproximadamente el 97% de la huella hídrica total en los dos sistemas productivos representativos en Colombia. En esta medida, es el aporte más importante para determinar la huella hídrica en sistemas productivos. A diferencia del presente estudio, la mayoría de investigaciones que incluyen huella hídrica gris determinan este factor considerando únicamente el aporte por nitrógeno sin tener en cuenta el de otras sustancias como fósforo y pesticidas que en este estudio resultaron significativamente mayores y determinaron el valor de huella hídrica. Esta ausencia hace que las comparaciones entre sistemas productivos o productos agrícolas respecto al consumo hídrico no se realicen de manera directa.

La huella hídrica del tomate en Colombia respecto a huellas hídricas de tomate reportadas en otros países es diferente, primero porque los sistemas productivos en estos países son diferentes estructuralmente y en adecuación tecnológica lo que hace que las prácticas de manejo se ajusten a sus necesidades. En segunda

medida, la economía de cada país tiene una dinámica de mercado diferente que influye directamente en la oferta y demanda de los productos agrícolas y finalmente la información que utilizan en estas investigaciones internacionales es en su mayoría secundaria, la cual siendo confiable, corresponde a información que viene de estudios con propósitos diferentes y no comparte el objeto de estudio con la investigación en donde se plasma. Este estudio considera información primaria que si bien requiere de más rigor, tiempo y costos técnicos es establecida con base a los propósitos generales y específicos del objeto de la investigación.

Otros productos agrícolas en Colombia como café, maíz, arroz, palma africana, banano y flores, tienen una mayor huella hídrica, primero porque su gestión requiere de más agua y porque son productos que satisfacen demanda de exportación principalmente a los mercados de Estados Unidos y Europa. Por la misma razón, son productos que hacen una significativa exportación de agua virtual. El cultivo de tomate, como el de otras hortalizas en Colombia, no requiere de tanta agua para su producción, además que satisfacen en mayor medida el mercado nacional y el consumo local regional haciendo que el agua virtual exportada sea insignificante.



## 12. RECOMENDACIONES

Para determinar la huella hídrica en sistemas productivos es recomendable utilizar información primaria porque su implementación se puede diseñar en función de las necesidades técnicas y de los objetivos específicos de la investigación. Con la información secundaria, bases de datos sectoriales, puede pasar que algunos datos específicos para el estudio no se encuentren o no estén actualizados. En segunda medida, es fundamental tomar como unidad de medida el ciclo productivo completo replicando la mayor cantidad de veces para hacer un seguimiento de consumo en cada etapa.

Constantemente, la comunidad científica actualiza diferentes metodologías para la determinación de la huella hídrica en diferentes campos. Para la huella hídrica gris, se recomienda utilizar la metodología N.A Franke publicada en diciembre de 2013 porque considera, el consumo de agua gris por agroquímicos como fósforo y pesticidas que presentaron en este estudio valores significativamente mayores respecto al nitrógeno y de esta forma, fueron seleccionados para la determinación de la huella hídrica gris. El fósforo determinó la huella hídrica gris en este estudio.

Según este estudio, el sistema a campo abierto en tomate es el sistema que tiene mayor huella hídrica por sus requerimientos en el recurso hídrico. La falta de control de las condiciones climáticas favorece el desarrollo de microorganismos que implican el aumento en el uso de pesticidas y de igual forma los cambios drásticos en parámetros climáticos desfavorecen el crecimiento de los frutos y rendimiento del cultivo obligando al agricultor a que aumente la dosis en el uso de fertilizantes. En esta medida, la implementación de prácticas de manejo que reduzcan las anteriores dificultades e incrementen el rendimiento del sistema productivo hará que la huella hídrica sea menor pues en su determinación será menor el volumen de agua utilizado por unidad de producción.

Aunque la huella hídrica verde no se considera en el sistema bajo invernadero, se podrían utilizar sistemas de recolección de agua lluvia para disminuir el consumo

por huella azul y gris minimizando la huella hídrica por estos dos factores que generan más impacto en el recurso hídrico.

Involucrar con rigor el reporte de consumos de agua en los sistemas productivos como buenas prácticas agrícolas para que en determinado momento sea posible calcular la huella hídrica y se pueda establecer un impacto ambiental respecto al agua.

Es imprescindible realizar propuestas para que Instituciones gubernamentales generen incentivos a productores que utilizan sistemas a campo abierto para que disminuyan la dosificación en las cantidades de fertilizantes y pesticidas o que inicien programas para la implementación y cambio a sistemas bajo invernadero.

### 13. BIBLIOGRAFÍA

A.Y. Hoekstra, M.M. Mekonnen. The water footprint of humanity. PNAS (En línea). Diciembre, 2011. Disponible en <http://waterfootprint.org/media/downloads/Hoekstra-Mekonnen-2012-WaterFootprint-of-Humanity.pdf>

A.Y. Hoekstra, P.Q. Hung. Institute for water education – IHE Delft. Virtual water trade. A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. (En línea). Septiembre, 2002. Disponible en <http://waterfootprint.org/media/downloads/Report11.pdf>

AGRONET. Sistema de Estadísticas Agropecuarias – SEA. (En línea). 2013. Disponible en <http://www.agronet.gov.co/agronetweb1/estad%C3%ADsticas.aspx>

AREVALO, LOZANO, & SABOGAL. Estudio Nacional de Huella Hídrica Colombia, Sector Agrícola. En: SOSTENIBILIDAD, TECNOLOGIA Y HUMANISMO. U. P. Cataluña.,Ed., 2011, p. 101-126.

BOJACA, & ARIAS. Evaluation of pesticide in open field and greenhouse tomatoes from Colombia. En: Food Control , 2013, p. 30 , 400-403.

BOJACA, GIL, & COOMAN. Use of geostatistical and crop growth modelling to assess the variability of green house tomato yield caused by spatial temperatura variations. En: Computer and electronics in agriculture, 2009, p .65, 219-217.

BRADLEY, & FISHER. A new water footprint calculation method integrating consumptive and degradative water use into a single stand-alone weighted indicator. En: *The international Journal of life cycle assessment*, June, 2012, p.204-207.

C.A. Parrado, C.R. Bojacá. *Environmental impact of greenhouse tomato production strategies using life cycle assessment approach*. International Society for Horticultural Science (En línea). 2009. Disponible en [www.actahort.org](http://www.actahort.org): [http://www.actahort.org/books/821/821\\_13.htm](http://www.actahort.org/books/821/821_13.htm)

CARDENAS, SANCHEZ, & FARIAS. Los aportes del nitrógeno en la agricultura. En: *Revista Chapingo serie horticultura* , 2004, p.10 (2), 173-178.

CHAPAGAIN, & HOEKSTRA. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. En: *Ecological Economics* , 2006, p.60 (1), 186-203.

CHAPAGAIN. An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: A case of Spanish tomatoes. En: *Journal of Environmental Management* ,2008, p.90, 1219-1228.

CHICO, SALMORAL, LLAMAS, GARRIDO, & ALDAYA. The water footprint and virtual water exports of Spanish tomatoes. En: *Papeles de agua virtual* , 2010, p.8.

CONSEJO MUNICIPAL DE VILLA DE LEYVA. PLAN DE DESARROLLO “VILLA DE LEYVA PATRIMONIO DE TODOS” 2008-2011 (En línea). 2012. Disponible en [http://villadeleyva-boyaca.gov.co/apc-aa-files/30356561656262623732623166396563/PLAN\\_DE\\_DESARROLLO\\_2008\\_2011.pdf](http://villadeleyva-boyaca.gov.co/apc-aa-files/30356561656262623732623166396563/PLAN_DE_DESARROLLO_2008_2011.pdf)

D. Arévalo, J. Lozano & J. Sabogal. Estudio Nacional de Huella Hídrica Colombia, Sector Agrícola (En línea). Estudio realizado para WWF Colombia. SOSTENIBILIDAD, TECNOLOGIA Y HUMANISMO. 2011. Disponible en [http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/11915/1/101-126%20Arevalo\\_Huella%20Hidrica.pdf](http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/11915/1/101-126%20Arevalo_Huella%20Hidrica.pdf)

D. Chico, G. Salmoral, M.R. Llamas, A. Garrido & M.M. Aldaya. THE WATER FOOTPRINT AND VIRTUAL WATER EXPORTS OF SPANISH TOMATOES (En línea). 2010. Disponible en Fundación Botín: <http://www.rac.es/ficheros/doc/00819.pdf>

E.D.BUILES. Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del río Porce (En línea). 2013. Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/10765/1/1017142094.2013.pdf>

F. Cardenas. *Herencia mia, centro de arqueología, historia y patrimonio*. Cultivo de Tomate. (En línea). 2012. Disponible en <http://herenciamia.org/ricaurte/items/show/249>

FAO WATER. Crop Water Information: Tomato (En línea). 2015. Disponible en [http://www.fao.org/nr/water/cropinfo\\_tomato.html](http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_tomato.html)

HOEKSTRA, & MEKONNEN. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Science*, Mayo, 2011.

HOESKTRA, & ALADAYA. *Agricultural Systems*, Marzo, 2010.

J.Dixon, A.Gulliver & D.Gibbon. FAO y Banco Mundial. Sistemas de Producción Agropecuaria y Pobreza CÓMO MEJORAR LOS MEDIOS DE SUBSISTENCIA DE LOS PEQUEÑOS AGRICULTORES EN UN MUNDO CAMBIANTE. (En línea). Roma y Washington DC, 2001. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/003/y1860s/y1860s.pdf>

J.JARAMILLO, V.P. RODRÍGUEZ, M.GUZMÁN, M.ZAPATA & T.RENGIFO. MANUAL TÉCNICO. BUENAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS (BPA) EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE BAJO CONDICIONES PROTEGIDAS (En línea). 2007. Disponible en <http://www.fao.org.co/manualtomate.pdf>

JARAMILLO. The state of research in tomato in Colombia. En: *International Symposium on tomato in the tropics*. ISHS, 2009.

M.M. Lopera, J.H. Homez, M.M, Ordoñez, H.Pabón, (et al). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Asociación Hortifructícola de Colombia - ASOHORFRUCOL. Guía ambiental Hortifructícola de Colombia (En línea). 2009. Disponible en [http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca\\_30\\_GUIAhortifructicultura\[1\].pdf](http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_30_GUIAhortifructicultura[1].pdf)

N.A. FRANKE, H. BOYACIOGLU, A.Y. HOEKSTRA. UNESCO – IHE. Institute for water education. GREY WATER FOOTPRINT ACCOUNTING. TIER 1 SUPPORTING GUIDELINES (En línea). Diciembre, 2013. Disponible en [http://waterfootprint.org/media/downloads/Report65-GreyWaterFootprint-Guidelines\\_1.pdf](http://waterfootprint.org/media/downloads/Report65-GreyWaterFootprint-Guidelines_1.pdf)

Oferta Agropecuaria Cifras 2010. ENCUESTA NACIONAL AGROPECUARIA 2010. DANE. (En línea). 2010. Disponible en [http://www.agronet.gov.co/www/htm3b/public/ena/ena\\_2010.pdf](http://www.agronet.gov.co/www/htm3b/public/ena/ena_2010.pdf)

Oferta Agropecuaria ENA - Cifras 2008. SISTEMA DE INFORMACIÓN DE LA OFERTA AGROPECUARIA, FORESTAL, PESQUERA Y ACUÍCOLA. ENCUESTA NACIONAL AGROPECUARIA 2008 (En línea). 2008. Disponible en [http://www.agronet.gov.co/www/docs\\_agronet/20095694411\\_ENA\\_2008.pdf](http://www.agronet.gov.co/www/docs_agronet/20095694411_ENA_2008.pdf)

PAGE, R. B. Carbon and water footprint tradeoffs in fresh tomato production. En: *Journal of Cleaner production*, Abril, 2012.

PAGE, RIDOUTT, & BELLOTTI. Carbon and water footprint tradeoffs in fresh tomato production . En: *Journal of cleaner production*, 13 April, 2012.

QUIMINET. El uso del fósforo en la agricultura (En línea). 2015. Disponible en <http://www.quiminet.com/articulos/el-uso-del-fosforo-en-la-agricultura-2640242.htm>

R.G.ALLEN, L.S. PEREIRA, D.Raes & M.Smith. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN. (En línea).Roma,2006. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/idp56s.pdf>

ROCKSTROM et Al. Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change. En: *WATER RESOURCES RESEARCH*, 2009, p. 45, 1-16.

SMITH. Policy and technological constrains to implementation of greenhouse gas mitigation options in agrculture. En: *Agriculture Ecosystems and Environment* , 2007, p.118.