



Estimación de la huella hídrica que se genera a partir de la producción agrícola del cultivo predominante en la zona alta de la Cuenca de la Quebrada La Angula

Carlos Fernando Arenas Jiménez

Universidad Pontificia Bolivariana
Seccional Bucaramanga
Facultad de Ingeniería Civil, Escuela de Ingenierías
Bucaramanga, Colombia
2018

Estimación de la huella hídrica que se genera a partir de la producción agrícola del cultivo predominante en la zona alta de la Cuenca de la Quebrada La Angula

Carlos Fernando Arenas Jiménez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería Civil

Director:

Sandra Natalia Correa Torres Ph.D.

Coinvestigador:

Sergio Manuel Pineda Vargas Ph.D.

Grupo de Investigación:

Detección de Contaminantes y Remediación DeCoR

Ingeniería Sanitaria y Ambiental GINSA

Universidad Pontificia Bolivariana

Seccional Bucaramanga

Facultad de Ingeniería Civil, Escuela de Ingenierías

Bucaramanga, Colombia

2018

(Dedicatoria)

*A mi familia, con todo mi amor. A mis maestros Sandra y Sergio,
por su valiosa guía, amistad y consejo. A mis amigos, Guillermo,
Diego y Carlos, porque a pesar de los años siguen riendo conmigo.
A Karen, por su amor y su apoyo ante todo incondicional.*

*“Si añades un poco a lo poco y lo haces con
frecuencia, pronto llegará a ser mucho”*

Budha

Agradecimientos

El autor agradece profundamente a los profesores Sandra Natalia Correa Torres y Sergio Manuel Pineda Vargas por su valiosa guía en el desarrollo de este trabajo, así mismo por sus consejos y permanente motivación. A los profesores Norma Solarte y Hermes Barrera por su valiosa contribución a la realización de este proyecto. A los ingenieros Sandra Villamizar y Alexis Medina por su apoyo profesional y personal. A la dirección de investigaciones, a las facultades de Ingeniería Civil y Ambiental y a la Coordinación de la Maestría en Ingeniería Civil. En general, a todos los compañeros, trabajadores y amigos de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, y a quienes aportaron de alguna manera, a la culminación de este proyecto.

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN.....	14
2.	JUSTIFICACIÓN.....	16
3.	OBJETIVOS	18
3.1	OBJETIVO GENERAL	18
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
4.	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	19
4.1	HUELLA HÍDRICA	19
4.2	HUELLA HÍDRICA EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL	20
4.3	HUELLA HÍDRICA EN COLOMBIA	25
4.4	HUELLA HÍDRICA AZUL, VERDE Y GRIS AGRÍCOLA	28
4.4.1	Huella hídrica azul	29
4.4.2	Huella hídrica verde	30
4.4.3	Huella hídrica gris.....	31
4.5	SOSTENIBILIDAD DE UNA HUELLA HÍDRICA AGRÍCOLA	33
5	ÁREA DE ESTUDIO	36
5.1	CLIMA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA	37
5.2	HIDROGRAFÍA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA	38
5.3	VEGETACIÓN DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA	39
5.4	FAUNA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA	41
5.5	SUELOS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA	41
5.6	GEOLOGÍA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA	41
6	METODOLOGÍA.....	43
6.1	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO	44
6.2	CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA	46
6.2.1.	Cálculo de la huella hídrica agrícola.....	46
6.2.2	Requerimiento de agua azul y verde de los cultivos (CWUverde y CWUazul) ..	47
6.2.3.	Cálculo de la huella hídrica agrícola.....	50
6.2.4	Análisis de sostenibilidad de la Huella Hídrica Agrícola.....	53

	6.3 ANÁLISIS DE ESCENARIOS PARA LA SOSTENIBILIDAD EN EL USO DEL RECURSO HÍDRICO DE LA CUENCA	56
7	RESULTADOS Y ANÁLISIS	57
	7.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO	57
	7.1.1 Mapas del sistema de información geográfico de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula.....	58
	7.1.2 Caudales de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula.....	66
	7.2 HUELLA HÍDRICA DE LOS CULTIVOS PREDOMINANTES EN LA ZONA ALTA DE LA CUENCA LA ANGULA	68
	7.2.1 <i>Huella hídrica durante el año 2007 (año húmedo)</i>	68
	7.2.2 <i>Huella hídrica durante el año 2015 (año seco)</i>	70
	7.2.3 Huella hídrica agrícola por tonelada o agua virtual de los cultivos.....	72
	7.2.4 Huella hídrica a escala mensual.....	75
	7.3 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD DE LA QUEBRADA LA ANGULA	82
	7.3.1 Análisis de sostenibilidad para el año húmedo.....	82
	7.3.2 Análisis de sostenibilidad para el año seco.....	84
	7.4 ESCENARIOS DE LA HUELLA HÍDRICA PARA LA ZONA ALTA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA	86
	7.4.1 Escenario solo piña.....	87
	7.4.2 Escenario solo Lima Tahití.....	88
	7.4.3 Huella hídrica anual de los escenarios respecto al año base 2015.....	91
8	CONCLUSIONES	92
9	BIBLIOGRAFÍA	95

Listas de figuras

Figura 1. Esquema del cálculo general de la Huella Hídrica [9].	33
Figura 2. Mapa de la zona de estudio (zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula. a) ubicación en Colombia [40] b) Ubicación en el Departamento de Santander [41] c) Ubicación en el municipio de Girón y sus alrededores (en morado la zona de estudio) [42]	37
Figura 3. Metodología Cálculo huella hídrica.	44
Figura 4. Identificación y actualización de coberturas con fotografías aéreas (cultivo de piña)	58
Figura 5. Modelo Digital de Elevación (DEM) de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula.	59
Figura 6. Mapa de dirección de flujo de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula	60
Figura 7. Mapa de flujo acumulado de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula	61
Figura 8. Mapa de flujo acumulado y drenajes de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula.	62
Figura 9 . Mapa de pendientes de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula ..	63
Figura 10. Mapa de suelos de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula ..	64
Figura 11. Mapa de usos de suelo de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula	65
Figura 12. Caudal ecológico conforme objetivos ambientales y sus valores de referencia para la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula (CMM: caudal medio mensual)	66
Figura 13. Régimen de caudales ordinarios estacionales para la zona alta de la Quebrada La Angula.	67
Figura 14. Identificación de cultivos realizada con Dron a) Cultivos de piña b) Cultivos de lima Tahití	68
Figura 15. Distribución de la huella hídrica en la zona alta de la cuenca la Angula según tipo de huella y tipo de cultivo para el año húmedo	69
Figura 16. Distribución de la huella hídrica en la zona alta de la cuenca la Angula según tipo de huella y tipo de cultivo para el año seco	71
Figura 17. Comparación de los resultados de la HH agrícola de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula con Mekonnen y Hoekstra (2011)	74
Figura 18. Huella hídrica verde, azul y gris mensual para los cultivos de piña y lima Tahití para el año húmedo	78
Figura 19. Huella hídrica verde, azul y gris mensual para los cultivos de piña y lima Tahití para el año seco	81
Figura 20. Huella hídrica verde versus disponibilidad de agua verde mensual (DAV) de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula año húmedo	83
Figura 21. Huella hídrica azul versus oferta de agua azul neta de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula año húmedo.	83

Figura 22. Huella hídrica gris versus oferta natural de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula para el año húmedo	84
Figura 23. Huella hídrica verde versus disponibilidad de agua verde mensual (DAV) de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula para un año seco	85
Figura 24. Huella hídrica azul versus oferta de agua azul neta de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula para un año seco	85
Figura 25. Quebrada La Angula en estado crítico durante la sequía del segundo semestre del año 2015 [49]......	86
Figura 26. Huella hídrica verde y gris mensual para el “Escenario solo piña”	88
Figura 27. Huella hídrica azul mensual para el “Escenario solo lima Tahiti”	90
Figura 28. Comparación de los resultados de huella hídrica anual (azul, verde y gris) de los escenarios respecto al año base 2015 (seco)	91

Listas de tablas

Tabla 1. Principales especies presentes en el bosque húmedo pre montano	40
Tabla 2. Etapas para la implementación del sistema de información geográfica de la cuenca La Angula.....	45
Tabla 3. Valores de referencia para asignar un volumen de caudal ecológico conforme a los objetivos ambientales	54
Tabla 4. Comparación de huella hídrica por tonelada respecto al promedio mundial	73
Tabla 5. Comparación de huella hídrica por tonelada respecto a otros países	75

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviatura o símbolo	Término
HH	Huella hídrica
<i>HHA</i>	Huella hídrica azul
<i>HHV</i>	Huella hídrica verde
<i>HHG</i>	Huella hídrica gris
<i>CWU_{verde}</i>	Requerimiento de agua verde del cultivo (m ³ /ha)
<i>CWU_{azul}</i>	Requerimiento de agua azul del cultivo (m ³ /ha)
<i>Y</i>	Rendimiento del cultivo (ton/ha)
<i>Kc</i>	Coeficiente del cultivo
<i>Ky</i>	Coeficiente de rendimiento del cultivo
<i>ADT</i>	Agua disponible total en el suelo
<i>CC</i>	Capacidad de campo
<i>PMP</i>	Punto de marchites permanente
<i>E</i>	Evaporación
<i>ET</i>	Evapotranspiración
<i>T</i>	Temperatura
<i>P</i>	Precipitación
<i>HR</i>	Humedad relativa
<i>Rn</i>	Radiación neta
<i>VV</i>	Velocidad del viento
<i>Q</i>	Caudal
<i>DEM</i>	Modelo de elevación digital
<i>E_{azul}</i>	Escasez de agua azul
<i>E_{verde}</i>	Escasez de agua verde
<i>DAV</i>	Disponibilidad de agua verde
<i>OA</i>	Oferta de agua azul
<i>N</i>	Nitrógeno
<i>P</i>	Fósforo
<i>L</i>	Carga contaminante
<i>C_{max}</i>	Carga contaminante máxima
<i>C_{nat}</i>	Concentración natural

Abreviatura o símbolo	Término
<i>IDEAM</i>	Instituto de Hidrología y Estudios Ambientales
<i>CDMB</i>	Corporación autónoma para la defensa de la meseta de Bucaramanga
<i>IGAC</i>	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
<i>FAO</i>	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura
<i>WWF</i>	World Wide Fund for Nature
<i>CORPOICA</i>	Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Estimación de la huella hídrica que se genera a partir de la producción agrícola del cultivo predominante en la zona alta de la Cuenca de la Quebrada La Angula

AUTOR(ES): Carlos Fernando Arenas Jiménez

PROGRAMA: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Sandra Natalia Correa Torres

RESUMEN

El presente estudio cuantifica la huella hídrica azul, verde y gris de las actividades agrícolas de los cultivos predominantes en la zona alta de la cuenca de la quebrada La Angula, en Lebrija, Santander. Así mismo se analiza la gestión del recurso hídrico utilizado en las actividades agrícolas. Para los años estudiados (húmedo y seco), el consumo total para la producción anual de piña y lima Tahití fue de 16.905.911,040 m³ teniendo en cuenta la huella hídrica azul, verde y gris. Del total de las huellas, el 74% corresponde a la producción de la lima Tahití con un gasto de 12.499.284,21 m³, y el 26%, corresponde a un volumen de consumo de 4.406.626,83 m³ para la producción de piña. Para la lima Tahití el rendimiento del cultivo fue de 21,8 ton/Ha, mientras que el de la piña fue de 44,6 ton/Ha; por su parte, la huella por tonelada fue de 486,15 m³/ton y 96.49 m³/ton respectivamente. Para analizar el cambio de huella hídrica según se presenten variaciones en los cultivos, se plantearon los escenarios Solo piña y solo Lima Tahití. Se evidencia que para el Escenario solo piña la huella total es menor, representando una disminución de cerca del 51.5% con 8.208.833,38 m³ respecto a los 16.905.911 m³ del año 2015, mientras que el Escenario solo lima Tahití significa un incremento de aproximadamente 37.4% con un volumen de 26.985.525,4 m³ en relación al año 2015.

PALABRAS CLAVE:

Huella hídrica, agua virtual, actividades agrícolas, quebrada La Angula

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Estimation of the water footprint that is generated from agricultural production of the predominant crop in the upper area of the La Angula Stream Basin

AUTHOR(S): Carlos Fernando Arenas Jiménez

FACULTY: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR: Sandra Natalia Correa Torres

ABSTRACT

The present study quantifies the blue, green and gray water footprint of the agricultural activities of the predominant crops in the upper area of the basin of the La Angula stream, in Lebrija, Santander. Likewise, the management of the water resource used in agricultural activities is analyzed. For the years studied (wet and dry), the total consumption for the annual production of pineapple and Tahiti lime was 16,905,911,040 m³ taking into account the blue, green and gray water footprint. Of the total of the footprints, 74% corresponds to the production of the Tahiti lime with an expenditure of 12,499,284.21 m³, and 26%, corresponds to a volume of consumption of 4,406,626.83 m³ for the production of pineapple. For the Tahiti lime, the yield of the crop was 21.8 tons / Ha, while that of the pineapple was 44.6 tons / Ha; On the other hand, the footprint per ton was 486.15 m³ / ton and 96.49 m³ / ton respectively. To analyze the change of water footprint according to variations in crops, the Only pineapple and only Lima Tahiti scenarios were considered. It is evident that for the Pineapple Scenario only the total footprint is lower, representing a decrease of about 51.5% with 8,208,833.38 m³ with respect to the 16,905,911 m³ of the year 2015, while the Scenario only lima Tahiti means an increase of approximately 37.4% with a volume of 26,985,525.4 m³ in relation to the year 2015.

KEYWORDS:

Water footprint, virtual water, agricultural activities, La Angula stream

1. INTRODUCCIÓN

La quebrada La Angula del municipio de Lebrija es una zona con diversos problemas relacionados al uso del agua, recurso de gran interés para todas las actividades económicas que se dan en la cuenca. Dentro de las actividades que se presentan, está la ganadería a pequeña escala, y cultivos de cítricos, piña y maracuyá. Según el POMCA, 2004 de la subcuenca Lebrija Alto, las coberturas que se presentan en la microcuenca Angula- Lajas son las siguientes: cultivos transitorios 5832,92 Ha, cultivos permanentes 1084,06 Ha, cultivos mixtos 2798,8 Ha, pastos naturales 4094,47 Ha, pastos mejorados 417 Ha, bosques secundarios 3021,89 Ha y rastrojos 2660,72 Ha [1].

De acuerdo a lo anterior, se puede apreciar que mientras los bosques naturales no superan las 6.000 Ha (porcentaje equivalente), las actividades agropecuarias ocupan un área de suelo de cerca de 15.000 Ha (porcentaje equivalente). Estos reemplazos de las coberturas naturales por actividades agropecuarias están llevando a deteriorar progresivamente la salud natural de la microcuenca La Angula, afectando la disponibilidad y calidad del recurso hídrico y amenazando el normal desarrollo de las actividades económicas que proporcionan la subsistencia a la población que se ubica actualmente en la zona. Lo anterior se resume en aparición de conflictos de carácter socio ambiental que deben ser foco de medidas de planeación y mitigación con el fin de promover el desarrollo sostenible en el área de la cuenca, y detener el deterioro progresivo de los recursos naturales disponibles.

Esta región ha sido objeto de estudio por entidades como la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), las cuales han realizado investigaciones en relación al suelo, a la caracterización biótica, y de conflictos socioeconómicos [1][39]. Sin embargo, la cuenca debe ser objeto de estudios más

detallados sobre la sostenibilidad del uso del agua en las actividades económicas que se están desarrollando, pues estas podrían poner en riesgo la calidad y la disponibilidad del preciado recurso para la población que habita en la zona de influencia.

De acuerdo a lo anterior, se plantea la pregunta de investigación: ¿Es sostenible la huella hídrica de los cultivos predominantes de la zona alta de la quebrada La Angula del Municipio de Lebrija en relación con la disponibilidad del recurso hídrico de la zona y qué variaciones en la gestión y sostenibilidad del recurso pueden generarse si se presentan cambios en la situación actual de las actividades agrícolas?

2. JUSTIFICACIÓN

Durante los últimos años, los requerimientos hídricos del desarrollo urbano- industrial han provocado cambios drásticos en muchos ecosistemas acuáticos, generando impactos ambientales importantes como reducción de caudales, descenso en los niveles de acuíferos y cambios en los patrones naturales de los cuerpos de agua [2]. Es claro entonces que las actividades humanas consumen y contaminan grandes volúmenes de agua, causando una degradación generalizada en los ecosistemas acuáticos intervenidos. Se estima que el mayor consumo de agua en el mundo se da en la industria agrícola. Por lo anterior, surge el concepto de huella hídrica como un indicador que ayuda a la comprensión y cuantificación de los efectos relacionados con el ciclo de vida de un producto sobre el recurso hídrico [3] [9] [10]. En el caso de una cuenca, el cálculo de la huella hídrica resulta de vital importancia pues de esta manera se establece el consumo e impacto del recurso por parte de las actividades productivas que se dan en el área específica y se compara con la disponibilidad que tiene la cuenca sin afectar su caudal ecológico. El caudal ecológico es un indicador que establece la calidad, cantidad y régimen de flujo que requiere un cuerpo de agua como un río, para mantener sus componentes, funciones, procesos y resiliencia, de modo que pueda seguir proporcionando bienes y servicios a la sociedad [2].

La huella hídrica representa una herramienta útil para evaluar la gestión del recurso hídrico, a la vez que indica las zonas y actividades críticas en una cuenca que están afectando al cuerpo hídrico. Para las corporaciones e instituciones encargadas de la administración del recurso, la huella hídrica es un insumo que les permite enfocarse en zonas y actividades causantes de impactos al cuerpo de agua, aportando una base para la toma de medidas correctivas referentes al cumplimiento de normatividades, a la vez que da pie al trabajo social con las poblaciones implicadas para elaborar planes de gestión que incluyan la participación activa de todos los actores.

En el caso de la quebrada La Angula, se presentan dentro de su cuenca diversas actividades agrícolas y pecuarias. Esta cuenca ha sido objeto de estudio por parte de las autoridades locales debido entre a otras cosas por la presencia de áreas protegidas y por sus conflictos socioeconómicos. Así mismo, la cuenca es una de las mayores productoras de piña en Colombia [40]. Sin embargo, no se han realizado estudios que estimen la sostenibilidad de los requerimientos hídricos que demandan las actividades agrícolas de la cuenca teniendo en cuenta la disponibilidad del recurso hídrico. Una vez se ha estimado la sostenibilidad en el uso del agua, es importante determinar escenarios para verificar como pueden cambiar los requerimientos hídricos, y como estos pueden llegar a ser más o menos insostenibles respecto a la disponibilidad del recurso que se tiene en la zona. De esta manera se lograr establecer una herramienta útil tanto para las autoridades locales y las comunidades para generar prácticas industriales más ecológicas [4] [3].

De acuerdo a lo anterior, resulta importante estudiar la huella hídrica de la zona para tener una visión global de los impactos generados por las actividades agrícolas en el recurso hídrico. Así mismo, se busca establecer escenarios definiendo posibles medidas correctivas que contribuyan al mejoramiento de los indicadores de sostenibilidad del uso del agua en el lugar de estudio.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Estimar la huella hídrica que se genera a partir de la producción agrícola del cultivo más predominante de la zona alta de la cuenca La Angula, municipio de Lebrija, Santander.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar un sistema de información geográfica a partir de la información secundaria disponible de la cuenca y actualización de puntos estratégicos.
- Calcular la producción y huella hídricas del cultivo más predominante en la zona alta de la cuenca La Angula.
- Plantear escenarios con posibles alternativas que contribuyan a la sostenibilidad en el uso del agua para el cultivo seleccionado de la zona.

4. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

4.1 HUELLA HÍDRICA

Debido a los problemas ambientales cada vez mayores, se ha ido despertando en el hombre una conciencia sobre el impacto que generan las actividades humanas y que no es sostenible la filosofía de "usar y tirar", ya sea con el agua o con cualquier otro recurso natural. Como resultado, la necesidad de una política coherente de gestión racional de los recursos hídricos se ha hecho evidente alrededor del mundo. Sin embargo, una gestión racional del agua debe basarse en un conocimiento profundo de la disponibilidad de agua y de cómo se gestiona en relación a los requerimientos de las actividades antrópicas [5].

En los últimos años, el agua se ha convertido en un tema de gran importancia, que ha sido debatido desde diferentes actores y desde las dimensiones social, tecnológica, cultural y económica, basándose en los problemas de la escasez del recurso hídrico causados por la relación entre la disponibilidad y la demanda, así como los patrones de consumo y las restricciones del uso del agua por contaminación [6].

En la actualidad han surgido perspectivas que han ayudado a entender el problema del recurso hídrico de una manera más completa, como es el caso de la Economía Ecológica, la cual aporta un concepto interesante denominado metabolismo socioeconómico, metodología que permite el análisis del flujo de materiales y energía que entran en un proceso, que posteriormente se transforman en bienes o servicios y finalmente en residuos [5].

La metodología del metabolismo socioeconómico aporta nuevo conocimiento para entender la realidad. Sin embargo necesita de indicadores que reflejen el consumo de materiales, energía y agua en los procesos económicos [5]. Son muchos los indicadores que se

relacionan a los dos primeros parámetros, y han sido utilizados ampliamente en el análisis metabólico de diferentes países [5]. Pero a pesar de esto, la mayor parte de estos estudios no han incluido el componente hídrico. Sin embargo existe la necesidad de empezar a incluir indicadores de la dimensión hídrica, sobre todo para aquellos países que sufren de escases del preciado líquido [5].

Aunque aún hay mucho por hacer en el tema del análisis y la gestión del agua, se han logrado importantes avances mediante la definición de indicadores de requerimientos hídricos como el agua virtual (AV) y la huella hídrica [7]. La idea de considerar el uso del agua a lo largo de las cadenas de suministro se ha ganado el interés después de que Hoekstra en el 2002 introdujera el concepto de "huella de agua" [8]. La huella hídrica es un indicador del uso de agua dulce que se ve no sólo en el uso del agua directa de un consumidor o productor, sino también en el uso indirecto de dicho recurso [3]. La huella de agua puede ser considerada como un indicador integral del aprovechamiento de las fuentes de agua dulce, al lado de la medida tradicional de agua extraída de la fuente. La huella hídrica de un producto es el volumen de agua dulce utilizado a lo largo de la cadena de producción o ciclo de vida, es decir, es un indicador multidimensional que muestra los volúmenes de consumo de agua y los volúmenes que son contaminados de acuerdo al tipo de contaminación. Todos los componentes de una huella hídrica total se especifican geográfica y temporalmente [3].

4.2 HUELLA HÍDRICA EN EL ÁMBITO INTERNACIONAL

En el ámbito internacional, se han adelantado diversos estudios enfocados en el análisis de la huella hídrica como un indicador valioso para medir la sostenibilidad en el uso del agua. España es uno de los países con más avances en el tema de la gestión hídrica, siendo este el país más árido de la Unión Europea. Por lo anterior han surgido diferentes estudios que apoyan el uso eficiente del recurso hídrico en las cuencas españolas. Es el caso de Pellicer-Martínez et al. [12], donde se determinó la huella hídrica total y la sostenibilidad de la Demarcación Hidrográfica del Segura, utilizando una metodología basada en la combinación de un modelo hidrológico (SIMPA) y un sistema soporte a la decisión (OPTIGES) [12]. De igual manera, Rodríguez Casado et al. [13] estiman la huella hídrica de la agricultura española. En este trabajo los autores distinguen entre la huella azul y verde con el propósito de identificar cifras que reflejen la importancia de estas en la agricultura.

Los resultados de la investigación muestran que el consumo de agua en España se sitúa en unos 1.150 m³ de agua per cápita y año, con un volumen anual total de 48.000 Hm³. Los autores además determinan que ha habido un aumento considerable en la huella hídrica en los últimos años, y que la agricultura es la responsable de cerca del 80% del uso del agua. Estos resultados corroboran la importancia de la huella hídrica como indicador de la gestión del agua, principalmente en la industria agrícola que es una de las que más consumo tiene en el mundo.

Por su parte Sotelo Navalpotro et al [14], realizan una identificación de la huella hídrica interna y externa para España, es decir, el agua que se produce y consume dentro del país y el agua utilizada fuera de España para producir productos de importación. Los autores identifican las huellas hídricas por autonomías, provincias y municipios, encontrando desigualdades en los consumos de agua. También analizan la evolución en el consumo a través del tiempo [14]. Sotelo Navalpotro et al, ha aportado con diferentes estudios al desarrollo y aplicabilidad de la huella hídrica en España. Entre otros de sus estudios está el “Análisis coste-beneficio y coste- eficiencia de la huella hídrica en España, trabajo realizado junto a Sotelo Pérez y García Quiroga. Los autores resaltan la importancia del análisis costo-beneficio y costo-eficiencia en la valoración de la huella hídrica española, como indicador que aporte a asegurar patrones de desarrollo sustentable para las generaciones actuales y futuras [15].

Otros investigadores han contribuido a aumentar el conocimiento de la huella hídrica en España. Aldaya et al, 2008, analizan la huella hídrica teniendo en cuenta los conceptos básicos como la huella azul y verde, además del agua virtual, pero enfatizándolos desde un enfoque económico. Los autores plantean la discusión sobre como la política del agua se está relacionando cada vez más con la política agrícola, y como la concepción en el uso del agua debe ir transformándose, pues los conflictos actuales no están ocurriendo principalmente por la escasez física del recurso, sino por gestiones inadecuadas [16].

Sotelo Pérez y Olcina Cantos, 2013, en base al aumento del consumo de agua en España en los últimos años, realizan una comparación entre la demanda y la oferta de la huella hídrica a nivel de sectores económicos y de autonomías, es decir, de manera territorial. Los autores también hacen una vinculación entre la oferta y la demanda de agua y la cuantificación y tarificación de la última en base a los precios de la huella hídrica en el país

europeo [17]. Sotelo Pérez, 2015, entre sus investigaciones también realiza una aproximación a la estimación de la huella hídrica de la red de parques nacionales de España, identificando entre la huella interna, que hace referencia al agua producida internamente dentro de la red, y a la externa, usada para desarrollar productos que son consumidos dentro del área de influencia de los parques. En el estudio, se analiza la cantidad de recurso hídrico necesario para satisfacer la demanda de bienes y servicios desde una perspectiva económica y de proyección territorial [18]

Otros investigadores han aportado al estudio global de la huella hídrica de España. Esteban Moratilla, Molina Moreno y Fernández Barrena determinan la variación del indicador de huella hídrica general para el país, y de forma más específica para cada una de las comunidades autónomas durante los años 1996, 2001 y 2005. Así mismo, establecen criterios entre las especializaciones productivas y las necesidades directas y virtuales, teniendo en cuenta también el factor económico [19].

Algunos autores españoles se han enfocado en aplicar la metodología de Hoekstra y Chapagain a casos específicos. Tolón Becerra, Lastra Bravo y Fernández Membrive, 2013, estiman la huella hídrica de la comarca del Poniente Almeriense, región considerada como el mayor exponente europeo de la agricultura intensiva bajo plástico. El análisis se realizó para los cultivos de pepino, tomate, calabacín, pimiento, sandía, melón, berenjena y judías verdes, identificando que la huella para estos productos es muy pequeña debido a la gran cantidad de huella virtual exportada [20].

Camacho Poyato et al. en su estudio “Análisis de la sostenibilidad en el cultivo de la remolacha azucarera en la zona norte de España” estima la huella hídrica verde y azul para el cultivo durante dos campañas, 2010/2011 y 2011/2012. Los autores establecen que los estudios sobre huella hídrica a nivel nacional pueden llegar a sobreestimar la huella hídrica verde y a subestimar la huella hídrica azul, ya que no tienen en cuenta el rendimiento en el sistema de riego. Por lo anterior recalcan la necesidad de elaborar estudios locales que ayuden a mejorar la precisión de los resultados [21].

Salmoral et al, 2011, estima la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir, con el propósito de mejorar la gestión y asignación del recurso. Para este cálculo, se tiene en cuenta la huella hídrica azul y verde, y se introduce la perspectiva del valor económico del agua para generar indicadores de consumo [22]. Para el mismo año, Salmoral et al, 2011,

realizan una estimación de la huella producida por el cultivo aceitunas y la producción de aceite de oliva en España. Para este caso, se estudiaron la huella azul, verde y gris, identificando que para el aceite de oliva, el 95% del gasto hídrico corresponde al cultivo y cosecha de la aceituna, y solo el 5% a las botellas y demás insumos. La huella azul y gris para estas actividades corresponden al 6 y 10% del consumo hídrico nacional. El periodo evaluado fue de 1997 al 2008 [23].

Para España, también se encuentran tesis doctorales enfocadas a estudios en casos locales. De Miguel García 2013, calcula la huella hídrica para la cuenca del Duero mediante la creación de un modelo denominado CWUModel, el cual estima el agua consumida y contaminada en la cuenca de este río, para periodos de sequía y de regarío. Adicionalmente, el modelo utilizado determina la cantidad de nitrógeno lixiviado resultado de la utilización de fertilizantes. Para los cultivos estudiados, también se aplicaron criterios económicos con el fin de evaluar la productividad de acuerdo al suelo y al agua utilizados. El autor también cuantifica el consumo de agua en la industria porcina en la producción de cerdo blanco y cerdo ibérico, encontrando los puntos insostenibles dentro de la cadena de producción [24].

A nivel de Latinoamérica, Vázquez del Mercado Arribas y Buenfil Rodriguez, 2012, realizan un análisis de los retos y oportunidades relacionados a la Huella Hídrica de América Latina. En esta investigación se da una mira al periodo comprendido entre 1996 y 2005, dejando ver los diferentes contrastes que existen en los países latinos en relación al uso del agua. Entre las problemáticas encontradas está que países como Chile, Costa Rica, El Salvador, Panamá, Perú, República Dominicana y Venezuela, poseen una dependencia hídrica mayor al promedio mundial, y otros como Bolivia, Uruguay, Brasil, Ecuador, México y Paraguay necesitan cambiar sus hábitos de consumo y tecnologías a otras más eficientes en el uso del agua. Los autores recalcan la importancia que toma hoy en día la educación en el uso racional del agua, y las investigaciones en temas como la huella hídrica con el fin de proporcionar instrumentos en las decisiones de índole político, agrícola y comercial [25].

Para el caso de Chile, investigadores de la Universidad Católica de Chile realizaron un informe detallado de la huella hídrica azul, verde y gris para los sectores económicos de Chile, y para cada una de las regiones. De la misma manera estimaron la productividad de los cultivos predominantes, al igual que la productividad por unidad de agua y tierra. El

estudio hace especial énfasis en el impacto hídrico de la agricultura, debido al amplio consumo de agua de esta actividad económica [26].

Ovalle Barros, 2012, en su tesis titulada *Estimación de la huella hídrica de cultivos con potencial bioenergético en la provincia de Limarí, región de Coquimbo, Chile*, estima la huella hídrica de cuatro cultivos con potencial bioenergético: palto, olivo, ricino y jojoba en la región de Coquimbo, Chile, utilizando la metodología propuesta por la Water Footprint Network (WFN) [27].

Costa Rica es otro país Latinoamericano donde se han venido adelantando estudios de huella hídrica. Picón y Hernández, 2013, discuten a manera de reflexión y en base a los conceptos implementados por Hoekstra y Chapagain, los impactos y repercusiones que tiene el turismo de playa y sol en regiones muy secas como Guanacaste, en Costa Rica, donde se depende de la extracción de agua subterránea para satisfacer las necesidades del recurso. El estudio busca aportar al debate ya abierto sobre política pública y gestión del agua en este tipo de actividades económicas [28].

De la misma manera, México también cuenta empieza a avanzar en el uso del indicador de la huella hídrica. Zorrilla Ríos y Moreno Llamas desarrollan una reflexión sobre el uso del agua en actividades pecuarias en México. Teniendo en cuenta que en la actualidad ya se empiezan a notar limitantes ambientales, los autores encuentran que existen regiones como la cuenca lechera de Torreón y el acuífero de Cuatro Ciénagas, en Coahuila donde se están presentando efectos restrictivos en la disponibilidad de agua [29]. Otros autores de México, estimaron el agua virtual para el país latinoamericano. En el estudio, Arreguín Cortés et al, miden la huella hídrica y virtual para México y establecen que aunque el concepto de agua virtual no se utiliza explícitamente dentro las políticas hídricas para el comercio internacional, es una herramienta que con seguridad debería aplicarse en el país. Así mismo se discute que factores como los precios internacionales de los productos agrícolas e insumos, las políticas macroeconómicas de importación y exportación de los países, la cultura de los productores, y la eficiencia en la producción agrícola o industria aportan a un uso más eficiente del agua en el ámbito mundial [30].

En el caso de Ecuador existen estudios como la investigación desarrollada por Chuquimarca Carrión, 2016, donde se determina la cantidad de agua necesaria para producir bambú gigante (*Dendrocalamus asper*) como elemento constructivo. El autor

encuentra que aunque el bambú requiere de una gran cantidad de agua para su producción, representa una opción mucho más sustentable respecto a los materiales de construcción convencionales [31].

Pozo García, 2014, realiza otro estudio a nivel local para una región de Ecuador. Mediante la metodología de Hoekstra, identifica la huella hídrica en la zona turística de Baños de Agua Santa, de la provincia de Tungurahua. La autora identifica cuatro actividades de referencia: alojamiento, agencia turística, alimentación y artesanías. Debido que los resultados demostraron la no sustentabilidad ambiental de las actividades turísticas, se plasmó un marco legal para la Gestión Integrada de Recurso Hídrico [32].

Existen estudios que han analizado el gasto hídrico en actividades pecuarias. Dentro de estos se encuentra la tesis de Muñoz Quintero, 2014, la cual analiza la huella hídrica de una serie de fincas ganaderas ubicadas en la cuenca del río La Villa, Panamá. El autor calcula la cantidad de agua utilizada en tres tipos de fincas por los animales no lactantes y el agua necesaria por unidad de leche producida durante las épocas secas y lluviosas [33].

4.3 HUELLA HÍDRICA EN COLOMBIA

En Colombia la aplicación de la huella hídrica se inició con el Proyecto SuizAgua Colombia, en 2009, liderado por la Agencia para el Desarrollo y la Cooperación Suiza (Cosude) y dirigido inicialmente al sector empresarial. Desde la aplicación geográfica de la huella hídrica en Colombia, el primer ejercicio se centró en el análisis de la huella hídrica agrícola a nivel nacional [34].

Además de los esfuerzos gubernamentales para mejorar las herramientas disponibles en la gestión del recurso hídrico, se han desarrollado diversos estudios desde la academia que demuestran la importancia que está tomando el cálculo de la huella hídrica como un indicador valioso en el ciclo de vida del agua. En el 2013, Builes y Tobón determinan la huella hídrica de la Cuenca del río Porce. El estudio cuantifica la huella hídrica azul, verde y gris de las actividades agrícolas y pecuarias, correspondiente a la cuenca del río Porce, centro occidente de Colombia. Este estudio estima que la huella hídrica total de la cuenca del Río Porce para los años 2005 – 2010 fue de 250 Mm³/año de los cuales el 93% correspondió a huella hídrica verde, 5% a azul y % 2 a gris, corroborando de esta manera la importancia del agua verde en las actividades agrícolas. Así mismo restan la importancia

de la huella hídrica como herramienta para la construcción de lineamientos para la gestión del recurso hídrico pues se compara el gasto por las actividades antrópicas y los recursos disponibles en la zona [35]. Para el mismo año, Ivanova, 2013, estima la huella hídrica de la ciudad de Bogotá abriendo camino en el uso de esta herramienta para la ciudades grandes de Colombia. Ivanova evalúa para la capital Colombiana el periodo comprendido entre 1993 y 2008 estimando el cambio en el consumo de agua. De acuerdo al estudio, el país gestionó cambios en relación al recurso hídrico en materia organizacional, normativa y cultural, y esto se ve reflejado en una disminución del consumo bruto de agua del 17,6% durante el periodo de estudio que se debió principalmente a una disminución del consumo per cápita de 165.5 a 108.0 l/persona/día y al comportamiento del índice del agua no contabilizada (IANC) que bajó del 39 al 36%, el cual hace referencia al agua suministrada a la red de acueducto pero que no es consumida debido a fugas, conexiones piratas, etc. Sin embargo, la contaminación del río Bogotá no ha tenido una mejora significativa, y sigue manteniendo una huella hídrica gris de, aproximadamente, 562, 2 millones de metros cúbicos anuales, lo que equivale al 55,8% de la huella hídrica total de toda la ciudad. Se ve entonces que para el caso de Bogotá, los esfuerzos gubernamentales han generado efectos positivos en la cantidad de agua utilizada pero no en la contaminación generada [6].

Bogotá, también ha sido el foco de otras investigaciones, como es el caso del trabajo de Cardona y Congote Ochoa, 2013, donde establecen una discusión sobre los modelos matemáticos para la estimación de la huella hídrica, pues aunque se ajustan mucho a la realidad del contexto de un lugar, no siempre están igual de cerca de los valores culturales, políticos y éticos para el manejo e inclusión social, y para generar una visión del recurso natural como fuente de servicios ecosistémicos invaluable [4].

Los análisis de huella hídrica también han permeado en el sector de la minería. González, et al, 2012, realizó una aproximación a la huella hídrica de la minería del oro en el municipio de Segovia, Antioquia. Los autores estimaron una primera aproximación de la huella hídrica azul y gris en las etapas de extracción y beneficio de oro en el municipio de Segovia, como instrumento para evaluar los impactos ambientales generados por la minería, y principalmente la contaminación generada por el mercurio. Los autores enfatizan en los resultados del estudio como una valiosa herramienta para direccionar el accionar público y privado hacia las actividades que más están contaminando el recurso hídrico [36].

En 2014, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia publicó su última versión del Estudio Nacional del Agua, donde se incluye el concepto de huella hídrica por primera vez en este documento [3]. El Estudio Nacional del Agua (ENA) 2014 es ofrecido como un instrumento técnico para la planificación y la gestión integrada del recurso hídrico en el marco de la Política Nacional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos que lidera el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [37]. Este documento establece y analiza el estado del arte relacionado a la hidrología e hidrogeología nacional, dando un marco de referencia para preguntas y temas de investigación, con el propósito de generar avance científico por parte de instituciones y centros de investigación del país [37].

Por su parte, Pérez (2011) analiza la relación que han tenido las políticas territoriales con la gestión del recurso hídrico, problemática vista por este autor desde el caso específico del cultivo de caña. Pérez corrobora la existencia de conflictos ecológicos en aquellas cuencas donde se desarrollan actividades agrícolas, e igualmente resalta la importancia de solucionarlos. Sin embargo, esta tarea representa un reto que debe asumir las instituciones ambientales, sobre todo ante el fenómeno de que existen asociaciones cuyo poder económico limita la correcta gestión de la autoridad ambiental. Por lo anterior, las políticas ambientales deben guiarse por un enfoque de justicia hídrica y de defensa del interés general y de los grupos más débiles de la población. Esto podría aportar en gran medida al desarrollo sostenible y a la equidad para las regiones con conflictos de territorio y uso del agua [38].

El análisis de las huellas hídricas de las cuencas hidrográficas representa un indicador importante para la planeación y la toma de decisiones por parte de las autoridades competentes. En el caso de Santander, la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB, como autoridad ambiental del área metropolitana y los municipios de la Provincia de Soto, ha desarrollado diferentes estudios en las microcuencas Angula, Lajas, La Honda y El Aburrido desde 1.997, recopilando información que sirve como insumo fundamental para estudios específicos en relación a la sostenibilidad en el uso del agua como es el cálculo de la huella hídrica:

- Para el caso de las microcuencas Angula – Lajas se han elaborado monografías sobre la Zonificación de unidades ecológicas del paisaje para el manejo sustentable de la microcuenca.
- La Angula, Geología aplicada a la zonificación de unidades ecológicas del paisaje para el manejo sustentable de la microcuenca.
- La Angula, Caracterización climática aplicada a la zonificación de unidades ecológicas del paisaje para el manejo sustentable de la microcuenca.
- La Angula, cuantificación del recurso hídrico superficial aplicado a la zonificación de unidades ecológicas del paisaje para el manejo sustentable de la microcuenca.
- La Angula. CORPOICA elaboró el estudio semidetallado de suelos y la CDMB contrató las consultorías para realizar el estudio de la caracterización biótica y zonificación ecológica, estudios de caracterización socioeconómica y estudios de análisis de conflictos de uso y prospectivos respecto a escenarios que permitan establecer zonificación ambiental y reglamentación de uso para el ordenamiento ambiental.
- Durante los años 2.003 y 2.004 la CDMB en convenio con la Universidad Industrial de Santander (UIS) realizó la investigación para el desarrollo de una aplicación SIG para la cuantificación del recurso hídrico de las microcuencas Angula – Lajas [1].

Estos estudios posibilitan investigaciones más profundas en el campo de la huella hídrica y, de esta manera, tener un indicador que contribuya a evaluar de forma general la sostenibilidad del uso del agua en la quebrada La Angula teniendo en cuenta la relación entre los usos y los recursos disponibles, para que la autoridad ambiental pueda trabajar en el diseño de políticas y lineamientos que favorezcan el uso sostenible del recurso hídrico en la zona [3] [1].

4.4 HUELLA HÍDRICA AZUL, VERDE Y GRIS AGRÍCOLA

La huella hídrica es un indicador que contabiliza el volumen de agua usado durante toda la cadena de producción de un bien o servicio considerando tanto el agua que se consume como la que se contamina durante el proceso. Una huella hídrica se expresa en volumen de agua por unidad de proceso o producto, o volumen de agua por unidad de tiempo. La

huella hídrica comprende el análisis del gasto de agua en todas las etapas del ciclo de vida del producto o proceso, por lo que es conveniente dividirla en tres huellas diferentes: azul, verde y gris [3].

4.4.1 Huella hídrica azul

La huella de agua azul es un indicador del consumo de la llamada azul agua, en otras palabras, agua superficial o agua subterránea. En un cierto período, la cantidad de agua que recarga las reservas de agua subterránea y que fluye a través de un río siempre se limita a una cierta cantidad. El agua en ríos y acuíferos se pueden utilizar para el riego o para fines industriales o domésticos. Pero en un determinado período no se puede consumir más agua de la que está disponible. La huella hídrica azul mide la cantidad de agua disponible en un determinado período que se consume (en otras palabras, no se devuelve inmediatamente dentro de la misma captación). De esta manera, se proporciona una medida de la cantidad de agua azul disponible consumida por los seres humanos. El resto, el agua subterránea y superficial no destinada para fines humanos, es la que queda para sostener los ecosistemas que dependen de los flujos de agua subterránea y superficial [3]. El consumo del agua azul se refiere a uno de los cuatro casos siguientes:

1. El agua que se evapora;
2. El agua que se incorpora en el producto;
3. El agua que no vuelve a la misma zona de influencia, por ejemplo, se devuelve a otra zona de captación o el mar;
4. El agua que no vuelve en el mismo período, por ejemplo, si se retira en un periodo seco y devuelto en un período húmedo.

La primera componente, evaporación, es generalmente la más importante. Por lo tanto, se verá a menudo que los consumos se equiparan a la evaporación, pero las otras tres componentes deben incluirse cuando sea pertinente. Toda la producción relacionada cuenta en la evaporación, incluyendo el agua que se evapora durante el almacenamiento (por ejemplo, de depósitos de agua artificiales), el transporte (por ejemplo, de canales abiertos), el procesamiento (por ejemplo, la evaporación del agua calentada que es

almacenada) y la recolectada y dispuesta (por ejemplo, de los canales de drenaje y de plantas de tratamiento de aguas residuales).

El consumo del agua azul no significa que el agua desaparece, porque el agua permanecerá dentro del ciclo y siempre volverá a algún lugar. El agua es un recurso renovable, pero eso no significa que su disponibilidad sea ilimitada.

La huella hídrica azul de un proceso se calcula como:

$$HH_{proc. azul} = \frac{CWU_{azul}}{Y} * Prod.Total \quad (2)$$

donde,

CWU_{azul} : Agua azul que consumió el cultivo en un periodo de tiempo (m³/ha)

Y : Rendimiento de los cultivos (ton/ha).

$Prod.Total$: Producción total de un cultivo en un periodo de tiempo (ton).

4.4.2 Huella hídrica verde

La huella hídrica verde es un indicador del uso humano de la denominada agua verde. El agua verde se refiere a la precipitación sobre la tierra que no se escapa o recarga el agua subterránea, sino que se almacena en el suelo o permanece temporalmente en la parte superior del suelo o la vegetación. Con el tiempo, esta parte de la precipitación se evapora o transpira a través de plantas. El agua verde se puede hacer productiva para el crecimiento del cultivo (pero no toda el agua verde puede ser absorbida por las cosechas, porque siempre habrá evaporación del suelo y porque no todos los períodos del año o áreas son adecuados para el crecimiento del cultivo).

La huella hídrica verde es el volumen del agua de lluvia consumida durante el proceso de producción. Esto es particularmente relevante para los productos agrícolas y forestales (productos basados en cultivos o madera), donde se refiere a la evapotranspiración total de agua de lluvia (de campos y plantaciones) más el agua incorporada en el cultivo o la madera cosechada [3].

La huella hídrica verde se calcula como:

$$HH \text{ proc. verde} = \frac{CWU_{verde}}{Y} * Prod.Total \quad (3)$$

donde,

CWU_{verde} : Agua verde que utilizó el cultivo en un periodo de tiempo (m3/ha)

Y : Rendimiento de los cultivos (ton/ha).

$Prod.Total$: Producción total de un cultivo en un periodo de tiempo (ton).

4.4.3 Huella hídrica gris

La huella de las aguas grises de un proceso es un indicador del grado de contaminación del agua dulce que se puede asociar con el proceso. Se define como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes en base a las concentraciones naturales y las normas existentes de calidad del agua ambiente. El concepto de huella hídrica gris ha crecido a partir del reconocimiento de que la magnitud de la contaminación del agua se puede expresar en términos del volumen de agua que se requiere para diluir los contaminantes de tal manera que se vuelvan inofensivos.

La huella hídrica gris se calcula como:

$$HH \text{ proc. gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \left(\frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right) \quad (4)$$

donde,

$HH \text{ proc. gris}$: Huella hídrica gris de un producto agrícola específico (m3/ha).

L : Carga contaminante en masa / tiempo (Kg/ha).

C_{max} : Concentración máxima aceptable según el estándar de calidad para un contaminante específico (Kg/m3).

C_{nat} : Concentración natural en el cuerpo de agua receptor (Kg/m3).

La concentración natural en un cuerpo de agua receptor (C_{nat}) es la concentración de la masa de agua que se produciría si no hubiera perturbaciones humanas en la cuenca. Para las sustancias de origen humano que, naturalmente, no se producen en el agua, $C_{nat} = 0$. Cuando las concentraciones naturales no son conocidos con precisión, pero se estima que será baja, por simplicidad se puede suponer $C_{nat} = 0$. Esto, sin embargo, da como resultado una huella gris subestimada cuando C_{nat} en realidad no es igual a cero. La concentración natural se utiliza como una referencia y no la concentración real en el cuerpo de agua receptor. La razón es que la huella hídrica gris es un indicador de la capacidad apropiada de asimilación. La capacidad de asimilación de un cuerpo de agua receptor depende de la diferencia entre el máximo permitido y la concentración natural de una sustancia. Si se compara la concentración máxima permitida con la concentración real de una sustancia, se podría mirar la capacidad de asimilación restante, que obviamente está cambiando todo el tiempo, en función del nivel real de contaminación en un momento determinado [3]. Para la fórmula de la huella hídrica total (HH), que es la sumatoria de las demás huellas, se requiere el cálculo de huella verde, la huella azul y la huella gris.

$$HH = HH_{azul} + HH_{verde} + HH_{gris} \quad (1)$$

En la Figura 1 se presenta el esquema de un cálculo normal de huella hídrica. Según el esquema general del cálculo de la huella hídrica, se requiere determinar el uso total de agua para cada uno de los tipos de huella hídrica, el cual se relaciona con el rendimiento del cultivo analizado. A su vez, para estimar cada uno de los usos totales, se debe determinar los requerimientos de agua y riego para el cultivo en relación al agua de consumo (azul) y al agua de lluvia (verde), en donde los requerimientos de agua azul se calculan en base a los parámetros de cultivo y climáticos. Por su parte, los requerimientos de agua azul dependen de las necesidades que suple el agua verde, de la eficiencia y del suministro de agua para riego. Finalmente, el uso total de agua gris depende estrictamente de la cantidad de fertilizantes aplicados al suelo y a los límites permisibles del parámetro que se esté analizando en el cuerpo de agua específico, como por ejemplo el Nitrógeno (N).

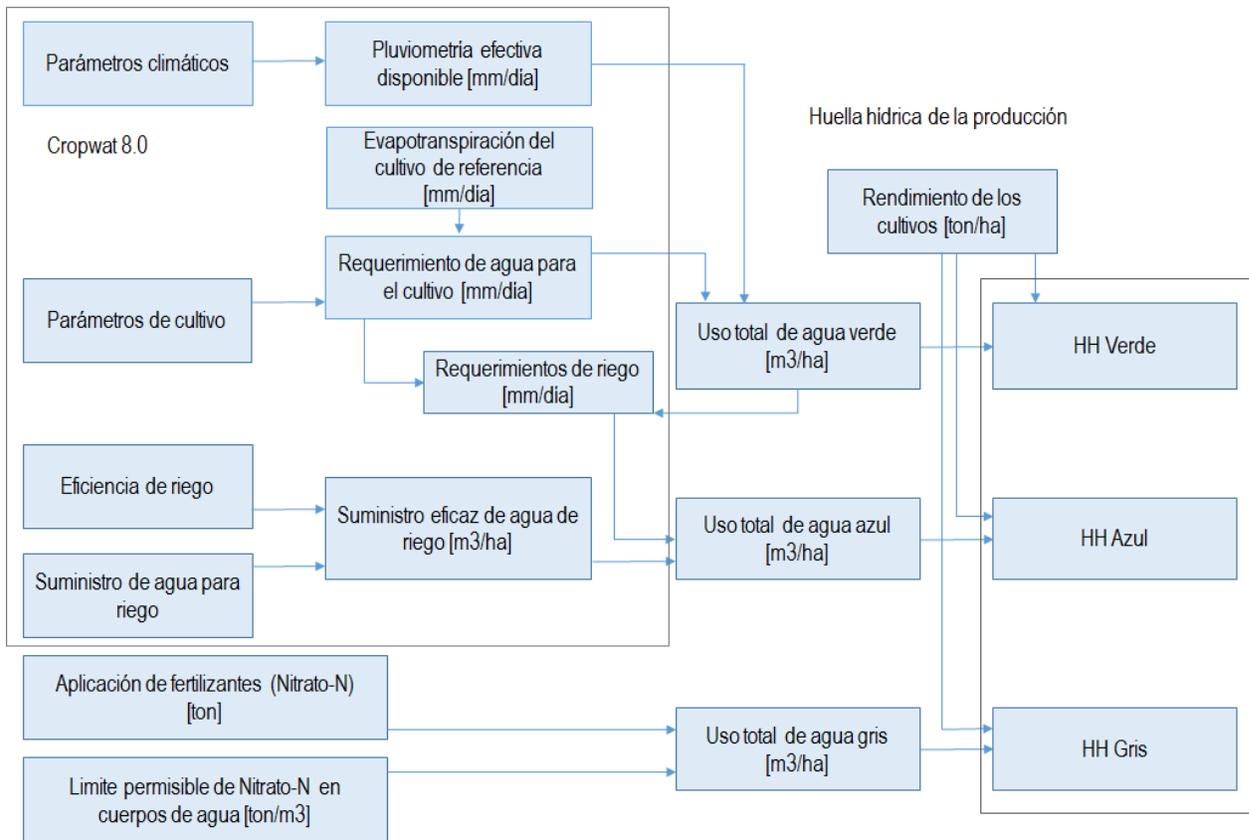


Figura 1. Esquema del cálculo general de la Huella Hídrica [9].

4.5 SOSTENIBILIDAD DE UNA HUELLA HÍDRICA AGRÍCOLA

La sostenibilidad de la huella hídrica de un producto o actividad es la relación entre el gasto del recurso y la disponibilidad del mismo en una zona y periodo de tiempo específico. La evaluación de la sostenibilidad es más objetiva cuando se hace al nivel de una cuenca o captación, ya que al tener una unidad hidrológica bien delimitada, es posible realizar una comparación razonable entre las huellas hídricas verde y azul con las disponibilidades de agua verde y azul, y la huella hídrica gris con la capacidad de asimilación de los contaminantes que posee el cuerpo hídrico.

El análisis de sostenibilidad dentro de la cuenca se puede hacer desde tres perspectivas diferentes: ambiental, social y económica. A su vez, cada una de estas dimensiones contiene una serie de criterios que indican si la huella es sostenible o no desde la perspectiva analizada:

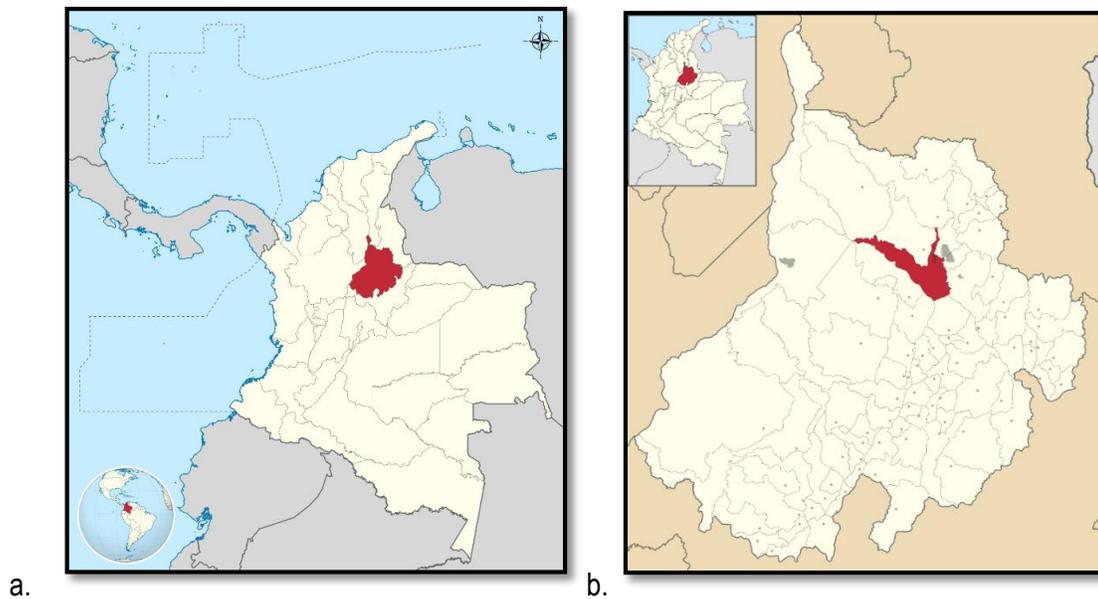
- Sostenibilidad ambiental: Dentro de esta perspectiva, el primer criterio es que los parámetros de calidad de agua deben permanecer dentro de los límites permisibles según la normatividad local. Además, los flujos de los ríos, quebradas y aguas subterráneas deben permanecer dentro de ciertos límites en comparación con la escorrentía natural y de esta manera no afectar el régimen de caudales. Por otro lado, es importante mantener un régimen promedio de caudales que permita las interacciones normales y naturales dentro del ecosistema. Finalmente, debe mantenerse una disponibilidad de agua verde que no afecte las condiciones normales del ecosistema y del ciclo hidrológico de la zona.
- Sostenibilidad social: Se debe asignar un suministro de agua que garantice en primer lugar el abastecimiento de agua a toda la población de la zona de donde se está utilizando el agua. Así mismo, este recurso debe suplir las necesidades básicas para la supervivencia, higiene y saneamiento básico. Así mismo, es importante considerar el suministro para la producción de alimentos y de producción agropecuaria, para posteriormente considerar los usos en la industria y finalmente el ocio.
- Sostenibilidad económica: El recurso hídrico consumido debe ser utilizado de manera eficiente, de modo que los beneficios económicos obtenidos por el uso de las huellas hídricas azul, verde y gris deben ser mayores que los costos que estas generan, incluyendo gastos externos, costos de oportunidad y escasez de renta. Si esta relación no se presenta, la huella hídrica es insostenible.

El primer paso para realizar la evaluación de sostenibilidad de una huella hídrica es establecer cuáles de las perspectivas se van a analizar y cuáles son los criterios más relevantes según el caso de estudio. Una vez se ha definido esto, el segundo paso es identificar los “hotspots” o puntos críticos, que básicamente son las zonas de la cuenca o los periodos de tiempo donde una huella hídrica es insostenible. Un punto crítico puede ser un mes específico del año en donde el uso del agua para una actividad específica no fue sostenible. Esto puede darse porque dicho uso compromete las necesidades ambientales del agua o porque afecta sus estándares de calidad, o tal vez porque se genera un impacto en el suministro de la población o en la rentabilidad económica de la actividad que está consumiendo el agua. Cuando un punto crítico se presenta, se deben buscar alternativas que ayuden a reducir en consumo de agua.

El tercer y cuarto paso consiste en establecer cuáles son los impactos primarios y secundarios dentro de la cuenca respectivamente. Los impactos primarios hacen referencia a cambios en la cantidad y en la calidad del flujo de agua dentro del cuerpo hídrico, por ejemplo, una disminución en la escorrentía debido a un exceso de huella hídrica azul, o una contaminación de metales pesados debido a una huella hídrica gris poco asimilable. Los impactos secundarios hacen referencia a los ecológicos, a los sociales y a los económicos. De esta manera se podría presentar por ejemplo pérdidas de especies y reducción de la biodiversidad, reducción de la seguridad alimentaria y afectación a la salud y reducción de los ingresos por parte de las actividades económicas que dependen del agua. Una vez estudiado a detalle cada uno de los impactos y sus implicaciones, resulta importante definir junto con la población afectada y las autoridades locales medidas que contribuyan reducir y mitigar los impactos, eliminar los puntos críticos y a mejorar los niveles de sostenibilidad [3].

5 ÁREA DE ESTUDIO

La presente investigación está enfocada geográficamente en la zona alta de la cuenca de la quebrada La Angula, específicamente en el área que se encuentra en la jurisdicción del municipio de Girón, y que limita con el municipio de Lebrija, Santander (ver Figura 2). En esta zona se desarrollan ampliamente actividades agrícolas y pecuarias. Dentro de las actividades agrícolas, se encuentran principalmente el cultivo de piña, cítricos como lima Tahití y mandarina, así como otras especies frutales como la guanábana y la maracuyá. Entre las industrias pecuarias se encuentran la porcícola, y principalmente la avícola, ya que hay presencia de varias galpones de empresas avícolas de la región [39].



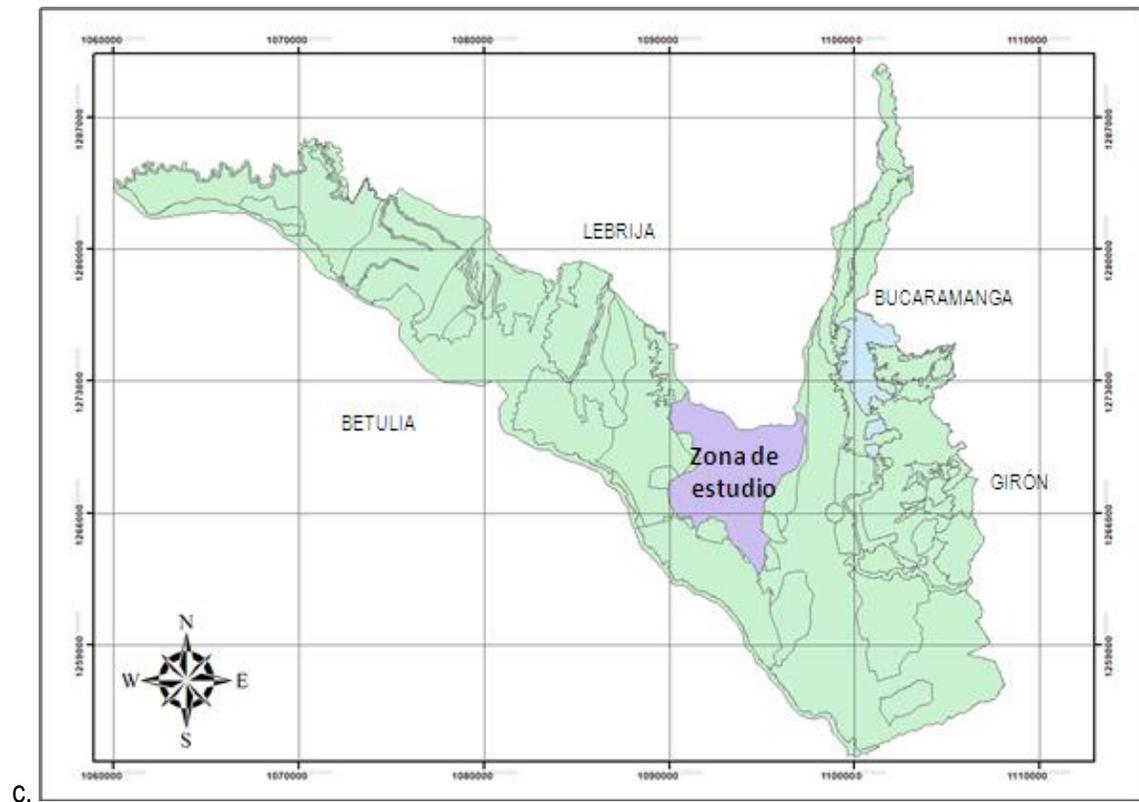


Figura 2. Mapa de la zona de estudio (zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula. a) ubicación en Colombia [40] b) Ubicación en el Departamento de Santander [41] c) Ubicación en el municipio de Girón y sus alrededores (en morado la zona de estudio) [42]

5.1 CLIMA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA

El área de la cuenca de la Quebrada La Angula corresponde a zona de Bosque Húmedo Pre montano, con una temperatura promedio de 21.7 °C y precipitación media anual de 1.117 mm. El extremo sur de la cuenca se diferencia de esta clasificación al catalogarse como bosque seco Pre montano con precipitaciones menores de 1.000 mm anuales. En el presente estudio, la zona a analizar corresponde al extremo sur de la cuenca.

Por la ubicación de la cuenca, los datos climatológicos corresponder casi en su totalidad a los registrados por la estación Palonegro, que se encuentra en el aeropuerto del mismo nombre ubicado en la ciudad de Bucaramanga a 7° 06' de latitud norte, 73° 12' de longitud oeste y 1.189 m.s.n.m. En promedio, se ha registrado solo una diferencia de 1 °C entre los

meses de abril con temperatura media de 22.2 °C y Octubre y Noviembre con 21.2 °C. Según lo anterior, las temperaturas se mantienen constantes a lo largo de todo el año.

La precipitación media a nivel mensual tiene una distribución bimodal, en donde se presenta una temporada de lluvias en el primer semestre durante los meses de abril y mayo, en los cuales caen cerca de 400 mm, equivalentes al 33% de la lluvia anual. En los meses de Octubre y Noviembre, se da una segunda época lluviosa con cerca de 270 mm, equivalente a un poco más del 22% de la precipitación anual. Durante el año se registran dos épocas con menos lluvias correspondientes a los periodos entre junio y agosto y luego entre diciembre y febrero.

Según el balance hídrico elaborado en El Estudio Semidetallado de suelos de la Subcuenca de la Quebrada La Angula, se tiene que a lo largo del año se presentan dos periodos de exceso de lluvias durante los periodos de Marzo a Junio, y de Septiembre a Noviembre, las cuales podrían perderse debido a escurrimiento. Esta información se corrobora según la clasificación de Thornthwaite, bajo la cual, la zona pertenece a una zona húmeda durante todo el año debido a la relación entre la lluvia y la evapotranspiración promedio mensual. Los meses de diciembre a febrero quedan exentos de esta clasificación, pues se registran como meses moderadamente secos.

Durante las épocas secas del año, se registran valores mayores para la evapotranspiración que para la precipitación, pero en general no se presentan déficit debido a que se conserva agua almacenada en el suelo, la cual puede ser extraída por las plantas. Solo durante los meses de enero a febrero se registran algunos milímetros de déficit hídrico.

La cuenca es clasificada según sus condiciones climáticas en tres categorías: clima medio húmedo, clima medio subhúmedo y clima cálido subhúmedo. La zona de estudio del presente trabajo corresponde a un clima medio subhúmedo [39].

5.2 HIDROGRAFÍA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA

La cuenca de la Quebrada La Angula hace parte de la Cuenca del río Lebrija, el cual drena en el sector conocido como Las Palmas. A esta cuenca pertenecen cinco microcuencas:

La de la Quebrada la Laja, localizada al nor-orienté de la cuenca entre las veredas El Oso y La Aguada, y cuyos tributarios principales son las Quebradas Hoya Grande, Agua Blanca, Chimana, La Laja, Hoya Grande y el Caño Palmichal;

La segunda microcuenca recoge las aguas de las quebradas y caños que drenan por ambos lados a la quebrada La Angula destacándose por el sector derecho las quebradas La Aguirre, de Sincho, La Catalina y la quebrada Laguneta, las cuales drenan las veredas El Aguirre, Llanadas y Siberia, y por el lado izquierdo están las quebradas La Tigra, La Capitana y La Virginia;

Casi en el centro de la cuenca está la tercera microcuenca en cuyo territorio drena por el flanco derecho la quebrada Los Guayabos, a la cual vierten sus aguas las quebradas La Popa, del Pescado, De Maldonado, La Quinta, Las Animas, La Sagrada, La Pantera y La Pantanosa, todas en inmediaciones de la vereda la Cordillera. En la parte izquierda están las quebradas Santo Domingo, Hoya Grande y San Luis, las cuales atraviesan las veredas Guamito, El cebadero, La Cordillera y San Nicolás.

Las últimas dos microcuencas se localizan en la parte alta de la cuenca; la primera corresponde a la quebrada La Puentana, que drena las aguas de las veredas del Puente y Caracolí, y la segunda corresponde a la parte media y alta de la quebrada La Angula, donde se localizan las quebradas La Mesticera, el Boquerón, La Colorada, Agua Buena, El Punteral, La Chicha, Curamacho y Los Cachos las cuales drenan las veredas La Saldaña, Piedras Negras, La Angula, El Pantano y La Mesa [39].

5.3 VEGETACIÓN DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA

La vegetación original del área de estudio corresponde a dos tipos de zonas de vida: bosque húmedo tropical (bh-t) y bosque húmedo pre montano (bh-pm). Esta vegetación es de vital importancia para la conservación y mantenimiento del recurso hídrico en la cuenca.

La cuenca cuenta con muchas zonas cubiertas de pastos y algunos relictos o vestigios de bosque con elementos de vegetación natural que se distinguen según la forma y la especie. En los potreros se presentan en su mayoría áreas extensas y uniformes de gramíneas, con presencias de algunos árboles. En los relictos predominan los árboles grandes, a cuya sombra crecen otras especies como árboles más pequeños, arbustos, bejucos, hierbas,

helechos, musgos y parásitas. En las áreas más secas crecen arbustos espinosos y vegetación cactácea.

En la parte norte de la cuenca se localiza el bosque húmedo tropical, dentro de paisaje de altiplanicie con tipos de relieve de crestón Homoclinal y vallecito y clima cálido subhúmedo.

Hacia la zona sur y centro se encuentra el bosque húmedo pre montano, el cual corresponde al 90% del área de la cuenca de la quebrada La Angula, en tipo de relieves de Crestón Homoclinal, lomas, glacis y depresiones que pertenecen a los climas medio húmedo y medio subhúmedo. Este tipo de bosque se caracteriza por poseer rangos de temperatura entre 18 y 24 °C, precipitaciones medias anuales entre 1000 y 2000 mm y altitudes entre 1000 a 2000 m.s.n.m. El área de estudio corresponde a bosque húmedo pre montano. La zonificación de la vegetación mencionada anteriormente se encuentra en el Estudio Semidetallado de Suelos de la cuenca de la Quebrada La Angula de manera descriptiva según las unidades cartográficas definidas en la zona. La vegetación original de la zona, aunque en la actualidad es muy escasa por la explotación agrícola es la siguiente (ver Tabla 1) [39]:

Tabla 1. Principales especies presentes en el bosque húmedo pre montano

NOMBRE VULGAR	NOMBRE CIENIFICO
SAUCES	SALIX HUMBOLDTIANA
CHAGUALO	RAPANEA QUIAMENSIS
CARBONERO	CALLIANDRA SP
CEDRO	CEDRELA SP
YARUMO	CECROPIA SP
CAMBULO	ERYTHRINA GLAUCA
CAÑABRAVA	GYNERIUN SAPILLATUN
DORMIDERA	MIMOSA PIGRA
COQUITO	CYPERUS FERROX
PALMICHE	SABAL SP
GUADUA	GUAGUA ANGUSTIFOLIA

Fuente: CORPOICA-CDMB, 1997 [39].

El área cultivada se encuentre principalmente con piña, café, cacao, cítricos, maracuyá y otros cultivos en menor proporción como frijol, tomate, yuca, hortalizas, y algunos frutales y un buen porcentaje de pastos [39].

5.4 FAUNA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA

La fauna dentro de la cuenca ha sufrido de una desaparición acelerada debido a la explotación de los suelos y a la disminución de los bosques naturales. Esto ha provocado que desaparezcan paulatinamente el hábitat de las animales naturales del lugar, y principalmente de aves nativas, principalmente en la parte sur de la cuenca [39].

5.5 SUELOS DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA

En toda la cuenca de la Quebrada La Angula se encuentran doce unidades cartográficas según la clasificación elaborado en el Estudio Semidetallado de Suelos de la Subcuenca de la Quebrada La Angula (CDMB, CORPOICA, 1997): Consociación La Victoria, Consociación Mirabel, Consociación Portugal, Consociación El Tesoro, Consociación El Pedregal, Consociación La Aldea -La Mesa, Consociación Lebrija, Complejo El Angulo-Caracoles, Consociación El Hato, Consociación Pantanos, Grupo Indiferenciado El Espino-El Oso y Consociación Bocas. Los materiales parentales de los suelos están conformados principalmente por arcillas, arcillas lacustres, arenas y areniscas. En menor medida se presentan lutitas y limolitas, y aluviones en el relieve de vallecito [39] (Ver Anexo H).

5.6 GEOLOGÍA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA

Según el Mapa Geológico Nacional, la cuenca de la Quebrada La Angula se encuentra en su mayoría sobre una extensa zona denominada Formación Girón, del periodo del Jurásico. A esta formación no se le ha determinado su edad, debido a que en la zona no hay presencia de fósiles.

Esta formación presenta los siguientes tipos de rocas: areniscas conglomeráticas y conglomerado, de grano fino a grueso, de color gris amarillento a pardo rojizo masivos y lenticulares; arcillas laminadas (lutitas) a veces limolíticas finamente arenosas de color pardo rojizo y en ocasiones, verdoso y conglomerados compuestos en su mayor parte de cuarzo y también con fragmentos ígneos y metamórficos.

Al extremo sur de la cuenca y en el borde occidental se encuentra la Formación Tambor originada en el Cretáceo, la cual posee en su parte superior arenisca cuarzosa clara superpuesta en capas y en la parte inferior, limolita y arenisca parda rojiza.

En el borde oriental se encuentra la Formación Bocas, bastante diferente a las anteriores debido a la presencia de las fallas de Suárez y de Bucaramanga. Esta Formación está conformada por lutitas verdosas y areniscas grises a grises parduscas. En el extremo sur-oriental, la formación se caracteriza por coluvión, talud y derrumbes.

Por el extremo occidental, se presenta la Formación Rosablanca, caracterizada por caliza gris oscura, masiva, fosilífera, arenisca de grano fino y lutita gris oscura. También se encuentra la Formación Paja con lutitas negras en estratificación delgada.

Los depósitos coluviales recientes y aluviales antiguos se presentan de forma distribuida dentro de la cuenca. Los primeros corresponden a sedimentos depositados en el Holoceno, formados por materiales de textura arenosa y limo arenoso, y los segundos, a sedimentos depositados en el Pleistoceno, compuestos por intercalaciones de capas de limoarenosas y conglomeráticos con guijos de cuarzo [39].

6 METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló en tres etapas donde se evaluaron conceptos para el cálculo de la huella hídrica que se genera en la cuenca La Angula. En la primera etapa se realizó la implementación del sistema de información geográfica a partir de la información secundaria. Después de tener los datos se hicieron los respectivos cálculos de la huella hídrica generada en la zona alta de la cuenca de la quebrada la Angula. Finalmente, se plantearon escenarios para el aprovechamiento de la biomasa residual en la zona de estudio de la quebrada. Las fases del proyecto se encuentran en la Figura 3.

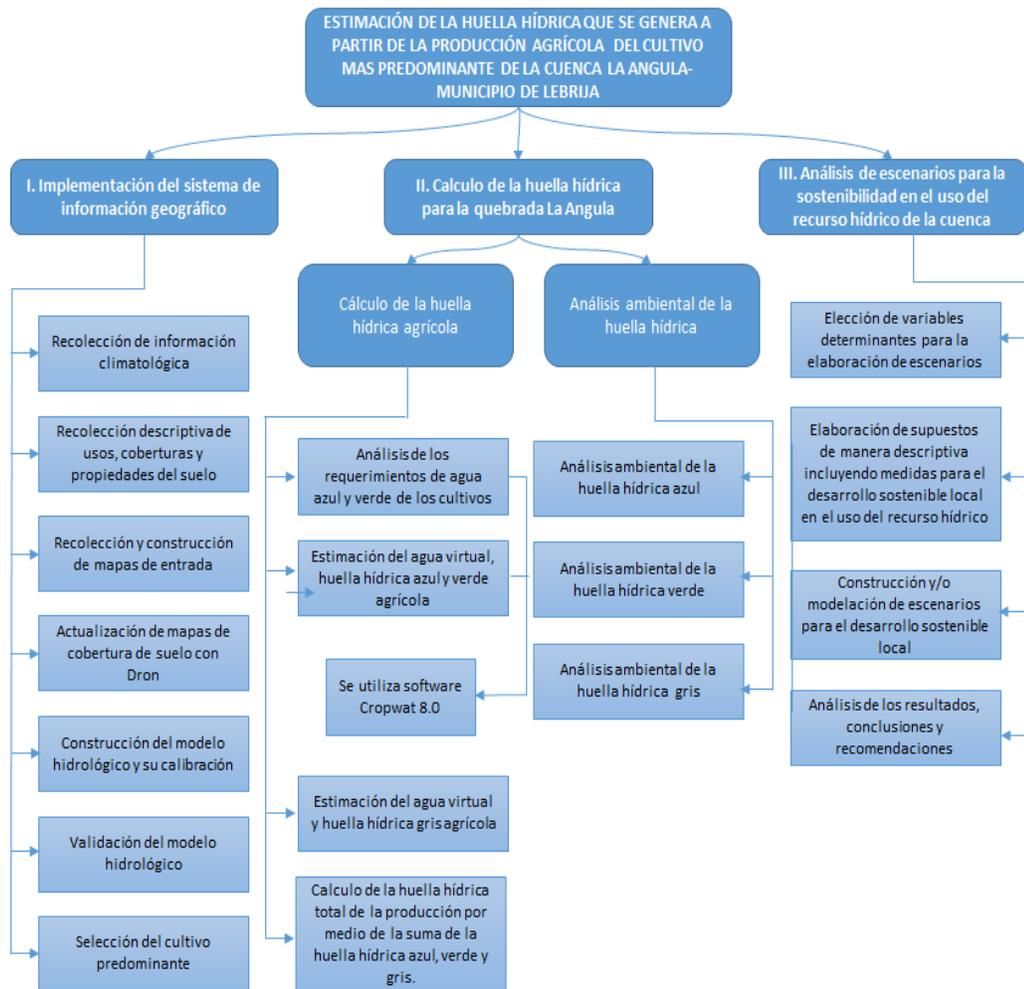


Figura 3. Metodología Cálculo huella hídrica

6.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO

La implementación del sistema de información geográfico permitió la sección de los cultivos predominantes de la zona alta de la cuenca La Angula, así como la recolección y estimación de parámetros climatológicos y de suelo necesarios para el cálculo de la huella hídrica en el lugar de estudio. Para esta implementación se requirió recolección de datos cartográficos y alfanuméricos de la cuenca, los cuales fueron procesados con la ayuda de softwares como AutoCAD y ArcGIS, y otros programas informáticos de apoyo, como se describe en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Etapas para la implementación del sistema de información geográfica de la cuenca La Angula

Etapas	Descripción
1. Información climatológica	Se recolectó la información secundaria de estaciones climatológicas por medio del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), donde se extrajo la información de temperatura, humedad relativa, evaporación y caudales de la quebrada la Angula.
2. Información descriptiva del uso y cobertura del suelo	Los datos del uso del suelo y su cobertura se basaron en los documentos del POMCA de la cuenca y en informes reportados por la CDMB durante los últimos años. De acuerdo a la información colectada se hizo una delimitación preliminar de la zona, en la cual se enfocó el estudio.
3. Recolección y construcción de mapas base de entrada.	Los mapas de la cuenca La Angula fueron proporcionados por la CDMB y se actualizaron basados en: las pendientes del terreno, dirección de flujo, flujo acumulado, coberturas del suelo, conductividad hidráulica saturada del suelo (K_s), conductividad hidráulica saturada del sustrato del suelo (K_p), capacidad de almacenamiento (H_u) y en el modelo digital de elevación (DEM). La construcción y manejo de los mapas de entrada se realizó utilizando los software: AutoCAD y ArcGIS.
Actualización de mapas de cobertura de suelo	Se realizaron vuelos con un vehículo aéreo no tripulado (Dron dji Mavic Pro) para obtener fotografías aéreas actualizadas de zonas candidatas a significativa de la cuenca. Las fotografías se trataron con el software especializado Pix4D para poder generar los ortomapas de las áreas de interés, con el objetivo de actualizar los mapas de coberturas del suelo.
4. Selección del cultivo predominante	En base a la actualización del mapa de coberturas se seleccionó el cultivo con mayor extensión cultivada para el análisis de la huella hídrica.

6.2 CÁLCULO DE LA HUELLA HÍDRICA PARA LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA

Con la implementación del sistema de información geográfico y la selección del cultivo predominante en la quebrada la Angula se aplicó la metodología de Hoekstra para la estimación de la huella Hídrica [REF]. Este cálculo comienza con la estimación de la huella hídrica agrícola para continuar con un análisis ambiental y establecer indicadores de gestión del recurso. Posteriormente se definieron escenarios que incluyan medidas correctivas en el uso del agua y en el mejoramiento de los ciclos productivos en la zona.

6.2.1. Cálculo de la huella hídrica agrícola

La estimación de la huella hídrica agrícola está conformada por el cálculo de tres huellas específicas, la azul, la verde y la gris. La huella hídrica agrícola se calculó utilizando el modelo Cropwat 8.0 (FAO, 2010). La huella total para los procesos agrícolas se calculó mediante la ecuación 5 donde la huella hídrica de la producción corresponde a la sumatoria de las tres huellas antes mencionadas [35].

$$HH\ proc = HH\ proc.\ azul + HH\ proc.\ verde + HH\ proc.\ gris \quad (5)$$

Donde *HH proc. gris* es el volumen total de huella hídrica gris utilizado por unidad de tiempo, *HH proc. verde* es la cantidad total de huella hídrica verde consumido por unidad de tiempo, *HH proc. azul* es el volumen total de huella hídrica azul consumido por unidad de tiempo y *HH proc* es la huella hídrica total utilizada en la producción agrícola de los cultivos analizados por unidad de tiempo.

La estimación de cada una de las huellas requirió los cálculos de los siguientes elementos:

- a) Requerimiento de agua azul y verde de los cultivos (*CWUverde* y *CWUazul*): El requerimiento de agua verde correspondió a la fracción de la precipitación efectiva que fue utilizada por los cultivos en el periodo analizado. El requerimiento de agua azul es la diferencia entre el agua utilizada por los cultivos y la precipitación efectiva. Estos requerimientos se calcularon por medio del software Cropwat, utilizando los parámetros suelos, cultivos, y clima.

- b) Agua virtual, huella hídrica azul y verde agrícola: Cropwat calculó el gasto de agua virtual utilizando parámetros como el balance de agua de suelo (ks). El agua virtual de un cultivo hace referencia al volumen de agua en m^3 necesaria para la producción de una tonelada de producto [3]. La huella hídrica se determinó dividiendo el requerimiento de agua verde entre el rendimiento de los cultivos. La huella hídrica azul se calculó de manera similar.
- c) Agua virtual y huella hídrica gris agrícola: Para establecer la huella hídrica gris se tomó como referencia la contaminación generada por fertilizantes, específicamente por Nitrógeno [35].

6.2.2 Requerimiento de agua azul y verde de los cultivos (CWUverde y CWUazul)

El modelo del Cropwat calculó los requerimientos de agua verde (CWUverde) para un cultivo como la precipitación efectiva. Esta representa la fracción de la lluvia que realmente es utilizada por las plantas desde la época de siembra hasta el momento de cosecha. La precipitación efectiva se presenta en unidades de mm, por lo que el resultado que da el modelo se debe multiplicar por 10 para convertirlo en unidades de m^3/ha o consumo de agua del cultivo.

Para obtener los requerimientos de agua azul del cultivo (CWUazul), se calculó la diferencia entre el requerimiento del cultivo y la precipitación efectiva. Ambas variables fueron estimadas por el Cropwat. Si el resultado de la diferencia es positivo, ese valor hace referencia al requerimiento de agua azul, mientras que si la resta es igual o menor a cero, no se presenta HH azul para el periodo y cultivo calculado. Al resultado se le hizo la misma conversión que para los requerimientos de agua verde.

El modelo que maneja el Cropwat necesitó de tres tipos de variables de entrada que corresponden a clima, cultivos y suelos. Para cada una de estas variables, el software dispone de un módulo en donde se almacenan los parámetros que se indican a continuación:

a. Evaluación del Clima de la cuenca

Los parámetros que solicita los módulos de Clima del Cropwat 8.0 son: precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. Estos parámetros fueron facilitados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), según la información de las estaciones El Pantano y Palonegro. Los datos se convirtieron al formato solicitado por el Cropwat e introducidos a los módulos de Climate/Eto y Rain.

b. Evaluación de los Cultivos de la cuenca

La información de los cultivos fue proporcionada por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural del Municipio de Girón según los informes históricos de las Evaluaciones Agropecuaria Municipales (EVA) [42]. En el caso del municipio de Lebrija, no se encontró la disponibilidad de esta información, por lo que el análisis de los cultivos se realizó para la zona alta que se encuentra dentro de la jurisdicción de Girón y que limita con Lebrija. Según los EVA, la zona rural de Girón cuenta con cultivos de veinte especies diferentes, de las cuales fueron tomadas solo dos que representan las mayores extensiones dentro de la zona de estudio, la piña y la lima Tahití. De estas dos especies, se requirió el área plantada, el área producida, y los rendimientos en toneladas por hectárea para los años 2007 y 2015.

Los parámetros que se introdujeron al modelo Cropwat fueron:

- Fecha de siembra y cosecha: Estos parámetros cambian de acuerdo al lugar y al clima en donde se desarrolle el cultivo, así como a la dinámica económica. Fuentes secundarias como la FAO (2006) y el IDEAM proporcionan información sobre las fechas de siembra y cosecha. Para esta investigación, las fechas fueron tomadas según los EVA del municipio de Girón e información primaria recolectada en salidas de campo.
- Fases de crecimiento y coeficientes de cultivo (K_c): Para cada cultivo, en general se presentan cuatro fases, cuya duración dependen específicamente de las características propias de cada especie. De la misma manera, para cada fase se

presenta un coeficiente de cultivo (K_c), el cual permite calcular el consumo de agua o evapotranspiración real de la planta en una fase de crecimiento determinada. Los valores de ambos parámetros fueron tomados de la FAO (2006).

- Profundidad radicular: hace referencia al espacio promedio que ocupan las raíces de la planta en el suelo determinando para la capacidad para aprovechar el agua disponible. Para este caso, se utilizaron los valores para profundidad radicular de la FAO (2006) según el promedio global para la piña y la lima Tahití.
- Fracción de agotamiento crítico (p): Es la fracción del agua total disponible en la que las raíces encuentra mayor dificultad para extraer el líquido del suelo, originando una disminución en la transpiración y en la producción. Los valores utilizados fueron los reportados por la FAO (2006).
- Factor de respuesta de la productividad del cultivo (K_y): Este factor es específico para cada tipo de cultivo, pudiendo variar según la fase de crecimiento. Tanto para la piña como para la lima Tahití se tomaron los valores globales de la FAO (2006)
- Altura del cultivo: Para este parámetro se utilizó información registrada en la FAO (2006) e información primaria del área de estudio.

c. Evaluación de los suelos de la cuenca

Toda la información relacionada con suelos en este estudio fue tomada del documento del Estudio semidetallado de suelos de la subcuenca de la Quebrada La Angula, elaborado por el CORPOICA y la CDMB [1] [39]. Los parámetros solicitados en el CROPWAT para el módulo de suelos fueron tomados o estimados de acuerdo con las unidades cartográficas que se encuentran en la zona alta de la cuenca según los tipos de suelos. Los parámetros de suelo calculados para el cálculo de la huella hídrica agrícola fueron los siguientes:

- *Agua Disponible Total (ADT)*: Es la diferencia entre la capacidad de campo del suelo y el punto de marchitez, y hace referencia al agua disponible para la planta en el

sustrato [43]. El ADT se calculó utilizando el módulo Soil Water Characteristics del software SPAW Hidrology, utilizando las granulometrías registradas en el Estudio semidetallado de suelos de la subcuenca de la Quebrada La Angula [39] para cada tipo de suelo.

- *Tasa Máxima de Infiltración:* Corresponde a la cantidad de agua que se logra infiltrar en el suelo en un periodo de veinticuatro horas, cuando el suelo está saturado, por lo que coincide con la Conductividad Hidráulica Saturada [43]. Este valor se calculó con la ayuda del software SPAW Hidrology y el uso de fórmulas empíricas utilizando las granulometrías que se encuentran en el Estudio semidetallado de suelos de la subcuenca de la Quebrada La Angula [39].
- *Profundidad radicular máxima:* Para la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula, la profundidad radicular máxima se asumió en base a los perfiles de las consociaciones presentes en la zona, verificando hasta que profundidades existe presencia de raíces.
- *Agotamiento inicial de la humedad del suelo:* Representado como porcentaje de la humedad del suelo, el agotamiento inicial es la cantidad de humedad presente en el suelo al iniciar el cultivo, en donde 0% hace referencia a un suelo con Capacidad de Campo, y 100% a uno en Punto de Marchitez Permanente [43]. Para este caso, se tomó un valor del 50% considerando que los cultivos empiezan en Enero, un mes que generalmente presenta sequía.

6.2.3. Cálculo de la huella hídrica agrícola

La huella hídrica agrícola cuantifica el volumen de agua total utilizado para la producción de un bien agrícola. Esta huella se calculó como (AUA m³/año):

$$HHA = AUA = \sum_{c=1}^n UAC[c] \quad (6)$$

El cálculo de la huella hídrica total de la cuenca se calculó como:

$$HA = AUA = UAC[c] \quad (7)$$

Donde UAC , que es el uso del agua del cultivo expresado en $m^3/año$, hace referencia al volumen total de agua que se requiere para producir una cantidad específica de toneladas de un cultivo $[c]$.

El cálculo de la $UAC [c]$ se hace mediante la ecuación 8.

$$UAC[c] = RAC[c] * \frac{Producción[c]}{Rendimiento[c]} \quad (8)$$

Donde $RAC[c]$ (m^3/ha) son los requerimientos de agua para un cultivo medidos en campo, la producción es el volumen total de cultivo producido durante un año ($t/año$) y el rendimiento corresponde al volumen de producción de cultivo por unidad de área (t/ha).

El requerimiento de agua para un cultivo, es el volumen de agua necesaria para la evapotranspiración del cultivo durante el proceso siembra-cosecha. Este se calculó mediante la acumulación de datos de evapotranspiración diaria ET_c ($mm/día$) durante el periodo de crecimiento:

$$RAC[c] = 10 * \sum_{d=1}^{lp} ET_c[c, d] \quad (9)$$

En la ecuación 8, el factor 10 permite convertir los mm/m^2 a m^3/ha , y la sumatoria se realiza desde el primer día de la siembra hasta el día de la cosecha. L_p es la cantidad de días del periodo de crecimiento.

Para calcular la evapotranspiración $ETc[c]$ del cultivo por día, se multiplicó la evapotranspiración de referencia ETo por el coeficiente del cultivo $Kc[c]$:

$$ETc[c] = Kc[c] * ETo \quad (10)$$

ETo corresponde a un valor de evapotranspiración que depende de la localización y el tiempo específico, y no tiene en cuenta las características del cultivo ni los factores propios del suelo.

Para determinar el agua virtual $AVC[c]$, se utilizó la ecuación 11. Este indicador hace referencia a la eficiencia del uso del agua por tonelada de bien agrícola producido:

$$AVC[c] = \frac{UAC[c]}{Producción[c]} \quad (11)$$

Para calcular el contenido de agua contaminada, se utiliza la ecuación 12:

$$HHcont = \frac{(axAR) / (cmax - cnat)}{Rendimiento} \quad (12)$$

Donde $axAR$ es el producto de la tasa de aplicación de agroquímicos (AR), por hectárea por fracción de lixiviados (a) dividido por la máxima concentración aceptable ($cmax$) menos la concentración natural de sustancias químicas ($cnat$), todo esto dividido en el rendimiento del cultivo [4].

6.2.4 Análisis de sostenibilidad de la Huella Hídrica Agrícola

Una vez se estimó la huella hídrica agrícola, se realizó un análisis para establecer que tan sostenible es el gasto hídrico en relación a la oferta de agua de la zona. La estimación de la huella hídrica por sí sola no aporta gran información, por lo que este valor debe evaluarse por medio de indicadores que constituyen un análisis ambiental para definir si existen o no problemas en la gestión del agua de la zona. Para esto se realizó un análisis ambiental de la huella hídrica azul, verde y gris en donde la sostenibilidad hace referencia a la relación entre el volumen utilizado del recurso y la disponibilidad natural que existe de dicho recurso en la zona. La sostenibilidad para un periodo de tiempo se define según el índice de escasez, en donde un valor menor que 1 indica un uso sostenible del agua, un valor mayor a 1 refleja insostenibilidad y un valor igual a 0 representa un uso nulo del recurso o que no existe huella hídrica [35].

- a) Análisis ambiental de la huella hídrica azul: Para determinar la sostenibilidad de la huella hídrica azul es necesario estimar la Oferta natural de agua azul mensual (*AO natural azul mensual*), donde a la *Oferta natural mensual* de la cuenca, se le resta el *Caudal ecológico* necesario para el funcionamiento normal y natural del ecosistema fluvial [35]. Para la oferta de agua azul se tuvo en cuenta el *Régimen de caudales ordinarios estacionales* según Salinas-Rodríguez (2011) [44], al cual se le restó el caudal ecológico calculado para la zona de estudio (Ecuación 13):

$$\begin{aligned} AO \text{ natural azul mensual} \\ = \text{Oferta natural mensual} - \text{Caudal Ecológico mensual} \end{aligned} \quad (13)$$

La información de caudales de la cuenca de la Quebrada La Angula para estimar la *Oferta de agua azul mensual* fue proporcionada por la CDMB. Esta información corresponde a datos tomados desde 1994 hasta el 2017, y en los cuales no existen datos en muchos de los meses comprendidos entre el periodo de tiempo disponible.

Los datos mensuales de caudales disponibles para la zona de estudio se procesaron a partir de la metodología *Aproximación hidrológica de "Gran visión"* de Salinas-Rodríguez

(2011) [44], plasmada en la *Guía rápida para la determinación de caudales ecológicos*, metodología útil para casos de planificación hídricas.

Según Salinas-Rodríguez (2011) [44], se debe determinar un objetivo ambiental de acuerdo con el estado de conservación que se quiere mantener en la fuente hídrica dependiendo de factores tales como la presencia de especies amenazadas, zonas de protección o conflictos por el uso del agua. Así mismo, esto depende de si la corriente es perenne o temporal según se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de referencia para asignar un volumen de caudal ecológico conforme a los objetivos ambientales

OBJETIVO AMBIENTAL	ESTADO DE CONSERVACIÓN	CAUDAL ECOLÓGICO (% EMA)	
		CORRIENTES PERENNES	CORRIENTES TEMPORALES
A	Muy bueno	≥40	≥20
B	Bueno	25-39	15-19
C	Moderado	15-24	10-14
D	Deficiente	5-14	5-9

Fuente: Salinas-Rodríguez (2011) [44].

Posteriormente, se calcula la *Escasez de agua azul mensual*, con los datos obtenidos anteriormente:

$$E_{\text{azul mensual}} = \frac{\Sigma HH_{\text{azul mensual}}}{OA_{\text{natural y regulada (azul mensual)}}} \quad (14)$$

- b) Análisis ambiental de la huella hídrica verde: El análisis ambiental de la huella hídrica verde de las actividades agrícolas se calcula dividiendo las sumatorias de *HH verde mensual*, entre la *Disponibilidad de Agua verde mensual* [35].

$$E \text{ verde mensual} = \frac{\Sigma HH \text{ verde mensual}}{DA \text{ verde mensual}} \quad (15)$$

La disponibilidad de agua verde mensual $DA_{verde \text{ mensual}}$ se calcula mediante la diferencia entre la evapotranspiración propia de la cuenca ET_x estimada por el modelo de Penman-Montheith, del módulo de clima del software *CROPWAT 8.0*, la evapotranspiración de la vegetación natural y de las zonas no productivas, restando los porcentajes de las áreas de estas dos últimas zonas respecto al área total de estudio, es decir, se tuvo en cuenta solo las áreas cultivadas:

$$\begin{aligned} DA_{verde \text{ mensual}} &= ET_{x,t} \text{ (total mensual)} - ET_{x,t} \text{ (nat mensual)} \\ &\quad - ET_{x,t} \text{ (improd. mensual)} \end{aligned} \quad (16)$$

- c) Análisis ambiental de la huella hídrica gris: El índice de sostenibilidad de la huella hídrica gris se determina mediante el Nivel de contaminación del agua (NCA), el cual se calcula dividiendo la sumatoria de $HH \text{ gris mensual}$, entre la oferta natural regulada $R \text{ total mensual}$ (embalses y trasvases), disponible para diluir el mayor contaminante [35]. Para el caso de estudio, en la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula, no hay presencia de estructuras como embales o trasvases, así que finalmente la oferta natural para comparar con la huella hídrica gris fue la diferencia entre la oferta de agua azul menos la huella hídrica azul, pues este último volumen ya se ha consumido:

$$NCA \text{ mensual} = \frac{\Sigma HH \text{ gris mensual}}{R \text{ total mensual}} \quad (17)$$

6.3 ANÁLISIS DE ESCENARIOS PARA LA SOSTENIBILIDAD EN EL USO DEL RECURSO HÍDRICO DE LA CUENCA

Una vez se estimó la huella hídrica agrícola en la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula, se plantearon escenarios en donde se propusieron diferentes supuestos para analizar el cambio en el consumo del recurso hídrico y su sostenibilidad en la zona de estudio. Para generar escenarios primero se eligieron las variables o los factores claves, luego se plantearon los supuestos, para finalmente establecer los escenarios.

- a) Elección de variables: En base a los resultados obtenidos en la estimación de la huella hídrica y análisis ambiental, se definieron cuáles son las variables más importantes, o cuales son los factores que se podrían modificar respecto a la situación actual con el fin de proponer un escenario alternativo, definiendo elementos nuevos dentro de lo que podría ser una tendencia futura.
- b) Después de establecer las variables, se procedió a definir supuestos, con los cuales se crearon escenarios alternativos de manera descriptiva y que incluyeron cambios en las actividades que se desarrollan en la zona para evaluar el cambio en la huella hídrica y su sostenibilidad.
- c) Una vez definido los escenarios, se modelaron para determinar las posibles consecuencias e implicaciones de los cambios planteados en los escenarios, y cómo se reflejan estos cambios en los impactos ambientales causados en la cuenca y en el recurso hídrico.

7 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este estudio se presentan los resultados de las huellas hídricas azul, verde y gris para los cultivos seleccionados en la zona de estudio. El cálculo de las huellas se realizó para dos años diferentes, 2007 y 2015, que representan en este estudio un año húmedo y un seco respectivamente, con el propósito de comparar el cambio en la gestión y uso del recurso hídrico, a la vez de analizar la evolución de los impactos generados. El análisis temporal no se hizo de manera continua ya que la forma estándar de mostrar una huella hídrica agrícola es a escala anual, además que la mayor parte de los años que se encuentran dentro de este periodo (2007-2015) no presentaban una disponibilidad suficiente de información climatológica para realizar la estimación de huella hídrica. Por lo anterior, la elección de estos dos años se debió en primera medida a las diferencias de precipitación entre los dos años. Así mismo, fue determinante la disponibilidad de la información climatológica y de cultivos en estos dos periodos de tiempo, lo que permitió un mejor análisis respecto a otros años con menos información disponible. Dentro de los resultados se presenta el volumen total del agua consumido en las actividades agrícolas estudiadas a nivel anual y a nivel mensual, y se comparan con la disponibilidad de agua azul y verde para establecer el grado de sostenibilidad de las huellas. Así mismo, se exponen los valores de la huella hídrica virtual o cantidad de agua por tonelada de producto, para cada uno de los cultivos en los dos periodos de tiempo analizados. Finalmente, se definieron escenarios para examinar variaciones en las huellas hídricas y su sostenibilidad en la zona de acuerdo con cambios en las extensiones de los cultivos.

7.1 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO

Para la implementación del sistema de información geográfico se utilizó la información cartográfica proporcionados por la CDMB dentro del POMCA de la Subcuenca del Lebrija alto. Así mismo se usó información del Estudio Semidetallado de suelos de la Subcuenca

de la Quebrada la Angula [39]. De esta manera se obtuvo la información específica que caracteriza a la zona de estudio en relación a parámetros de suelos, usos y coberturas, clima y caudales, recursos básicos para poder desarrollar el posterior cálculo de huella hídrica agrícola.

7.1.1 Mapas del sistema de información geográfico de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula

La integración de la información secundaria y primaria (como se describe en la metodología), permitió obtener información actualizada en relación a parámetro como Conductividad Hidráulica Saturada (K_s), Conductividad Hidráulica del Sustrato (K_p) y Capacidad de Almacenamiento (H_u), para cada una de las zonas cartográficas que se localizan en la zona de estudio. De esta manera, se elaboraron los mapas de Modelo Digital de Elevación, Dirección de Flujo, Flujo Acumulado, Pendientes, Drenajes, Usos de Suelos, y Suelos (Figuras 4-11). Así mismo se realizó la identificación de los cultivos a analizar en este estudio y la actualización de algunos sectores del Pantano, lugar protegido de la CDMB dentro de la zona alta de la cuenca de la Quebrada la Angula. Esta actualización permitió identificar los diferentes tipos de coberturas presentes como pajonales, bosques plantados de pino, áreas no productivas y cultivos de piña y lima Tahití.



Figura 4. Identificación y actualización de coberturas con fotografías aéreas (cultivo de piña)

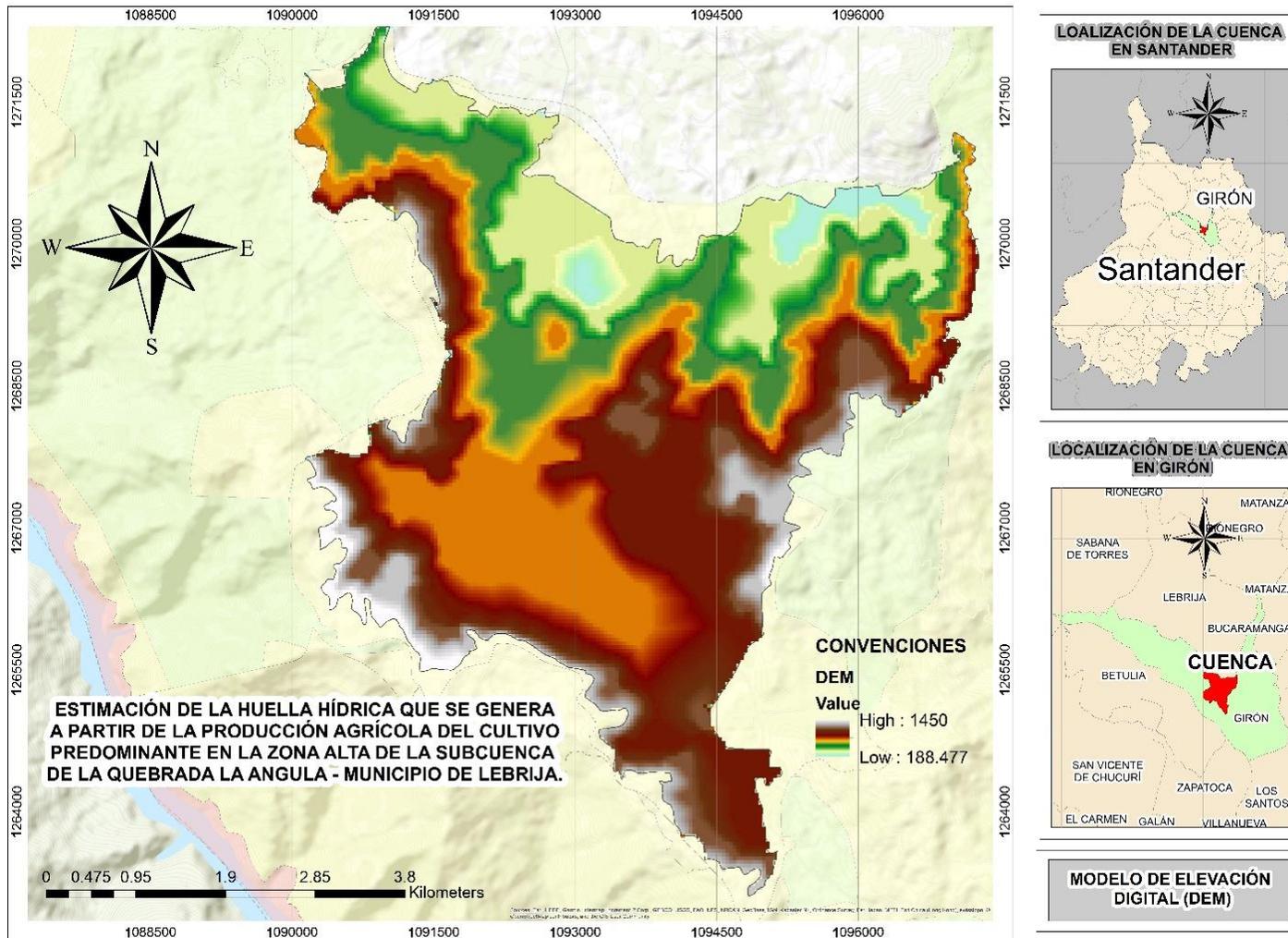


Figura 5. Modelo Digital de Elevación (DEM) de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula

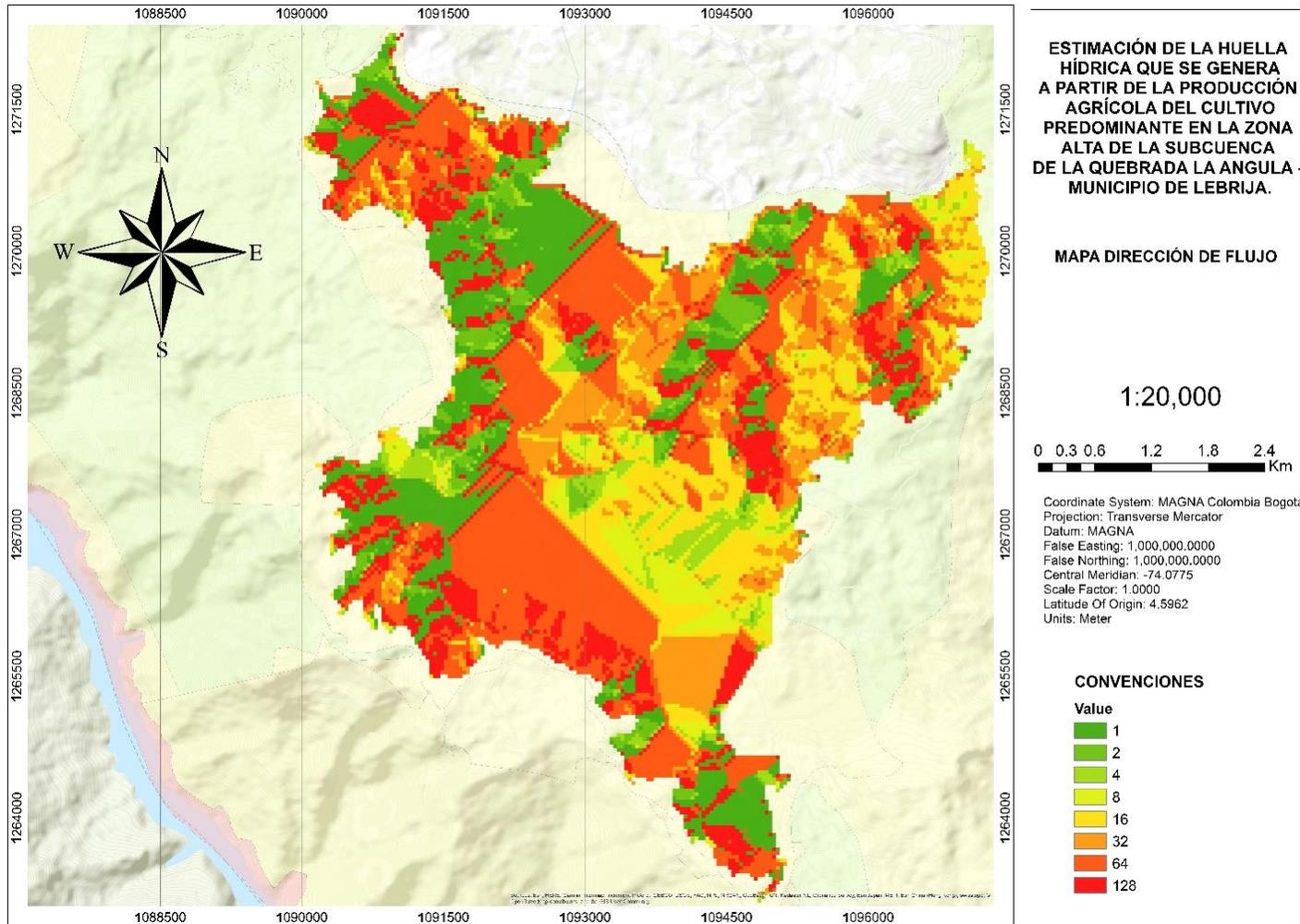


Figura 6. Mapa de dirección de flujo de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula

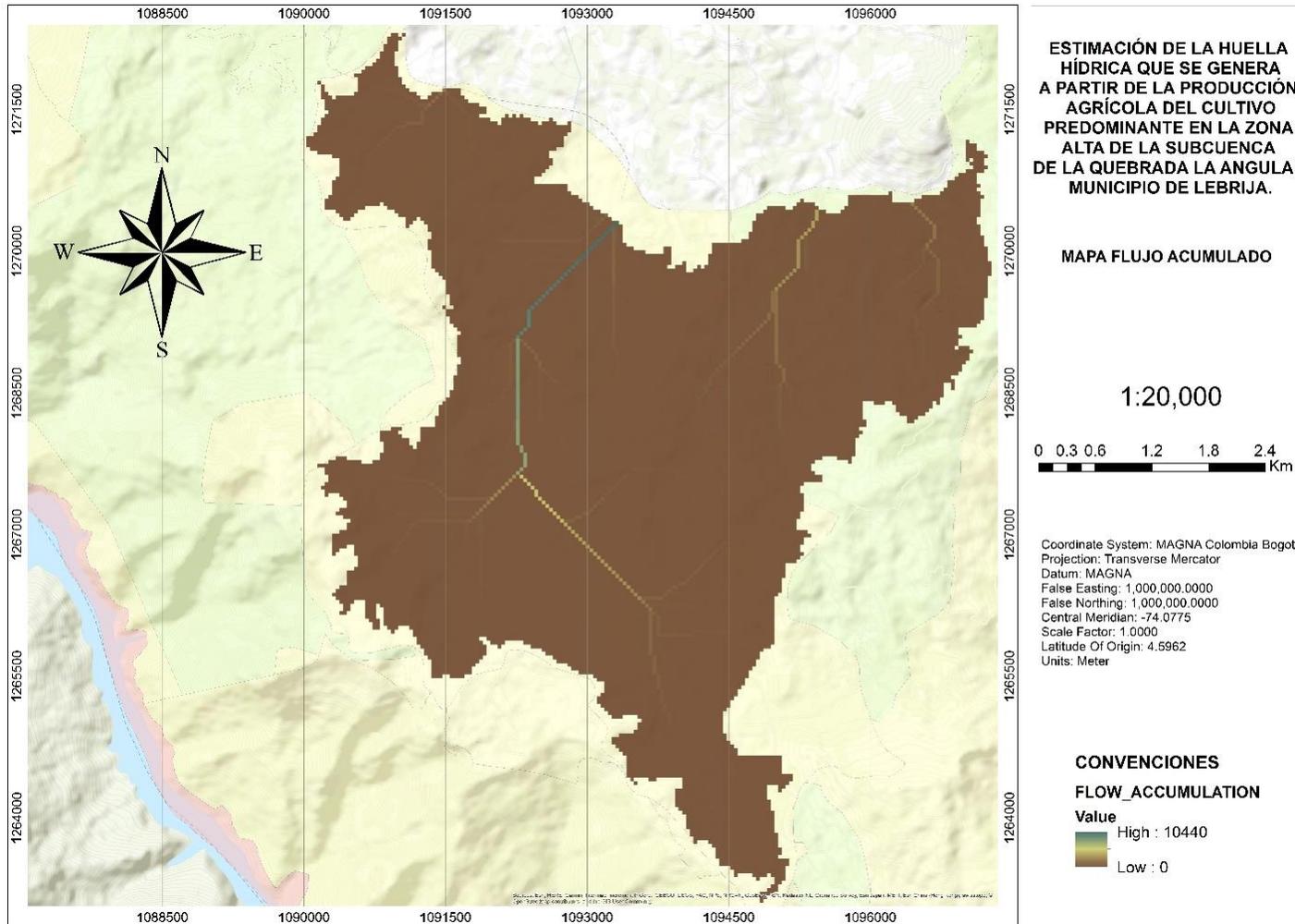


Figura 7. Mapa de flujo acumulado de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula

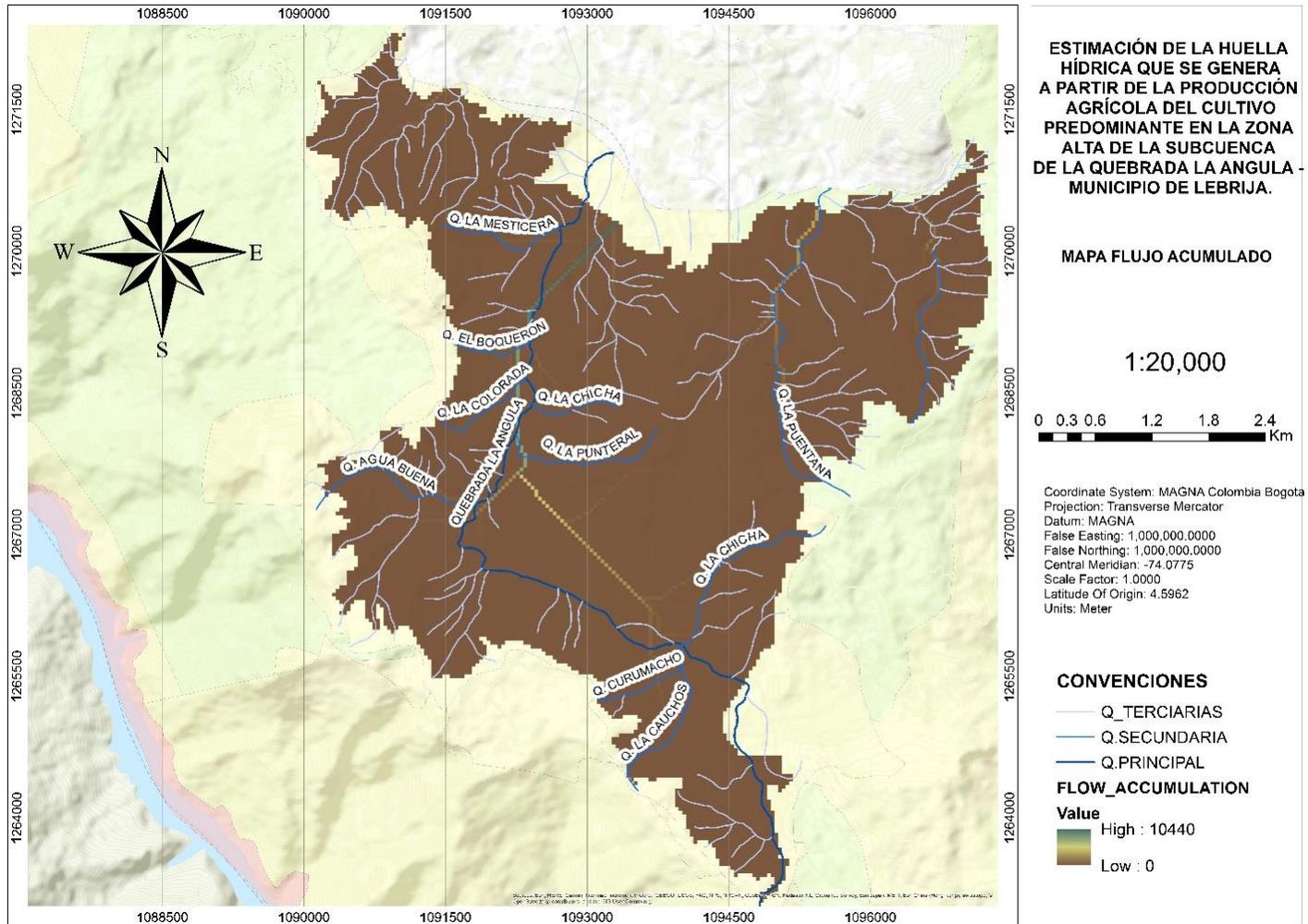


Figura 8. Mapa de flujo acumulado y drenajes de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula

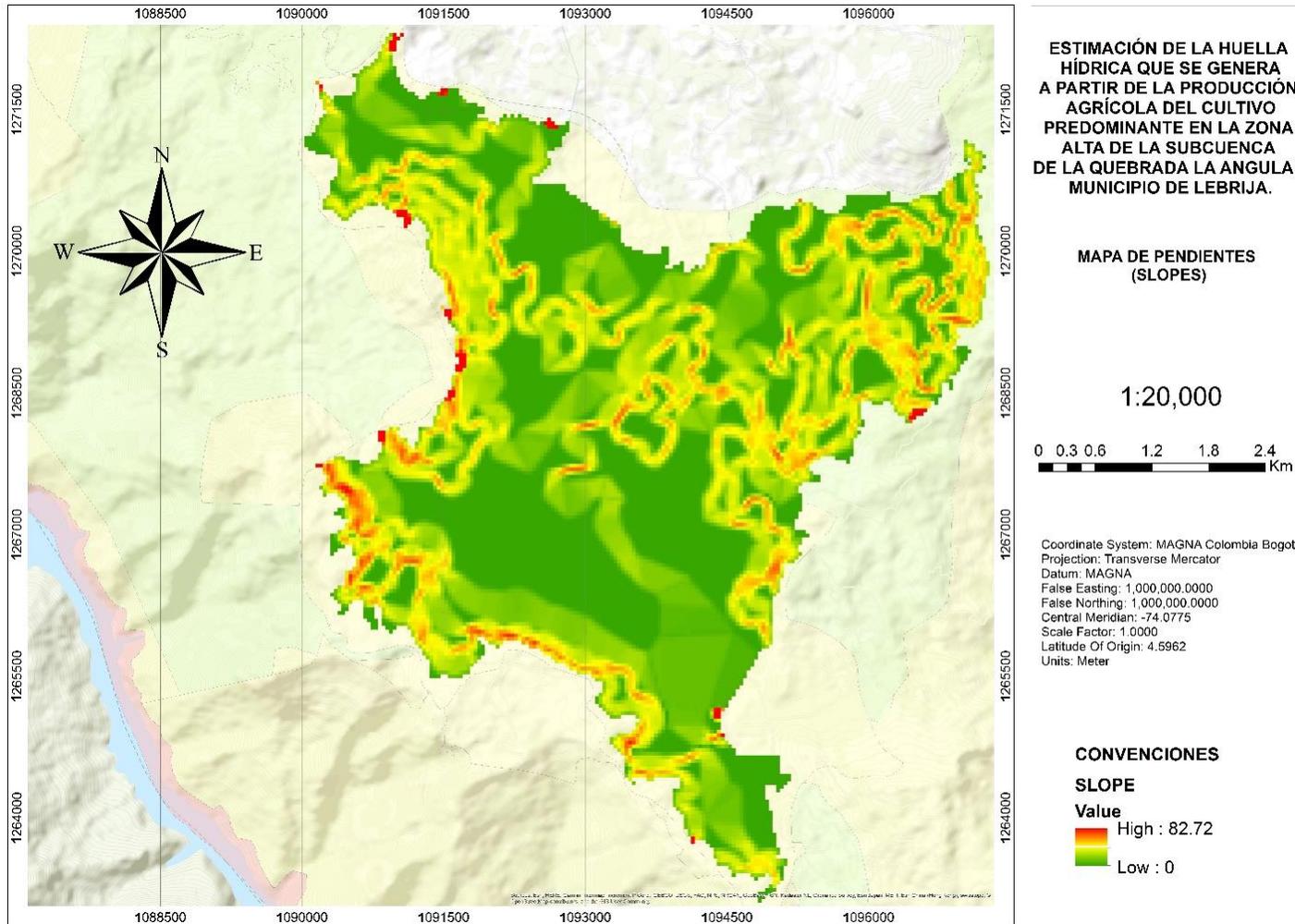


Figura 9 . Mapa de pendientes de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula

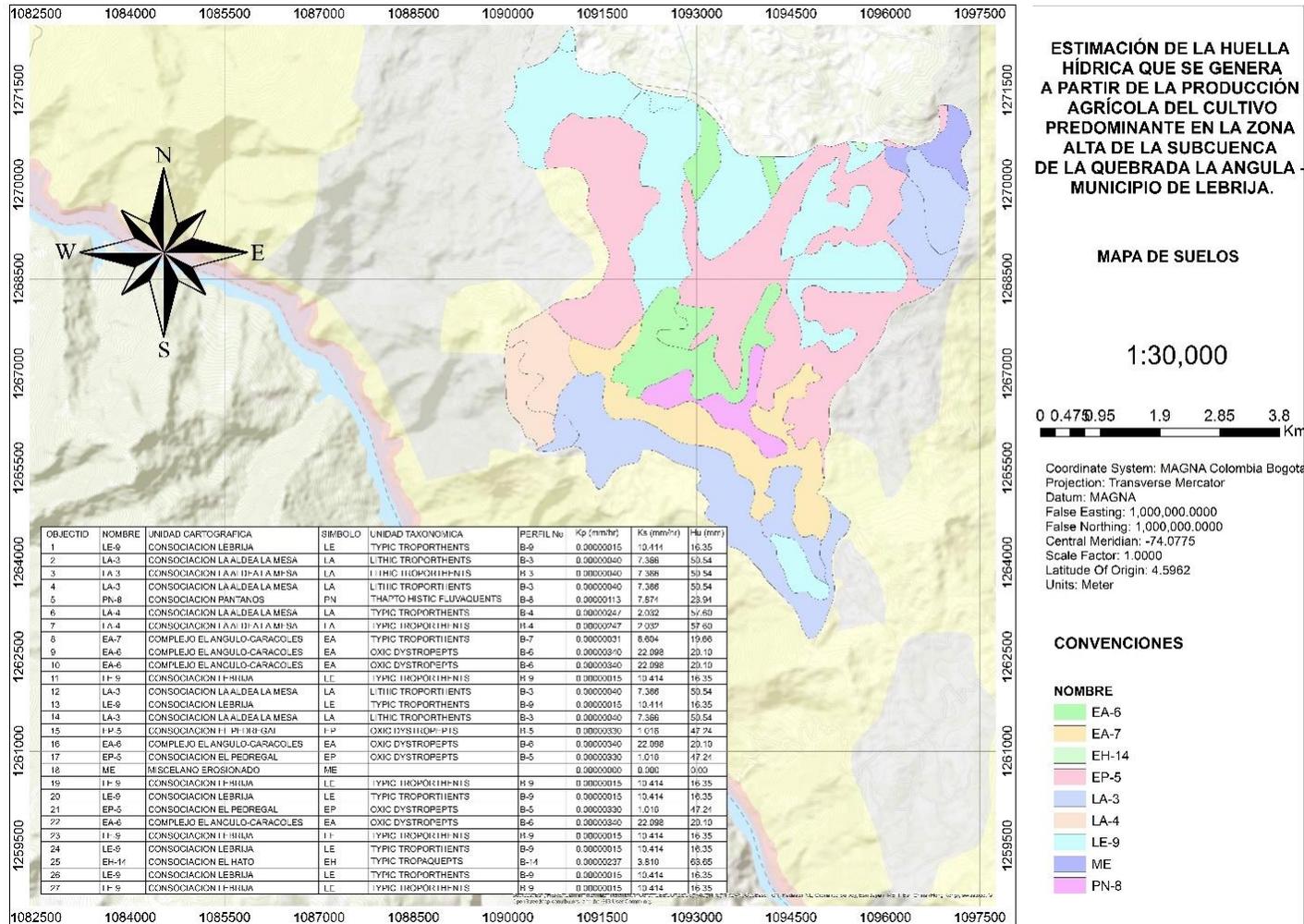


Figura 10. Mapa de suelos de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula

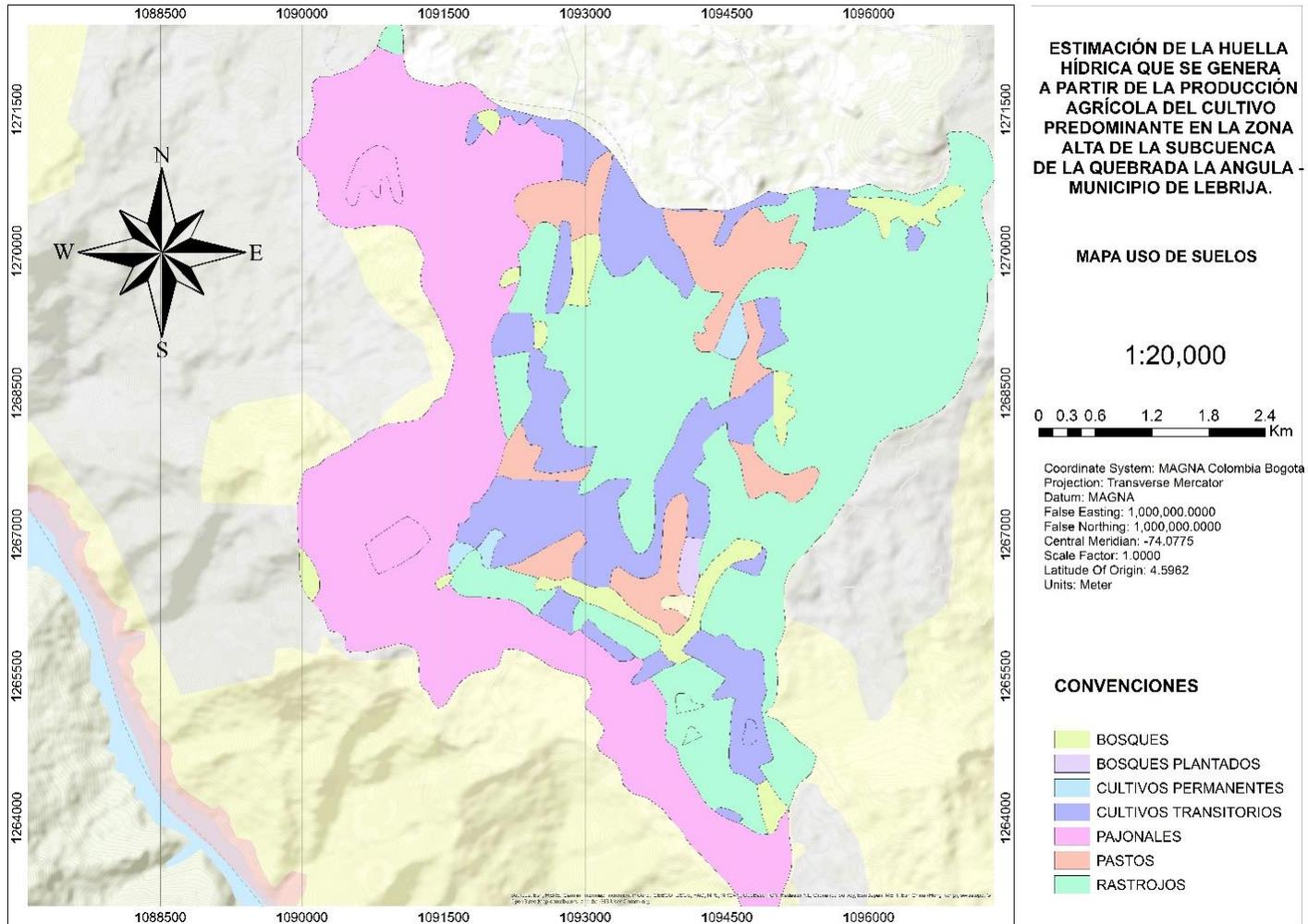


Figura 11. Mapa de usos de suelo de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula

La información plasmada en los mapas dentro del Sistema de Información Geográfica corresponde al periodo dentro de los años 2000 – 2004. La implementación del Sistema de Información Geográfica se realizó como un insumo para el cálculo de las huellas hídricas de las actividades agrícolas en la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula, así como para tener una base de información que facilite posteriores estudios y modelaciones en relación a la gestión y uso del recurso hídrico. Sin embargo, se hace necesaria una recolección de datos espacio-temporales más exacta y continua de parámetros básicos como caudales y datos climatológicos.

7.1.2 Caudales de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula

Para el caso de la zona alta de la Quebrada La Angula, se definió un objetivo ambiental C, para un estado de conservación moderado, teniendo en cuenta los conflictos por el uso del recurso que existen en la zona para las actividades agrícolas y pecuarias.

En la Figura 12 aparecen los caudales para la zona alta de la Quebrada La Angula de acuerdo con los diferentes objetivos ambientales según Salinas-Rodríguez (2011) [44], en donde a partir del caudal medio mensual (CMM), se extraen intervalos según el objetivo ambiental definido para la cuenca en estudio. Para el caso de la Figura 11, el caudal ecológico se ubica en el intervalo del objetivo ambiental moderado (Ver Anexo A).

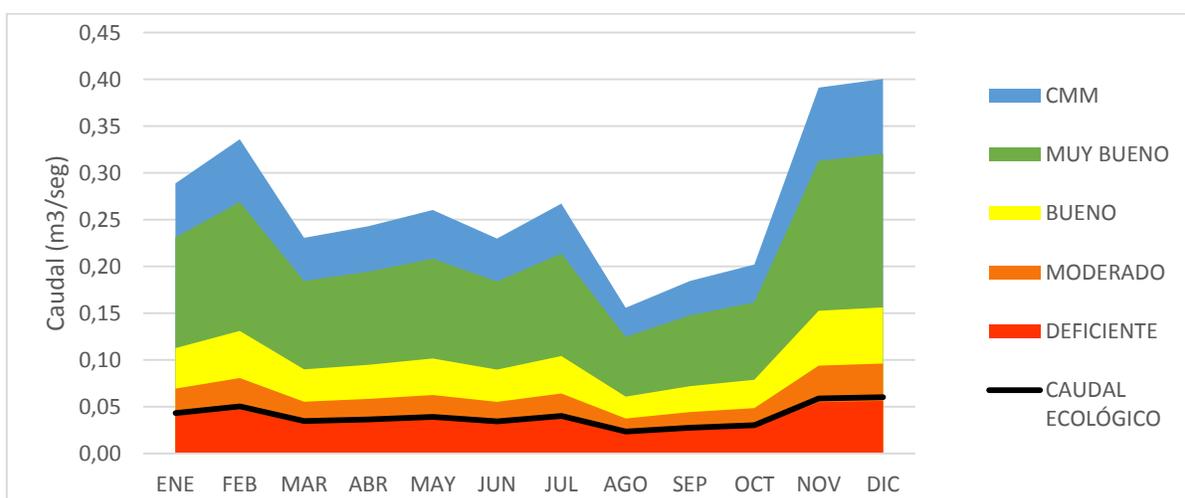


Figura 12. Caudal ecológico conforme objetivos ambientales y sus valores de referencia para la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula (CMM: caudal medio mensual)

Para el presente estudio, la disponibilidad de información no permitió obtener ningún año completo con la totalidad de datos mensuales, por lo cual se utilizó la *Aproximación hidrológica “detallada”* según Salinas-Rodríguez (2011) [44], por medio de la cual se estimó el régimen de caudales ordinarios estacionales para tres tipos de caudales: seco, medio y húmedo (Figura 13).

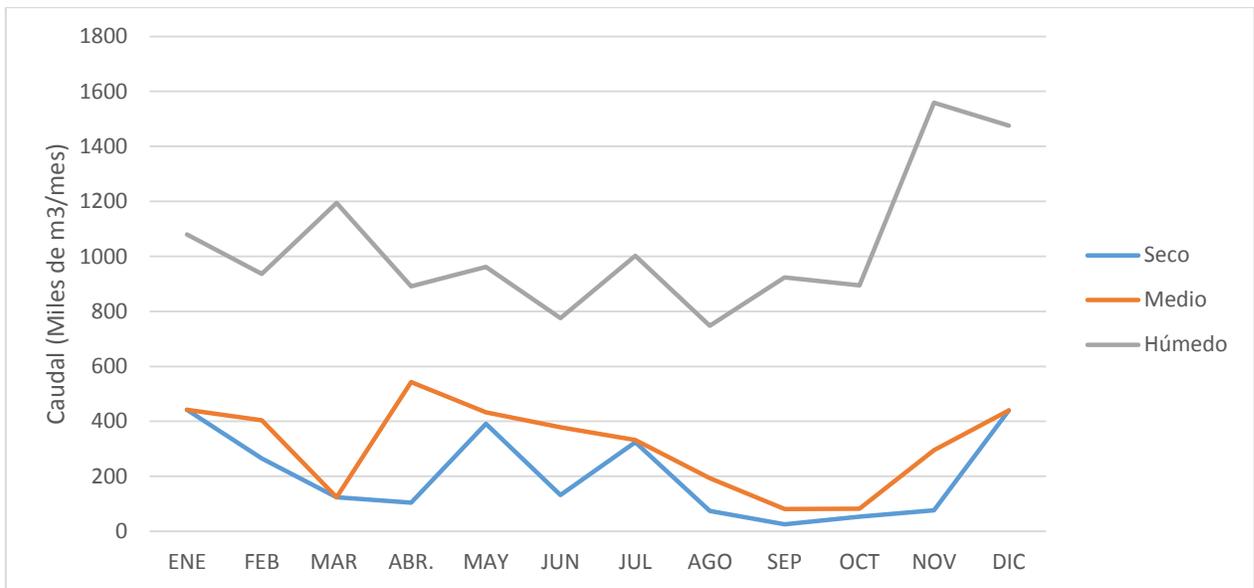


Figura 13. Régimen de caudales ordinarios estacionales para la zona alta de la Quebrada La Angula

Teniendo el Régimen de caudales ordinarios estacionales y el caudal ecológico para la cuenca, se determinó la oferta de agua azul para cada uno de los años de estudio (2007 y 2015) en los cuales, de acuerdo a las precipitaciones registradas para cada uno de estos años, se clasificaron en *Seco*, *Medio* o *Húmedo*. Según lo anterior, se definió al año 2007 como un periodo *Húmedo*, mientras que el 2015 se clasificó como un año *Seco*, ya que en el segundo semestre de dicho año comenzó el *Fenómeno del Niño*, lo que ocasionó una disminución considerable en el régimen de lluvias de la zona.

7.2 HUELLA HÍDRICA DE LOS CULTIVOS PREDOMINANTES EN LA ZONA ALTA DE LA CUENCA LA ANGULA

La elección de los cultivos predominantes se realizó teniendo en cuenta la información secundaria suministrada por la CDMB, así como por las Evaluaciones Agropecuarias Municipales realizadas por el municipio de Girón. Según esta revisión, los cultivos predominantes en la zona de estudio son la piña, teniendo en cuenta las dos variedades como un único tipo de cultivo para esta investigación, y la lima o limó Tahití. La elección de estos cultivos se corroboró con visitas de campo al lugar e identificación de cultivos por medio de fotografías aéreas tomadas por Dron (Figura 14).

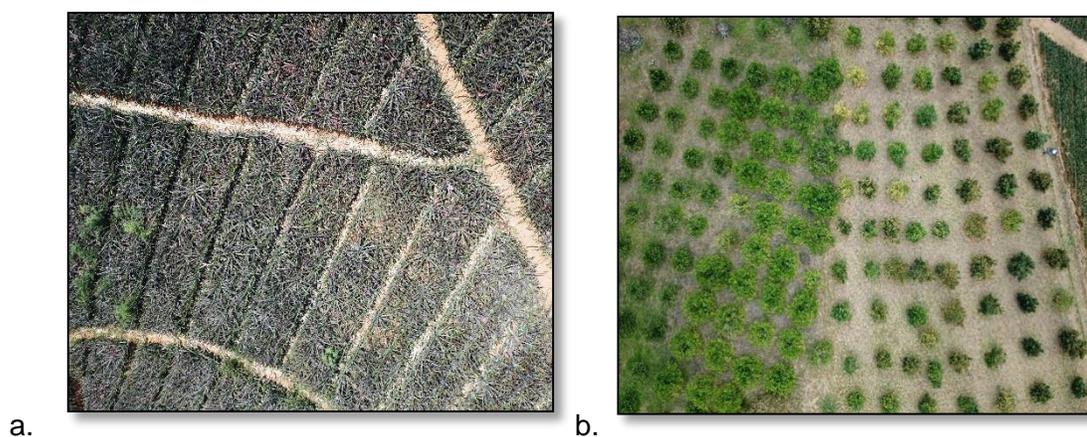


Figura 14. Identificación de cultivos realizada con Dron a) Cultivos de piña b) Cultivos de lima Tahití

7.2.1 Huella hídrica durante el año 2007 (año húmedo)

Para el año 2007, definido en este estudio como “año húmedo” se consideró un área cultivada de lima Tahití de 240 Ha, y para la piña un área cultivada de 999 Ha según la Evaluación Agropecuaria Municipal del municipio de Girón. Para este mismo año, la huella hídrica total en la zona alta de la cuenca La Angula, considerando los cultivos de piña y lima Tahití, es equivalente a 7.455.995,252 m³, de los cuales 318.240 m³ correspondiente a un 4%, conforman la huella hídrica azul. Por su parte, la huella hídrica verde representa el consumo de agua mayoritario con un volumen de 6.938.400, que equivale al 93% del gasto total de agua. La huella hídrica gris es la más pequeña con 199.355,252 m³ o el 3% de la huella hídrica total de la zona alta de la cuenca (Figura 15).

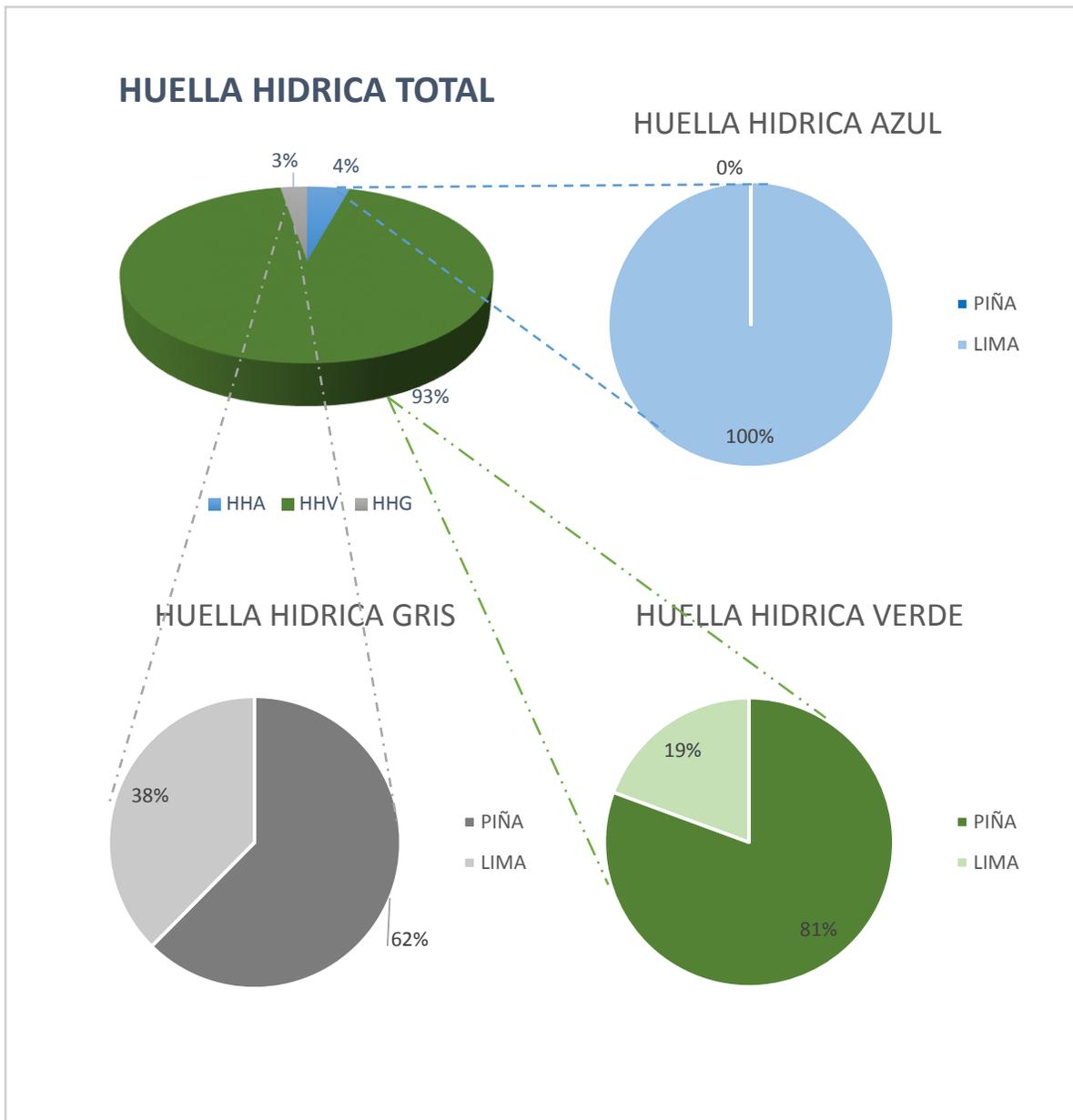


Figura 15. Distribución de la huella hídrica en la zona alta de la cuenca la Angula según tipo de huella y tipo de cultivo para el año húmedo

Analizando la huella total desde los cultivos, la piña consumió para el año húmedo un volumen de agua de 5.718.850,28 m³, mientras que la lima requirió de 1.737.144,97 m³ para toda su producción (Figura 15). Según los resultados anteriores, el consumo de agua es mucho mayor para la producción de piña, posiblemente porque para este año (2007), el

cultivo de lima Tahití apenas estaba empezando en la zona alta, mientras que la piña tenía cultivada mucha área que la lima Tahití. Para este año, la piña generó un impacto mucho mayor en el recurso hídrico de la cuenca que la lima Tahití.

7.2.2 Huella hídrica durante el año 2015 (año seco)

Para el año 2015, considerado en este estudio “año seco”, se consideró un área cultivada de lima Tahití de 1179,5 Ha, la cual tuvo un aumento bastante considerable respecto al área sembrada para el año húmedo. Por su parte la piña contó con un área cultivada de 1367 Ha según la Evaluación Agropecuaria Municipal del municipio de Girón. El crecimiento del área sembrada de la piña respecto al año húmedo fue positivo, pero mucho menor que el del cultivo de lima Tahití.

Según los resultados obtenidos para la huella hídrica total durante el año seco, el consumo total para la producción anual de piña y lima Tahití en la zona alta de la cuenca la Angula fue 16.905.911,040 m³ teniendo en cuenta la huella hídrica azul, verde y gris. De la totalidad de la huella hídrica en todo el año, el 50% corresponde a huella hídrica azul con 8.475.887 m³, el 47% a la huella hídrica verde con 7.891.603,5 m³ y solo el 3% a la huella hídrica gris, equivalente a 538.420,540 m³. Así mismo, del total de las huellas, el 74% corresponde a la producción de la lima Tahití con un gasto de 12.499.284,21 m³, y el 26%, correspondiente a un volumen de consumo de 4.406.626,83 m³ a la producción de piña (Figura 16).

Según lo anterior, el consumo de agua es mucho mayor para la producción de lima Tahití, posiblemente por corresponder a un tipo de cultivo permanente, y por tanto su impacto a la cuenca en relación con el consumo y contaminación hídricos es mucho mayor que el impacto producido por la piña para este año. Al comparar los resultados de la huella hídrica total del 2015 con el los del año húmedo se puede apreciar un cambio significativo entre la huella hídrica verde y la azul, ya que para el año seco, la huella azul se convierte en la predominante entre las tres y esto ocurre por el incremento de las áreas cultivadas de lima Tahití, lo que finalmente hace este cultivo tenga más huella total respecto a la piña.

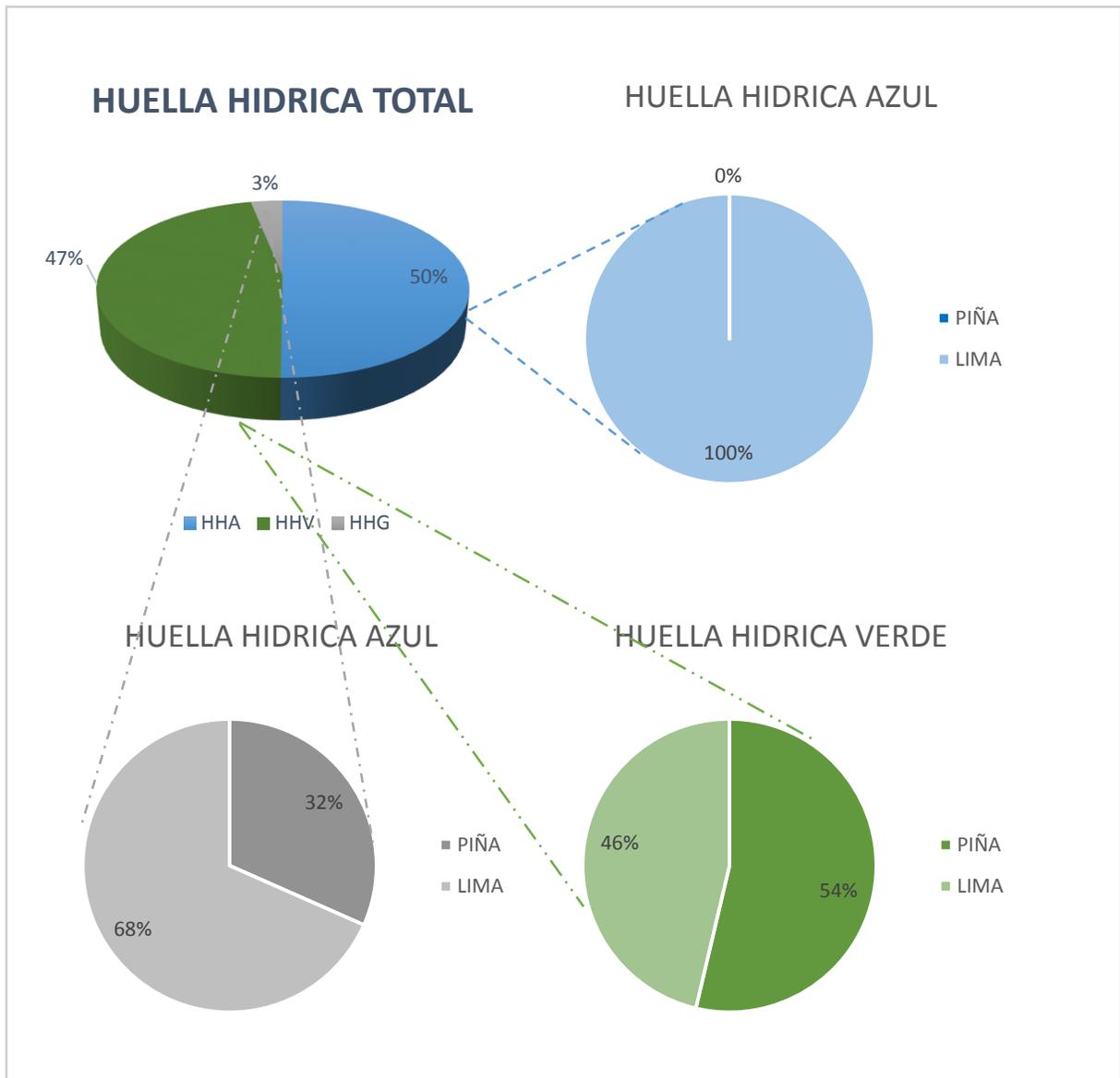


Figura 16. Distribución de la huella hídrica en la zona alta de la cuenca la Angula según tipo de huella y tipo de cultivo para el año seco

7.2.3 Huella hídrica agrícola por tonelada o agua virtual de los cultivos

El agua virtual cambia de acuerdo con el producto agrícola en cuestión, así como a las condiciones de cultivo y a las condiciones climáticas como la precipitación. Para el presente estudio se estimó la huella hídrica por tonelada para la piña y para la lima Tahití para los años húmedo (2007) y seco (2015).

Generalmente, los cultivos con mayores rendimientos generan una huella hídrica por tonelada o agua virtual más pequeña que los cultivos con menores rendimientos. Los cultivos con un alto rendimiento o biomasa cosechada, generalmente tienen una huella hídrica más pequeña por tonelada que los cultivos con un rendimiento bajo [45].

- *Huella hídrica por tonelada*

Para el año húmedo se obtuvo que la lima Tahití requiere un volumen de agua virtual de 452,38 m³/ton, valor mucho más grande respecto a los 249,41 m³/ton que necesita la piña para su producción. Para este mismo año, los rendimientos correspondieron a 16 ton/Ha para la lima Tahití, y de 32,7 ton/Ha para la piña. Para el caso de la piña, el consumo de agua azul es igual a cero, mientras que la gran mayoría del consumo por tonelada corresponde al agua verde. Para el caso de la lima Tahití, el agua verde represente la mayor parte del consumo virtual, sin embargo, el agua azul también corresponde a un porcentaje significativo del consumo por tonelada. En ambos cultivos, el gasto virtual de agua gris corresponde a la fracción minoritaria, pero es mucho mayor en el caso de la lima Tahití.

Para el año seco, la huella hídrica por tonelada fue igualmente mayor para el caso del cultivo de lima Tahití. Para este año, el rendimiento del cultivo de lima Tahití fue de 21,8 ton/Ha, mientras que el de la piña fue de 44,6 ton/Ha. Para ambos años, se corrobora que generalmente los cultivos con mayores rendimientos poseen un contenido de agua virtual que los cultivos con menores rendimientos. Para la lima Tahití, la huella por tonelada fue de 486,15 m³/ton, mientras que para la piña fue de 96,49 m³/ton. Para la lima Tahití, la distribución del contenido de agua virtual cambió drásticamente, ya que para este año, el contenido de agua azul represente la mayor fracción de las tres. Esto se debe principalmente a las precipitaciones registradas en este periodo de tiempo, que fueron

menores respecto al año húmedo, por lo que cada tonelada de lima Tahití necesito de más volumen de agua azul para su producción.

Para el cultivo de piña, resulta evidente como disminuye su contenido de agua por tonelada según aumenta considerablemente su rendimiento por hectárea. Tanto para el año húmedo como para el seco, la producción de lima Tahití registra una huella virtual gris mucho mayor que la de la piña. Esto se da por la diferencia en la frecuencia de aplicación de fertilizantes entre una especie y la otra, ya que a la piña generalmente se le realiza una aplicación recién se cultiva, y esta se repite anualmente. En el caso de la lima Tahití, la aplicación se realiza cada dos meses, o en la mayoría de los casos de manera mensual. Para este estudio, se consideró una aplicación mensual de fertilizantes, según referencias de los campesinos de la zona de estudio.

Los valores de huella hídrica por tonelada para ambos cultivos durante los años húmedo y seco fueron comparados con los valores reportados por Hoekstra y Mekonnen 2011 según la base de datos de la FAOSTAT [46]. Estos datos representan valores promedios globales y se registran en la Tabla 4 junto con los valores calculados en el presente estudio para la zona alta de la cuenca la Angula.

Tabla 4. Comparación de huella hídrica por tonelada respecto al promedio mundial

Cultivo	Promedio mundial* (m ³ /ton)			Zona alta cuenca la Angula año húmedo (m ³ /ton)			Zona alta cuenca la Angula año seco (m ³ /ton)		
	HH Verde	HH Azul	HH Gris	HH Verde	HH Azul	HH Gris	HH Verde	HH Azul	HH Gris
Piña	215	8	31	246,45	0	2,96	92,44	0	4,05
Lima Tahití	432	152	58	350	82,88	19,51	329,67	142,15	14,32

* (Mekonnen y Hoekstra 2011) [46].

Para el caso de la piña, los valores más similares al promedio global reportado por Hoekstra y Mekonnen (2011) [46] fueron los del año húmedo, donde para la zona alta de la cuenca la Angula, la huella verde fue de 246,45 m³/ton, un poco más alto que el valor de la FAOSTAT. La huella verde de la piña para el año seco tuvo una amplia diferencia respecto al promedio mundial, posiblemente por las bajas precipitaciones que se presentaron

durante el segundo semestre de ese año. En relación con la huella hídrica azul y gris, la diferencia no es significativa. La huella hídrica gris sin embargo, es un poco más alta seguramente porque en el presente estudio solo se tuvo en cuenta la lixiviación del Nitrógeno según Builes (2013) [35].

Respecto al cultivo de lima Tahití, las diferencias más importantes se presentan en la huella hídrica verde por tonelada, sobre todo para el año seco. La huella hídrica azul para el año húmedo representó cerca de la mitad del valor global, mientras que la huella del año seco es bastante cercana, correspondiendo al 93,52% del promedio mundial. Al igual que la piña, el contenido de agua gris es inferior al valor promedio. Para ambos años, se tiene que la lima Tahití requiere un contenido de agua virtual considerablemente mayor al de la piña, según lo indica Hoekstra y Mekonnen (2011) [46].

Las huellas hídricas virtuales estimadas en el presente estudio se acercan considerablemente a los datos reportados por Mekonnen y Hoekstra (2011) [46] en sus datos globales con un valor de r^2 de 0,88 $p < 0.05$ (Figura 17).

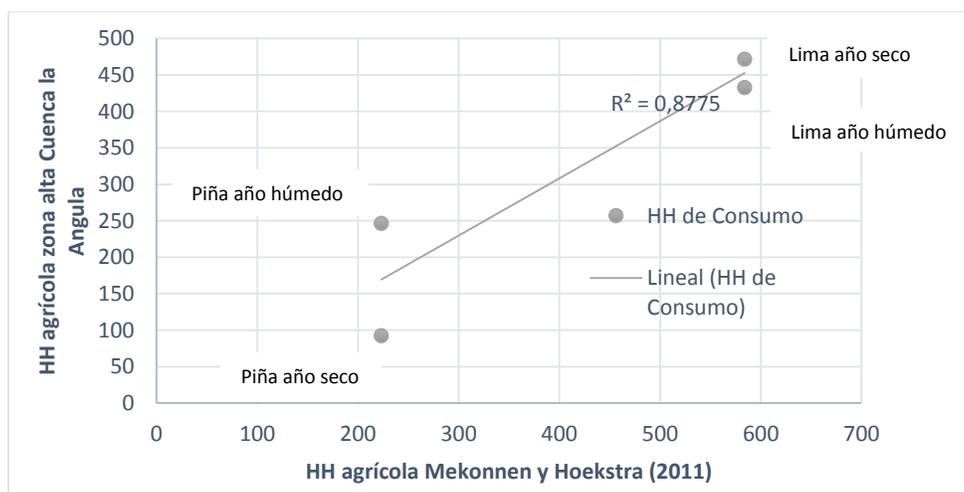


Figura 17. Comparación de los resultados de la HH agrícola de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula con Mekonnen y Hoekstra (2011)

En la Tabla 5 se registra la comparación que hace Bolaños (2011) [47] con los datos que el autor calculó para Honduras, junto con los volúmenes para Costa Rica y México según Hoekstra y Mekonnen (2010) [45].

Tabla 5. Comparación de huella hídrica por tonelada respecto a otros países

HUELLA HÍDRICA POR TONELADA						
	Huella	Costa Rica (m ³ /ton)	México (m ³ /ton)	Honduras (m ³ /ton)	Zona alta Angula año húmedo (m ³ /ton)	Zona alta Angula año seco (m ³ /ton)
Piña	Verde	68	87	174	246,45	92,44
	Azul	6	23	5	0,00	0,00
	Gris	0	22	4	2,96	4,05

En general, los valores para estos países latinoamericanos son mucho más bajos que el promedio global estimado según la FAOSTAT. Esto indica que los datos para de huella virtual para el cultivo de piña en la zona alta de la cuenca la Angula si puede llegar a valores bajos en condiciones de bajas precipitaciones.

Según la FAO [48] la piña puede sobrevivir largos periodos secos ya que posee la capacidad de retener agua en las hojas que se usa durante estos períodos. Respecto a la huella hídrica azul, según los valores de la tabla 2, esta corresponde a un bajo porcentaje del agua virtual total que va desde el 0%, como fue el caso del presente estudio, hasta aproximadamente un 17.42% para el caso de México. Para la huella hídrica gris, sucede algo similar, mostrando porcentajes que van desde el 0% para el caso de Costa Rica, hasta el 16,67% para México [47]. Sin embargo, cabe resaltar que al igual que en el presente estudio, el cálculo de la huella hídrica gris requiere de mayor profundización y estudio para poder estimar volúmenes más confiables.

7.2.4 Huella hídrica a escala mensual

La huella hídrica para los cultivos de piña y lima Tahití dentro la zona alta de la cuenca de la quebrada la Angula, se calculó a escala mensual para analizar los meses de mayor y menor consumo. En los resultados obtenidos se obtuvo que para los meses más lluviosos,

la huella hídrica verde aumentó ya que esta depende de la precipitación efectiva. Durante los meses más lluviosos aumenta la evapotranspiración y la saturación de los suelos. Por su parte, en los meses más secos, se incrementa el consumo de agua azul, ya que esta se presenta cuando hay déficit de agua y se requiere riego. Sin embargo, el consumo de agua azul solo se da para el cultivo de lima Tahití, ya que esta es una especie con altos requerimientos hídricos. Por su parte la piña, es un cultivo que se desarrolla más fácilmente en condiciones de secano. Estos resultados se corroboraron con información proporcionada por campesinos y cultivadores locales.

La huella hídrica azul se calculó de manera similar a la huella verde para ambos cultivos. Según los resultados, solo la lima Tahití registro requerimientos positivos de riesgo a lo largo de los dos años de estudio. La piña, según el análisis hecho en el Cropwat 8.0 de la FAO, es un cultivo que se desarrolla perfectamente en condiciones de secano, es decir, sin necesidad de riego y con las condiciones de precipitación de la zona. Para ambos años, la huella hídrica azul mensual de la lima Tahití aumenta en los meses más secos del año donde debido a las bajas precipitaciones, aumenta el déficit de agua en el suelo.

El cálculo y análisis de la huella hídrica gris se hizo de manera diferente a al cálculo de las huellas azul y verde pues para este fue necesario revisar las frecuencias y dosis en las aplicaciones de fertilizantes para cada uno de los cultivos. Para ambos cultivos, el contaminante que fue tenido en cuenta para el presente estudio fue el Nitrógeno proveniente de dos tipos de fertilizantes, el Triple 15 y el Agrimín, productos utilizados ampliamente en la industria agrícola colombiana. En base a la información local de frecuencia y cantidad para la aplicación de los fertilizantes, junto con los datos de las Evaluaciones Agropecuarias Municipales del municipio de Girón, se estimó la huella hídrica mensual para los años húmedo y seco. Para la piña se asumió según la información local que la aplicación del Triple 15 y el Agrimín se realiza a los pocos días de cultivar los colinos de piña, y para la lima Tahití que la aplicación de fertilizantes es constante mes a mes.

- *Huella hídrica mensual durante el año húmedo*

El año húmedo (2007) tuvo una precipitación total de cerca de 1000 mm, valor un poco inferior al promedio anual de precipitación de casi 1200 mm. Para este año, los meses más lluviosos fueron Marzo, Mayo y Octubre, donde se registraron huellas de agua verde

superiores a los otros meses tanto para la piña como para la lima Tahití (Figura 18). Por otro lado, hubo meses con bajo consumo de agua verde, principalmente Junio, Julio y Diciembre. El consumo mensual de ambos cultivos fue notablemente diferentes, debido principalmente a las extensiones de área cultivada de cada una de las especies, ya que como se mencionó anteriormente, la piña tenía una cobertura ampliamente mayor que la lima Tahití.

Para el año húmedo, la huella hídrica azul solamente corresponde a la lima Tahití. Los valores más grandes de consumo de agua azul se presentan en los meses de Junio, Septiembre y Noviembre (Figura 18). Estos meses son algunos de los más secos de ese año, y en general, el consumo de agua azul es más grande cuando la huella verde es más pequeña, es decir, cuando hay menos precipitación efectiva en la zona. Sin embargo, se debe tener en cuenta que según el ciclo de producción de la lima Tahití, este no requiere la misma cantidad de agua a lo largo de todo el año.

Para el año húmedo, la huella hídrica total de la piña fue mayor que la producida por la lima Tahití. Aunque en la mayoría de los meses son similares las huellas de ambas especies, en los meses de Marzo, Abril, Mayo, Octubre y Noviembre donde se cultivaron los mayores porcentajes de colinos de piña (Figura 18). A los pocos días se realiza la aplicación de fertilizante, se consideró que en estos meses se daba la lixiviación del nitrógeno y por tanto la generación de la huella hídrica.

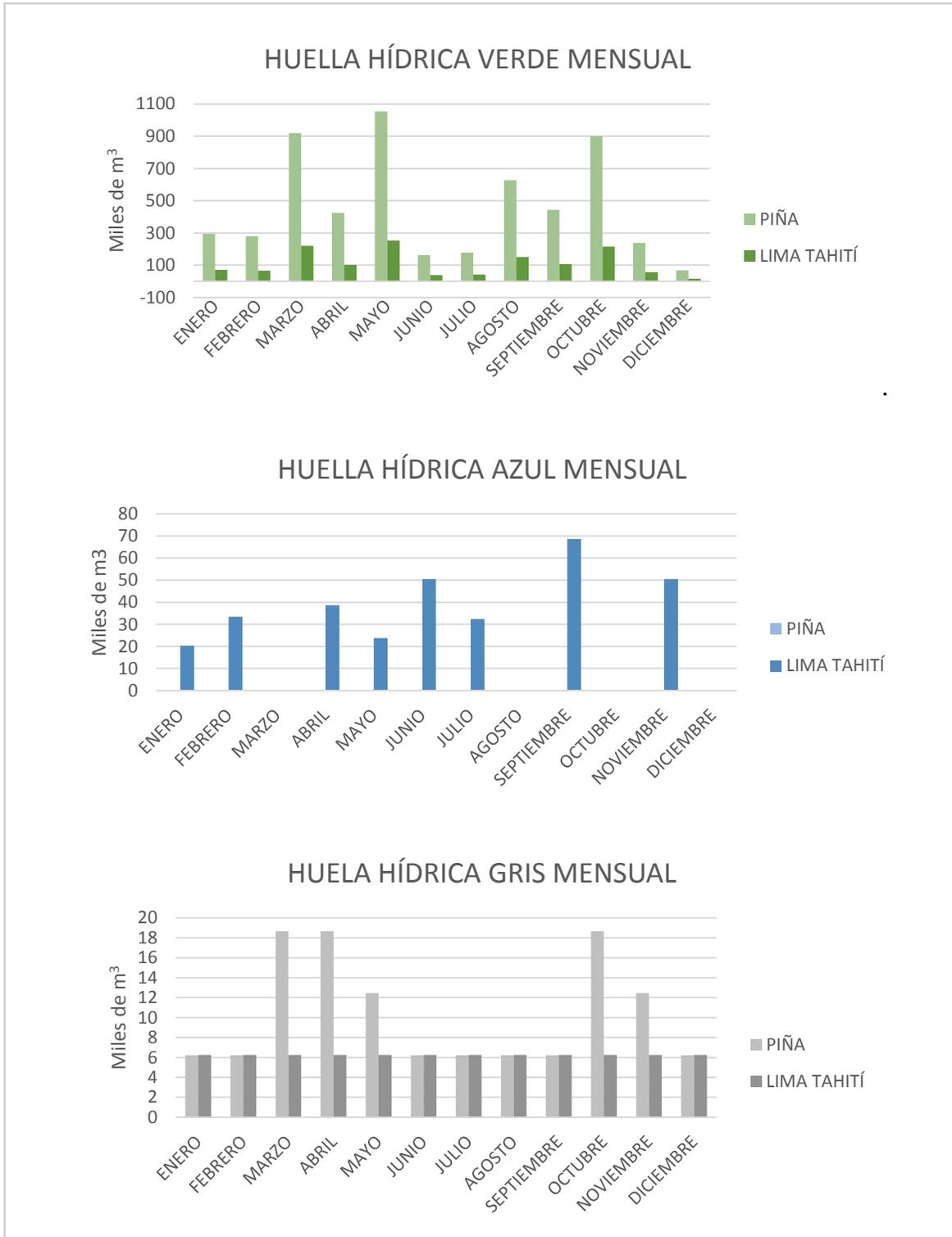


Figura 18. Huella hídrica verde, azul y gris mensual para los cultivos de piña y lima Tahití para el año húmedo

- *Huella hídrica verde mensual durante el año seco*

El año seco analizado en el presente estudio (2015) ha sido uno de los años más secos de este siglo junto con el 2016. Cabe resaltar que durante finales del 2015 e inicios del 2016 se presentó un evento muy fuerte del Fenómeno del Niño, donde inclusive hubo riesgo de racionamiento energético y del recurso hídrico. Estos factores climáticos se reflejan en los resultados de la huella hídrica verde mensual para el 2015 (Figura 19), donde se aprecia que el segundo semestre del año tuvo un consumo mucho menor que el primer semestre.

Para los meses de Octubre y Noviembre, las huellas mensuales fueron muy poco significativas comparado con el acumulado anual. Por su parte, Febrero y Marzo que fueron los meses más lluviosos de ese año, tuvieron las máximas huellas de agua verde para ambos cultivos. Respecto a la huella verde anual de la piña, no cambió mucho comparada con la del año húmedo. Esto ocurrió porque aunque las hectáreas cultivadas aumentaron, las precipitaciones para el año seco fueron mucho menores. En el caso de la lima Tahití, la huella verde mostró un aumento mensual y anual representativo, ya que el aumento en el área cultivada fue mucho mayor al aumento que tuvo la piña, además, la lima Tahití es una especie con mayores requerimientos hídricos que la piña, como ya se mencionó anteriormente.

El consumo de agua azul comparado con el del año húmedo aumentó significativamente. Este crecimiento en la huella azul se debió en primer lugar al crecimiento de las hectáreas cultivadas, así como la escasa precipitación en este periodo de tiempo.

Los meses de Febrero y Marzo fueron los más lluviosos, y en el caso de Abril la precipitación también fue alta comparada con los otros meses. Por lo anterior, la lluvia de este trimestre suplió todos los requerimientos hídricos del cultivo de lima Tahití. Ya para el mes de Mayo las precipitaciones descendieron teniendo su máximo déficit en Septiembre, Octubre y Diciembre, donde las necesidades de agua azul fueron muy altas (Figura 19). En estas circunstancias donde hay presencia del fenómeno del Niño, se evidencia como puede aumentar la vulnerabilidad de la cuenca, pues en el caso de cultivos como la lima Tahití aumentan los requerimientos de agua azul, pero debido a las sequías y a la falta de lluvia, también disminuye la disponibilidad de agua azul dentro de la cuenca.

Para el año seco, la huella hídrica gris anual para la lima Tahití fue mayor que la de la piña debido al aumento del área cultivada del primero, y a que la lima Tahití requiere de más aplicación de fertilizante. De igual manera, todas las huellas mensuales de agua gris de la lima Tahití fueron mayores que las de la piña, con volúmenes de 30.677 m³, mientras que la piña mostró sus huellas más grandes durante los meses de Marzo, Abril y Octubre con valores de 25.544 m³. La huella gris mensual de la lima Tahití tuvo un comportamiento similar en todos los meses ya que la aplicación mensual en el periodo de un año es generalmente la misma.

Respecto a la piña y según la información suministrada por el municipio de Girón, en Marzo, Abril, Mayo, Octubre y Noviembre se presentaron las huellas más altas debido a que en esos meses se realizó el mayor porcentaje de cultivo de colinos de piña respecto a la plantación total anual.

Aunque la distribución de los meses máximos y mínimos tuvo diferencias para ambos años, se logra evidenciar como los meses de mayor consumo están entre Febrero y Mayo, y luego entre Agosto y Octubre. Por su parte, los meses de más baja huella están entre Diciembre y Enero, y también a mitad del año entre los meses de Junio y Julio.

En realidad, teniendo en cuenta el medio poroso del suelo y de acuerdo con la aplicación, se requieren de más estudios para estimar una taza más confiable de la lixiviación del contaminante al cuerpo hídrico. Sin embargo y de acuerdo con los datos disponibles, se hace uso de las asunciones planteadas en la metodología según Hoekstra [3].

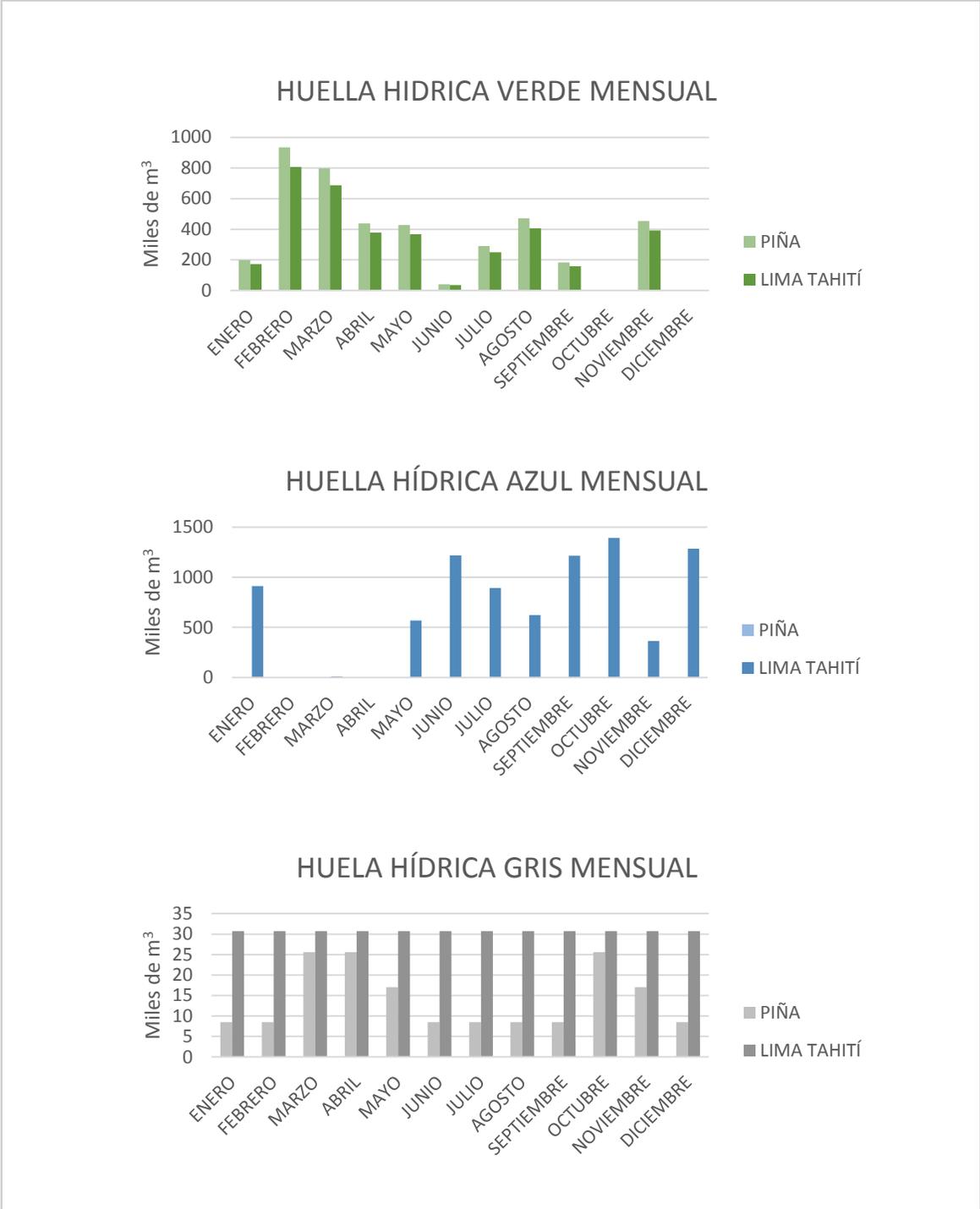


Figura 19. Huella hídrica verde, azul y gris mensual para los cultivos de piña y lima Tahití para el año seco

7.3 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD DE LA QUEBRADA LA ANGULA

La zona alta de la cuenca de La Quebrada La Angula es una zona que presenta problemas en la disponibilidad de agua azul y verde para desarrollar de una manera sostenible las actividades agrícolas. Los resultados del análisis de sostenibilidad muestran como la disponibilidad y la oferta de agua se han visto impactados negativamente, mientras que la demanda del recurso crece a medida en que se expanden las áreas cultivadas, haciendo que los índices de escasez reflejen un estado muy crítico sobre el uso de la cuenca, y prácticamente insostenible.

7.3.1 Análisis de sostenibilidad para el año húmedo

Para el año húmedo estudiado (2007), en la zona de estudio no estaba tan intensificada la actividad agrícola como en la zona alta y media, donde ya se llevaban varios años cultivando diferentes especies y especialmente la piña. Adicionalmente para ese año se registró un valor de precipitación anual de 1030,6 mm, registró mucho mayor que los 675,1 mm para el año seco (2015). De esta manera, aunque la zona no corresponde a un lugar con gran disponibilidad hídrica, solo se presentaron algunos “hotspots” o puntos críticos, es decir, meses en los cuales la demanda de agua superó la oferta o la disponibilidad. Para el año húmedo, los “hostpots” se presentaron únicamente para la huella hídrica verde para los meses Marzo, Mayo, Agosto y Octubre (Figura 20).

El mes de Junio también se acercó a un uso insostenible con un índice de 1,007, mes en el cual la Disponibilidad de Agua verde fue levemente menor a la demanda de agua. En los primeros cuatro meses mencionados, las precipitaciones tuvieron su máximo registro en el año, lo que incrementa la huella hídrica verde ya que cultivos tienen más agua para absorber del suelo. Así mismo, se aumenta la perdida de agua por evaporación, transpiración de las plantas y suelos saturados.

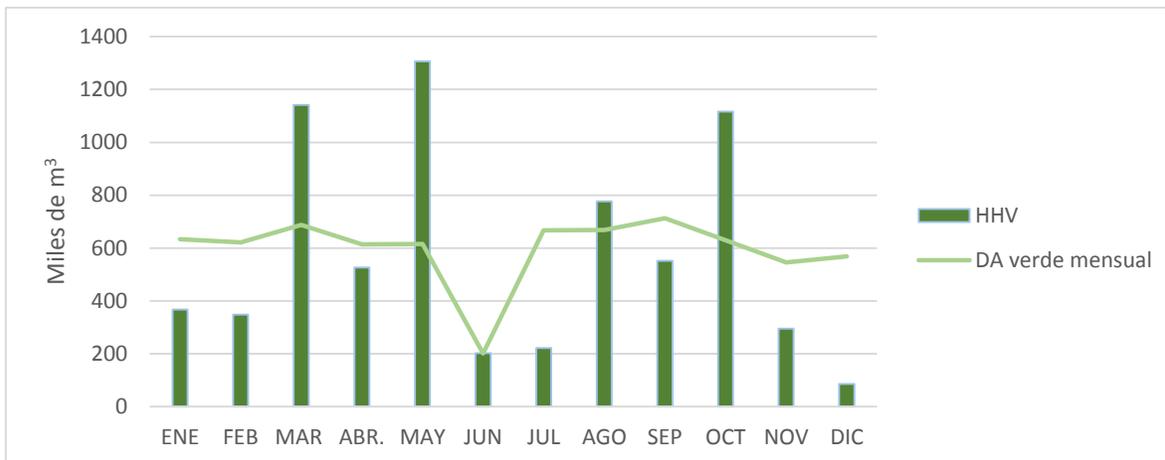


Figura 20. Huella hídrica verde versus disponibilidad de agua verde mensual (DAV) de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula año húmedo

El análisis de sostenibilidad de la huella hídrica azul no muestra ningún punto crítico a lo largo de todo el año, ya que el índice de escasez más alto se presente en el mes de Septiembre con un valor de tan solo 0,087, es decir, las actividades agrícolas correspondientes al cultivo de piña y lima Tahití fueron sostenibles a lo largo del año húmedo (Figura 21).

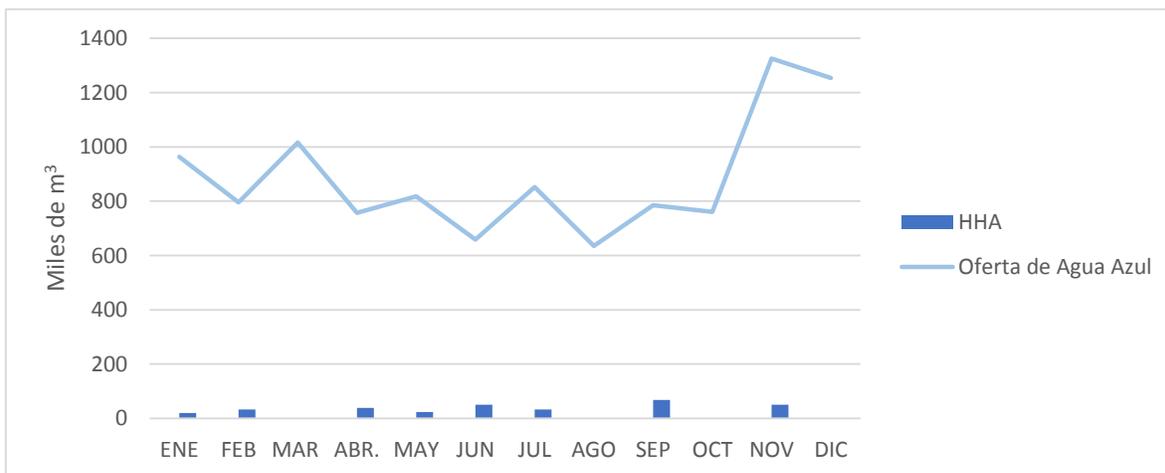


Figura 21. Huella hídrica azul versus oferta de agua azul neta de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula año húmedo

Para la huella hídrica gris durante el año húmedo, el comportamiento fue similar a la huella hídrica azul, es decir, las actividades agrícolas fueron sostenibles durante todo el año, en donde el índice de escasez más grande fue de apenas 0,035 (Figura 22).

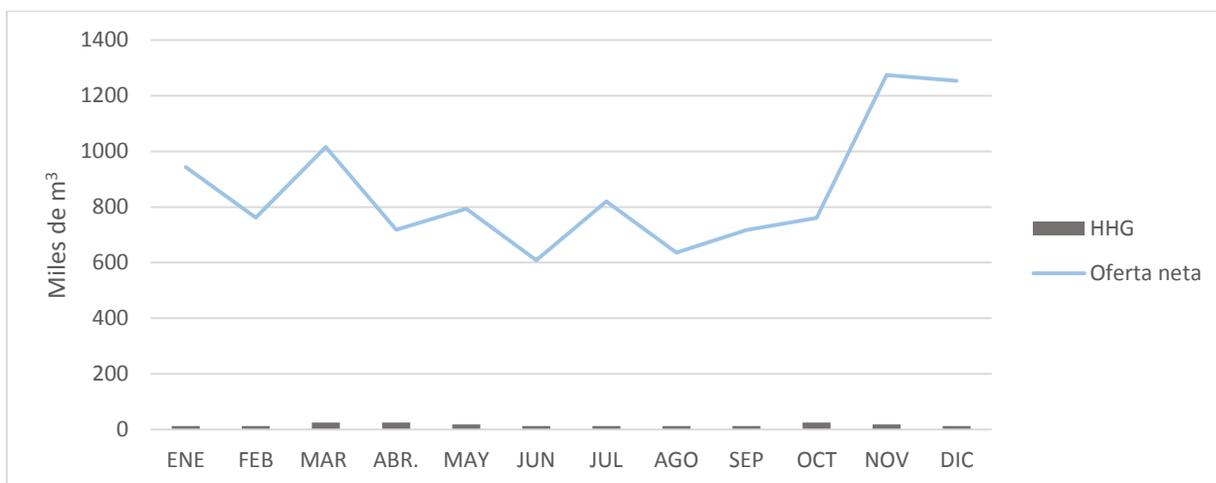


Figura 22. Huella hídrica gris versus oferta natural de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula para el año húmedo

7.3.2 Análisis de sostenibilidad para el año seco

Según el análisis de sostenibilidad para el año seco, el uso del recurso hídrico en la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula presentó muchos puntos críticos, haciendo de este año un periodo virtualmente insostenible. Entre los factores que más repercutieron negativamente están la expansión de los dos cultivos de estudio, así como la presencia del *Fenómeno del Niño* durante el segundo periodo del año. Se plantea que la desaparición del humedal *El Pantano*, pudo afectar en gran medida la disponibilidad de agua de la zona.

En el caso de la huella hídrica verde, Febrero fue en uno mes que presentó un punto crítico con un índice de escasez de 1,13. En los demás meses del año la huella hídrica fue sostenible (Figura 23). Respecto al año húmedo, la presencia de puntos críticos fue mucho menor debido principalmente a la disminución de la precipitación, lo que provoca menos pérdidas por evaporación, transpiración y suelos saturados.

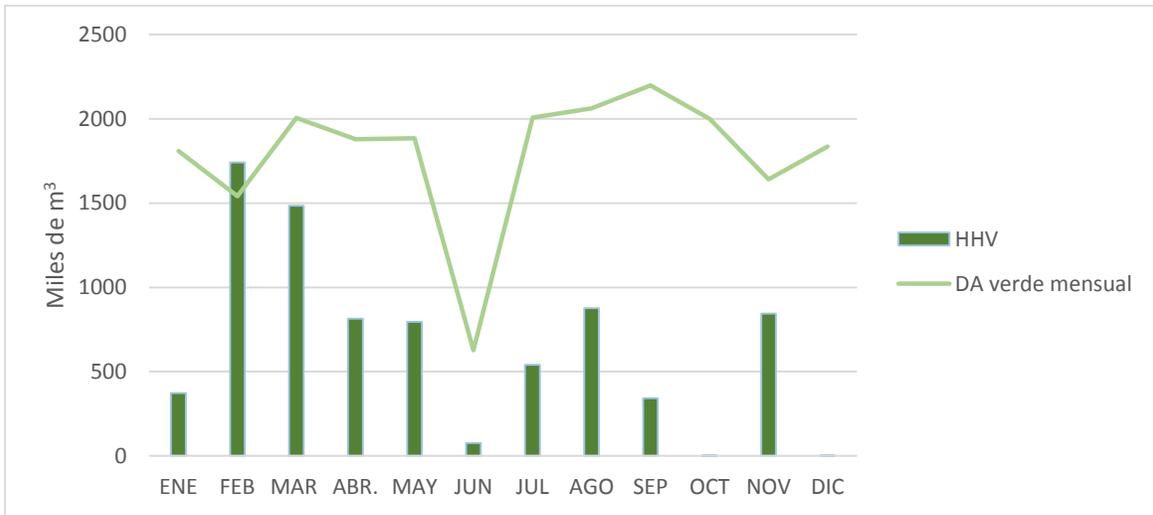


Figura 23. Huella hídrica verde versus disponibilidad de agua verde mensual (DAV) de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula para un año seco

El estado crítico de la Quebrada se observa principalmente en el análisis de sostenibilidad de la huella hídrica azul (Figura 24), en donde se observa que solo Febrero y Marzo presentan indicadores positivos de Escasez. Por su parte, todos los demás periodos del año fueron críticos Junio, Septiembre, Octubre y Diciembre, principalmente por la presencia del Fenómeno del Niño. Según la Figura 24, en los meses de Septiembre y Octubre prácticamente no hubo Oferta Natural de agua en la Quebrada.

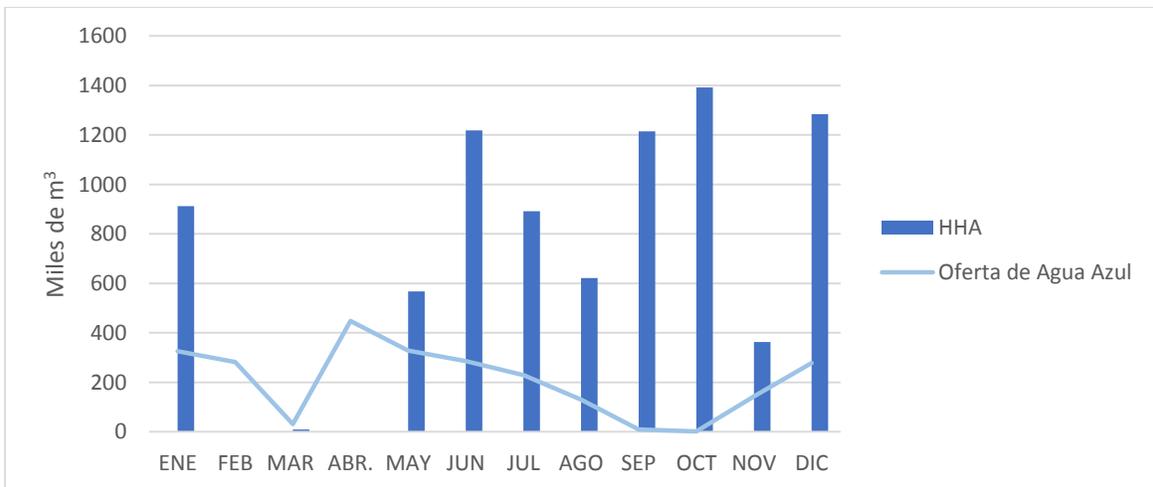


Figura 24. Huella hídrica azul versus oferta de agua azul neta de la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula para un año seco

En Octubre del 2015, la CDMB publicó una noticia expresando que la Corporación iba a tomar medidas para analizar el estado de afectación de la Quebrada. Así mismo se muestra una fotografía en donde se observa el estado crítico del cuerpo hídrico, el cual no tiene prácticamente agua (Figura 25).



Figura 25. Quebrada La Angula en estado crítico durante la sequía del segundo semestre del año 2015 [49].

7.4 ESCENARIOS DE LA HUELLA HÍDRICA PARA LA ZONA ALTA DE LA CUENCA DE LA QUEBRADA LA ANGULA

Teniendo en cuenta el cambio acelerado en el uso del suelo en la zona alta de la cuenca de la quebrada La Angula, se consideran dos escenarios futuros en base a los dos cultivos estudiados. Para estos casos, el objetivo es analizar los cambios en la huella hídrica en el caso de que uno de los dos cultivos predomine en la zona de estudio teniendo como base el año de estudio 2015. Según lo anterior, el primer escenario se denomina *Escenario solo piña* en donde se asumen que el área cultivada de lima Tahití se reemplaza por plantaciones de piña. El segundo escenario es contrario al primero y se denomina *Escenario solo lima Tahití*, en donde las consideraciones son similares al primer escenario, y las plantaciones de piña de la zona se reemplazan por cultivos de lima Tahití.

7.4.1 Escenario solo piña

Como ya se mencionó, es este escenario se considera que el área plantada de lima Tahití se reemplaza por piña, teniendo 2546,5 Ha de este cultivo. Para este escenario la huella hídrica total anual fue de 8.208.833,38 m³.

- *Huella hídrica a escala mensual para el Escenario solo piña*

La huella verde anual para el *Escenario solo piña* fue de 7.891.603,5 m³ siendo similar a la huella hídrica anual para el año base 2015. Según este escenario los meses con más alta huella hídrica son Febrero, Marzo y Agosto, mientras que los meses que registran menor consumo son los de Junio, Octubre y Diciembre (Figura 26). Según los resultados, el cambio de cultivo de lima Tahití a piña no afecta de ninguna forma la huella hídrica verde mensual y anual.

Para este escenario, como solo se considera plantación de piña, al igual que en los cálculos de los años húmedo y seco, este cultivo no registra requerimientos de agua azul.

La huella hídrica gris del *Escenario solo piña* fue igual a 317.229,88 m³ en donde se mantuvo la distribución de los porcentajes de plantación de los cultivos para cada mes (Figura 26). Comparada con la huella hídrica del año base 2015, para este escenario la huella gris disminuye en aproximadamente un 41%. Esto se explica porque la lima Tahití necesita de más fertilizante que la piña en lo que respecta a los nutrientes mayores como el Nitrógeno.

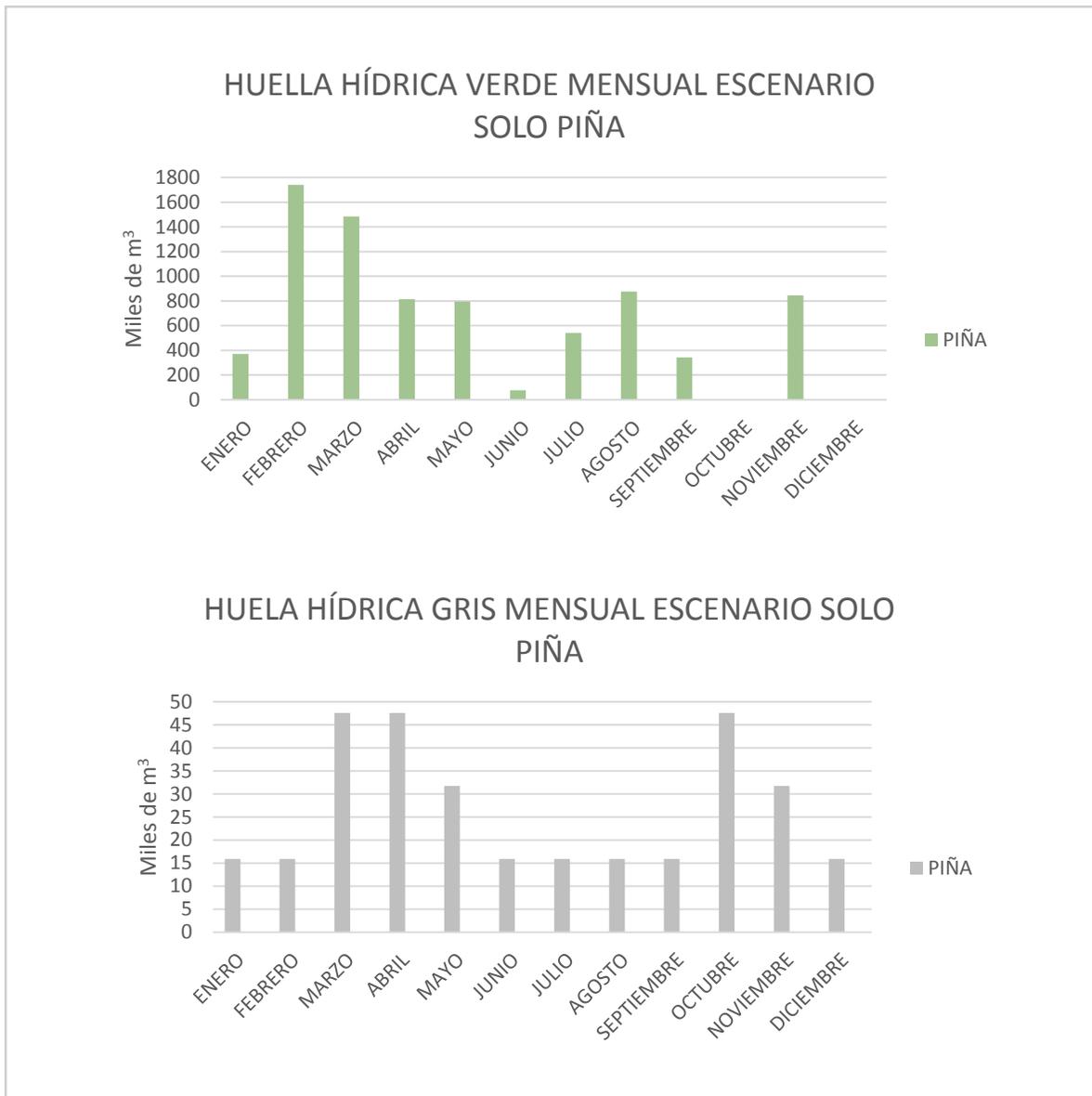


Figura 26. Huella hídrica verde y gris mensual para el “Escenario solo piña”

7.4.2 Escenario solo Lima Tahití

Este escenario representa una propuesta opuesta al *Escenario solo piña*, donde se consideró que todo el cultivo de piña se podría reemplazar por plantas de lima Tahití. Esta asunción es posible debido a que históricamente ha predominado más la piña que los cítricos en la cuenca de la quebrada La Angula. En lo que respecta a la zona media, y

principalmente a la zona baja, los agricultores llevan más tiempo cultivando piña, y poco a poco han desplazado sus actividades a la producción de cítricos y otros frutales, debido entre otras cosas a los impactos negativos en el suelo que generan los monocultivos. En el *Escenario solo lima Tahití*, la huella hídrica total anual estimada fue de 26.985.525,4 m³.

- *Huella hídrica a escala mensual para el Escenario lima Tahití*

La huella verde anual para el *Escenario solo lima Tahití* fue de 7.891.603,5 m³. Se observa que este valor no cambia respecto al *Escenario solo piña* y al escenario base 2015. Cabe recordar que la huella verde varía según cambie la distribución temporal de las precipitaciones, por lo que la huella verde anual no cambia ya que se consideraron los mismos valores de precipitación usados para el año seco. De igual manera, se conservan iguales las huellas a nivel mensual (Figura 27).

La huella hídrica para este escenario fue de 18.299.149 m³, representando un aumento de cerca del 54% respecto al año base 2015. Para este escenario los meses de mayor requerimiento de agua azul son Junio, Octubre y Diciembre, donde se presentan mayor déficit de agua. Por su parte, de Febrero a Abril, los requerimientos azules son casi nulos (Figura 27).

Respecto a la huella hídrica gris del *Escenario solo lima Tahití*, el valor estimado corresponde a 794.772,92 m³. Este volumen representa un incremento de aproximadamente 32% comparado con la cantidad de agua gris para el año base 2015. De la misma manera que en el *Escenario solo piña* y en los años de estudio, se evidencia una huella constante a lo largo de todos los meses, que para este caso equivale a 66.231,077 m³ por mes (Figura 27).

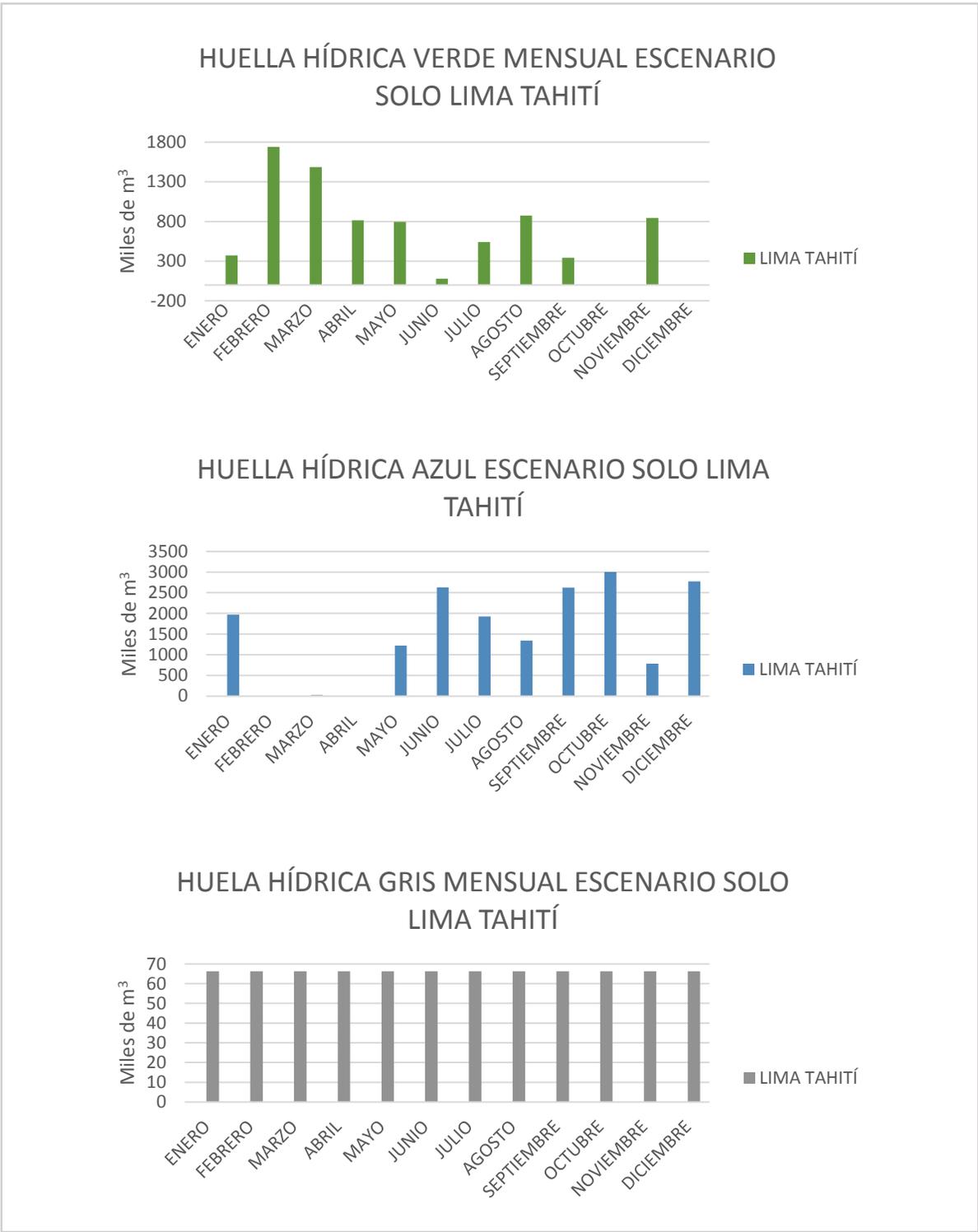


Figura 27. Huella hídrica azul mensual para el “Escenario solo lima Tahiti”

7.4.3 Huella hídrica anual de los escenarios respecto al año base 2015

Teniendo en cuenta los resultados de la huella hídrica total anual para el año 2015 y para los escenarios, se evidencia que para el *Escenario solo piña* la huella total es menor, representando una disminución de cerca del 51.5% con 8.208.833,38 m³ respecto a los 16.905.911 m³ del año seco, mientras que el *Escenario solo lima Tahití* significa un incremento de aproximadamente 37.4% con un volumen de 26.985.525,4 m³ en relación al año seco (Figura 28). Estos resultados se corroboran con las estimaciones del contenido de agua virtual para cada uno de los cultivos, donde es mucho mayor el de la lima Tahití.

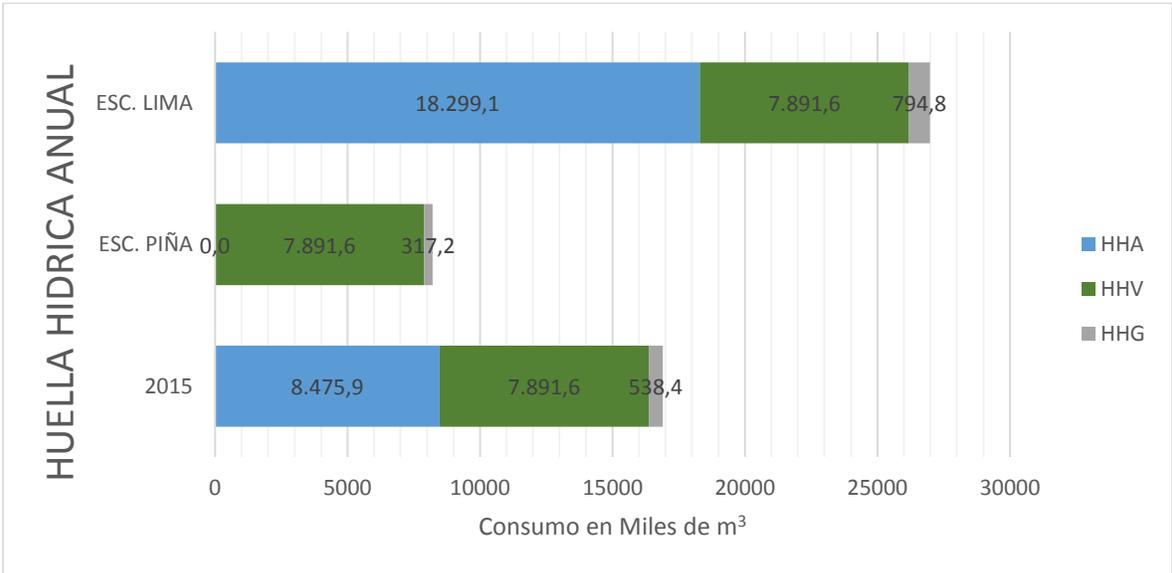


Figura 28. Comparación de los resultados de huella hídrica anual (azul, verde y gris) de los escenarios respecto al año base 2015 (seco)

8 CONCLUSIONES

- En el estudio se logró implementar un sistema de información geográfica a partir de la información cartográfica y climatológica proporcionada por la CDMB dentro del POMCA de la Subcuenca del Lebrija alto. Así mismo se usó información del Estudio Semidetallado de suelos de la Subcuenca de la Quebrada la Angula con la ayuda del módulo Soil Water Characteristics del software SPAW Hidrology. Los mapas se desarrollaron utilizando los software AutoCAD y ArcGIS.
- El presente estudio muestra que para un año húmedo, como fue el caso del 2007, la huella hídrica total en la zona alta de la cuenca La Angula, considerando los cultivos de piña y lima Tahití, fue aproximadamente de 7,46 Hm³, de los cuales el 4% conforma la huella hídrica azul, el 93% corresponde al agua verde y el 3% al agua gris. Del volumen total consumido, el 76,6% se adicionó al proceso productivo de la piña, y el 23,4% al de la lima Tahití.
- Para un año seco, como el 2015, se presentó un aumento considerable en la huella hídrica, donde según los resultados se consumieron cerca de 16,9 Hm³, de los cuales el 50% corresponde a la huella hídrica azul, el 47% a la verde y el 3% a la huella hídrica gris. Del total de las huellas para este año, el 74% se utilizó para la producción de lima Tahití y el 26% para la piña.
- Aparentemente, la huella hídrica gris fue la menos representativa, pero vale aclarar que en este estudio solo se analizó el gasto hídrico necesario para diluir el Nitrógeno lixiviado de los fertilizantes dejando de lado otro tipo de contaminantes. Así mismo se hacen otros

estudios para evaluar a mayor profundidad en comportamiento en el transporte de los contaminantes que provienen de los fertilizantes y plaguicidas.

- Respecto al análisis de agua virtual, se tiene que para un año húmedo, la lima requirió un volumen de 452,38 m³/ton mientras que la piña necesitó un volumen de 249,41 m³/ton. Por su parte, para el año seco analizado, la huella virtual de la lima Tahití fue aproximadamente de 486,15 m³/ton, mientras que para la piña fue de 96.49 m³/ton. Para ambos casos, se comprobó según la literatura que especies cítricas como la lima Tahití requieren mayores volúmenes de agua por tonelada que la piña. En general, para el análisis de contenido de agua virtual se obtuvieron valores parecidos a los establecidos en otros países de América Latina y al promedio global registrado por Mekonnen y Hoekstra (2011) [46] con un r² de 0,88 p<0.05.
- En relación con el análisis de sostenibilidad, el año húmedo presentó algunos puntos críticos o “hostspots” en la huella hídrica verde, principalmente por las pérdidas por evaporación, transpiración y suelo saturado, ya que las precipitaciones fueron mayores respecto a un año medio. Para este segundo año, debido a la expansión de los cultivos y a la presencia del *Fenómeno del Niño*, se dio lugar a un estado crítico de la quebrada, ya que se utilizó toda la Oferta de Agua disponible, utilizando incluso el caudal ecológico del cuerpo hídrico. Esto originó una sequía histórica con implicaciones ambientales negativas.
- Sobre en análisis de escenarios, se determinó que mientras el año base tuvo un consumo de 16,9 Hm³, para el escenario “solo piña” se estimó una huella de aproximadamente 8,21 Hm³ y para el escenario “solo lima Tahití” un volumen de 26,99 Hm³. De esta manera, se indica que una posible medida para mejorar la gestión del recurso hídrico en la zona alta de la cuenca de la Quebrada La Angula sea la de no cultivar cítricos en la zona, ya que en la parte media y baja también se cultivan otras especies como el limón y el maracuyá, cultivos que consumen mucho más volumen de agua por tonelada que la piña, la cual representa una especie interesante para cultivar en condiciones de secano. Por otra parte, también se hace necesario el análisis de los límites en las áreas cultivadas, para que no se afecte la sostenibilidad de la cuenca.

- Este estudio representa un primer acercamiento al cálculo de la huella hídrica en la zona alta de la Quebrada la Angula. Dentro de las recomendaciones de este estudio está la de considerar el gasto hídrico de las plantas avícolas y porcícolas, las cuales se ubican principalmente en la zona media de la cuenca. Así mismo considerar los otros cultivos que se desarrollan en menores proporciones y el consumo domiciliario para tener una estimación más integral de la huella hídrica total que se genera en la cuenca de La Quebrada La Angula.
- Finalmente, se comprobó la necesidad de desarrollar estudios como el cálculo de la huella hídrica, pues indicadores como estos representan insumos de gran utilidad para la elaboración de medidas gestión en pro de mejorar reducir los impactos negativos y mejorar la sostenibilidad en una cuenca determinada.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] CDMB, «Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental Subcuenca Lebrija Alto,» Bucaramanga, 2004.
- [2] World Wildlife fund, Agua. Caudal ecológico, WWF, 2010.
- [3] A. Hoekstra, A. Chapagain, M. Aldaya y M. Mekkonen, «The water footprint assessment manual, London,» Earthscan, Washington D.C., 2011.
- [4] C. Cardona y B. Congote Ochoa, «La huella hídrica, un indicador de impacto en el uso del agua,» *Revista Tecnogestión*, vol. 10, nº 1, pp. 20-25, 2013.
- [5] F. Malin y C. Tom, «Comparative hidrology. An ecological approach to land and water resources,» UNESCO, 1989.
- [6] Y. Ivanova, «Evaluación de la huella hídrica de la ciudad de Bogotá como una herramienta de gestión del recurso hídrico en el area urbana,» Bogotá, Pontificia Universidad Javeriana, 2013.
- [7] E. Velázquez, «Agua virtual, huella hídrica y el binomio agua-energía: repensando los conceptos,» Universidad Pablo de Olavide , Sevilla.
- [8] A. Hoekstra, «Virtual Water Trade,» IHE Delft, 2003.
- [9] S. Shrestha, V. P. P. Pandey, C. Chanamai y D. K. Ghosh, «Green, blue and grey water footprints of primary cops production in Nepal,» *Water resour manage*, nº 27, pp. 5223-5243, 2013.
- [10] A. Hoekstra y A. Chapagain, «Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern,» *Water Resour Manage*, nº 21, pp. 35-48, 2007.
- [11] A. Hoekstra y A. Chapagain, «Globalization of Water. Sharing the Planet's Freshwater Resources,» Blackwell, Oxford, 2008.

- [12] F. Martínez, A. Perni y J. Martínez, «La huella hídrica total de una cuenca: El caso de la demarcación hidrográfica del segura,» Universidad de Murcia, Murcia, 2013.
- [13] R. Casado et al, «La huella hidrológica de la agricultura en España,» Fundación Marcelino Botín, Madrid, 2008.
- [14] J. Sotelo Navalpotro, J. Olcina Cantos, F. García Quiroga y M. Sotelo Perez, «Huella hídrica de España y su diversidad territorial,» *Estudios geográficos*, vol. LXXIII, nº 272, pp. 239-272, 2012.
- [15] J. Sotelo Navalpotro, M. Sotelo Pérez y F. García Quiroga, «Análisis "coste-beneficio y coste-eficiencia" de la huella hídrica en España,» *Observatorio medioambiental*, vol. 14, pp. 225-254, 2011.
- [16] M. Aldaya, R. Llamas, A. Garrido y C. Varela, «M. Aldaya, R. Llamas, A. Garrido y C. Varela, «Importancia del conocimiento de la huella hidrológica para la política española del agua,» *Encuentros multidisciplinares*, vol. 10, 2008.
- [17] J. Olcina Cantos y M. Sotelo Pérez, «La demanda de Huella hídrica y su precio, en España: Diferencias territoriales,» Universidad de Alicante, 2013.
- [18] M. Sotelo Pérez, «Una aproximación a la huella hídrica de los parques nacionales de España,» *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*, 2015.
- [19] F. Esteban Moratillo, M. Molina Moreno y M. Fernández Barrena, «La huella hídrica en España,» *Revista de Obras Públicas*, nº 3514, 2010.
- [20] A. Tolón Becerra, J. Lastra Bravo y V. Fernández Membrive, «Huella hidrica y sostenibilidad del uso de los recursos hídricos: Aplicación al Poniente Almeriense,» *Revista electrónica de medio ambiente*, vol. 14, nº 1, pp. 56-86.
- [21] E. Camacho Poyato, P. Montesinos Barrios, J. Rodríguez Díaz y R. González Perea, «Análisis de la sostenibilidad en el cultivo de la remolacha azucarera en la zona norte de España,» Universidad de Cordoba.
- [22] G. Salmoral et al, «Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir,» *Fundación Botín, Observatorio del agua*, nº 3, 2011.
- [23] G. Salmoral et al, «La huella hídrica de las aceitunas y aceite de oliva en España,» *Revista de investigación agraria*, pp. 1089-1104.
- [24] A. De Miguel García, «La huella hídrica como indicador de presiones: aplicación a la cuenca del Duero y al sector porcino español,» Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, 2013.

- [25] R. Vázquez del Mercado Arribas y M. Buenfil Rodríguez, «Huella hídrica de América Latina: Retos y oportunidades,» *Aqua-LAC*, vol. 4, nº 1, pp. 41-48, 2012.
- [26] G. Donoso, E. Blanco, W. Foster, G. Franco y J. Lira, «Seguridad hídrica y alimentaria en América Latina y España: El caso de Chile,» Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 2012.
- [27] M. Ovalle, «Estimación de la huella hídrica de cultivos con potencial bioenergético en la provincia de Limarí, región de Coquimbo, Chile,» Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2012.
- [28] A. Hernández y J. Picón, «Huella hídrica en tierras secas: el caso del turismo del sol y playa en Guanacaste (Costa Rica),» *Revista de ciencias ambientales*, vol. 45, nº 1, 2013.
- [29] J. Zorrilla Ríos y G. Moreno Llamas, «Algunos comentarios sobre la huella hídrica de la producción de carne de bovino en México,» Universidad de Guadalajara, Guadalajara.
- [30] F. Arreguín Cortes, M. López Perez, H. Marengo Mogollón y C. Tejeda González, «Agua virtual en México,» *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. 22, nº 4, 2013.
- [31] J. Chuquimarca Carrión, «La huella hídrica del bambú gigante (*Dendrocalamus asper*) como indicador de sustentabilidad de la construcción,» Universidad San Francisco de Quito, Quito, 2016.
- [32] C. Pozo García, «Aplicación del indicador huella hídrica para el estudio de la sustentabilidad del turismo en la localidad de Baños de Agua Santa, Tungurahua, Ecuador,» 2014.
- [33] W. Muñoz Quintero, «Cálculo de la huella hídrica en fincas ganaderas ubicadas en la cuenca del río La Villa, Panamá,» Turrialba, Costa Rica, Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza, 2014.
- [34] Fondo mundial para la naturaleza (WWF), «Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica,» WWF Colombia, 2012.
- [35] E. Builes y C. Tobón, «Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del río Porce,» Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2013.
- [36] J. González Valencia et al, «Aproximación a la estimación de la Huella Hídrica de la minería del oro en el Municipio de Segovia, Antioquia (Colombia),» *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, nº 7, pp. 27-44, 2012.

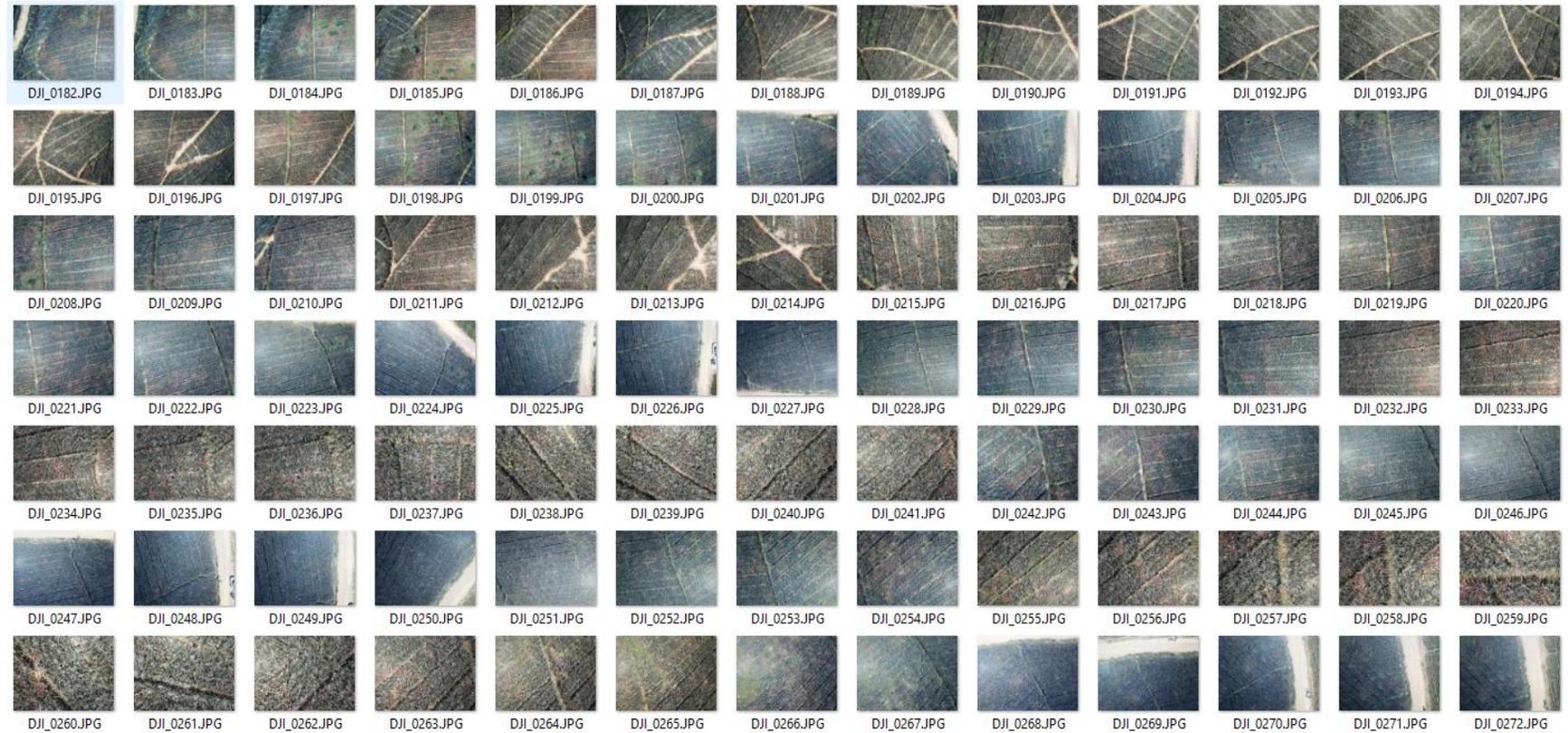
- [37] IDEAM, «Estudio Nacional del Agua,» Bogotá, 2014.
- [38] M. Pérez, M. Peña y P. Alvarez, «Agro-industria cañera y uso del agua: Análisis crítico en el contexto de la política de agrocombustibles en Colombia,» *Campinas*, vol. XIV, nº 2, pp. 153-178, 2011.
- [39] CORPOICA-CDMB, «Estudio semidetallado de suelos de la Subcuenca de la Quebrada La Angula,» Bucaramanga, 1997.
- [40] Fundación Wikimedia Inc, «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Santander_\(Colombia\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Santander_(Colombia)). [Último acceso: 20 09 2018].
- [41] I. Fundación Wikipedia, «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/San_Juan_de_Gir%C3%B3n. [Último acceso: 20 09 2018].
- [42] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural del Municipio de Girón, «Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA),» Girón, 2005-2016.
- [43] FAO, «Evaporación de cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos,» 2006. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>. [Último acceso: 10 Junio 2018].
- [44] S. Salinas-Rodríguez, Guía rápida para la determinación de caudales ecológicos, México: Alianza WWF- Fundación Gonzalo Ríos Arronte, I.A.P., 2011.
- [45] M. M. Mekonnen y A. Y. Hoekstra, «The green , Blue and Grey Water Footprint of Crops and Derived Crops Products Value of Water Research Report Series No.47,» UNESCO-IHE, Delft, 2010a.
- [46] M. M. Mekonnen y A. Y. Hoekstra, «The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products,» *Hidrology and Earth System Sciences*, nº 15, p. 1577–1600, 2011.
- [47] M. E. Bolaños, Determinación de la huella hídrica y comercio de agua virtual de los principales productos de Honduras, Zamorano, Honduras, 2011.
- [48] FAO, «Land and Water. Food and Agriculture Organization of the United Nations,» [En línea]. Available: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/pineapple/en/>. [Último acceso: 15 Marzo 2018].
- [49] CDMB, «CDMB analiza afectación en la quebrada La Angula en el municipio de Lebrija: CDMB,» [En línea]. Available: <http://www.cdmb.gov.co/web/ciudadano/prensa/noticias/item/3747-cdmb-analiza-afectacion-en-la-quebrada-la-angula-en-el-municipio-de-lebrija>. [Último acceso: 1 Septiembre 2018].

- [50] J. Castro, «Descripción del modelo de simulación hidrológica TETIS,» Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda .
- [51] J. Castro, «Descripción del modelo de simulación hidrológica TETIS,» Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda .
- [52] Instituto de investigación de ingeniería del agua y medio ambiente, 9 Septiembre 2016. [En línea]. Available: http://www.iiama.upv.es/iiama/src/ficha_software.php?id=9.. [Último acceso: 20 Mayo 2017].
- [53] GIMHA, «Grupo de Investigación de modelación hidrológica y ambiental,» 2015. [En línea]. Available: <http://lluvia.dihma.upv.es>. [Último acceso: 15 Mayo 2017].
- [54] V. Klemeš, «A hydrological perspective,» *Journal of Hydrology*, vol. 100, nº 1988, pp. 3-28.
- [55] J. Refsgaars y J. Knudsen, «J. Refsgaars y J. Knudsen, «Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models,» *Water Resources Research*, vol. 32, nº 7, pp. 2189-2202, 1996.
- [56] S. Senarath et al, «On the calibration and verification of two-dimensional distribute, Hortonian, continuous watershed models,» *Water Resources Research*, vol. 36, nº 6, pp. 1495-1510, 2000.
- [57] J. Andersen et al, «Distributed hydrological modelling of the Senegal river basin - model construction and validation,» *Journal of Hidrology*, vol. 247, pp. 200-214, 2001.
- [58] Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, « Modelo TETIS. Manual del usuario y modelo conceptual,» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2012.

A. Anexo: Tabla de Valores de referencia para régimen de caudal ecológico para la zona alta de la Quebrada La Angula

Caudal Medio Mensual = CMM		Escurrimiento Medio Anual = EMA = 0,26								Qecol elegido
Valores de referencia para régimen de caudal ecológico en corrientes permanentes										
Mes	CMM	DEFICIENTE		MODERADO		BUENO		MUY BUENO		
		5%	14%	15%	24%	25%	39%	40%	80%	
ENE	0,29	0,01	0,04	0,04	0,07	0,07	0,11	0,12	0,23	0,04
FEB	0,34	0,02	0,05	0,05	0,08	0,08	0,13	0,13	0,27	0,05
MAR	0,23	0,01	0,03	0,03	0,06	0,06	0,09	0,09	0,18	0,03
ABR	0,24	0,01	0,03	0,04	0,06	0,06	0,09	0,10	0,19	0,04
MAY	0,26	0,01	0,04	0,04	0,06	0,07	0,10	0,10	0,21	0,04
JUN	0,23	0,01	0,03	0,03	0,06	0,06	0,09	0,09	0,18	0,03
JUL	0,27	0,01	0,04	0,04	0,06	0,07	0,10	0,11	0,21	0,04
AGO	0,16	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,06	0,06	0,12	0,02
SEP	0,18	0,01	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07	0,15	0,03
OCT	0,20	0,01	0,03	0,03	0,05	0,05	0,08	0,08	0,16	0,03
NOV	0,39	0,02	0,05	0,06	0,09	0,10	0,15	0,16	0,31	0,06
DIC	0,40	0,02	0,06	0,06	0,10	0,10	0,16	0,16	0,32	0,06
Promedio	0,27	0,01	0,04	0,04	0,06	0,07	0,10	0,11	0,21	0,04

B. Anexo: Fotografías aéreas tomadas con DRON (principalmente a cultivos de piña)



C. Anexo: Fotografías aéreas tomadas con DRON (principalmente a cultivos de lima Tahiti)



D. Anexo: Fotografías aéreas tomadas con DRON (Pajonales y zonas no productivas)



F. Anexo: Módulo Clima/ETo del software Cropwat

ETo Penman-Monteith Mensual - G:\Clase_1\Sesión 1\Clima_piña_2007.PEM

País Estación

Altitud m. Latitud °N Longitud °E

Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/día	horas	MJ/m ² /día	mm/día
Enero	18.3	28.7	81	259	8.1	19.9	4.15
Febrero	17.0	29.8	75	259	7.1	19.5	4.56
Marzo	18.0	29.2	85	259	8.6	22.7	4.57
Abril	17.8	27.0	87	259	8.0	21.8	4.12
Mayo	17.8	28.0	88	259	7.8	20.8	4.03
Junio	17.2	26.8	86	259	7.8	20.3	3.88
Julio	17.1	29.2	83	259	8.4	21.4	4.40
Agosto	17.0	28.4	86	259	8.2	21.7	4.26
Septiembre	17.0	29.8	84	259	9.7	24.3	4.87
Octubre	17.3	27.6	89	259	8.6	21.9	4.06
Noviembre	17.0	27.0	88	259	7.6	19.4	3.62
Diciembre	17.0	27.8	87	259	7.9	19.2	3.66
Promedio	17.4	28.3	85	259	8.2	21.1	4.18

G. Anexo: Requerimiento de agua del cultivo

Requerimiento de Agua del Cultivo

Estación ETo: PALONEGRO Cultivo: piña

Est. de lluvia: PALONEGRO Fecha de siembra: 14/01

Mes	Decada	Etapa	Kc coef	ETc mm/día	ETc mm/dec	Prec. efec mm/dec	Req.Riego mm/dec
Ene	2	Inic	0.30	1.27	8.9	7.7	1.6
Ene	3	Inic	0.30	1.30	14.3	10.5	3.9
Feb	1	Inic	0.30	1.34	13.4	7.5	5.9
Feb	2	Inic	0.30	1.38	13.8	6.2	7.5
Feb	3	Inic	0.30	1.38	11.0	14.4	0.0
Mar	1	Inic	0.30	1.37	13.7	27.2	0.0
Mar	2	Des	0.30	1.37	13.7	36.1	0.0
Mar	3	Des	0.32	1.42	15.6	28.8	0.0
Abr	1	Des	0.32	1.37	13.7	16.1	0.0
Abr	2	Des	0.32	1.32	13.2	8.8	4.5
Abr	3	Des	0.32	1.31	13.1	17.6	0.0
May	1	Des	0.32	1.30	13.0	33.0	0.0
May	2	Des	0.32	1.29	12.9	42.4	0.0
May	3	Des	0.32	1.28	14.0	30.1	0.0
Jun	1	Des	0.32	1.26	12.6	12.5	0.1
Jun	2	Des	0.32	1.25	12.5	1.1	11.4
Jun	3	Des	0.32	1.30	13.0	2.7	10.3
Jul	1	Des	0.32	1.36	13.6	4.4	9.2
Jul	2	Med	0.32	1.41	14.1	3.9	10.2
Jul	3	Med	0.32	1.39	15.3	9.6	5.7
Ago	1	Med	0.32	1.37	13.7	17.9	0.0
Ago	2	Med	0.32	1.35	13.5	23.9	0.0
Ago	3	Med	0.32	1.41	15.5	20.9	0.0
Sep	1	Med	0.32	1.49	14.9	14.8	0.1
Sep	2	Med	0.32	1.56	15.6	11.8	3.8
Sep	3	Med	0.31	1.47	14.7	17.9	0.0
Oct	1	Med	0.31	1.36	13.6	28.5	0.0
Oct	2	Med	0.31	1.27	12.7	35.4	0.0
Oct	3	Med	0.31	1.22	13.4	26.2	0.0
Nov	1	Med	0.31	1.17	11.7	13.7	0.0

H. Anexo: Mapa de suelos cuenca de la Quebrada La Angula

