

**Evaluación de la Huella Hídrica Agropecuaria de la Microcuenca Río Suratá Bajo en el
Municipio de Bucaramanga**

Sergio Andrés Bohórquez Pinilla, Andrés Felipe Vanegas Rincón

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

Carlos Fernando Arenas Jiménez

Magíster en Ingeniería Civil

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2023

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres Orlando Vanegas y Rubiela Rincón, así como a mis tías Martha Vanegas y Luz Vanegas por su incondicional amor y apoyo durante todo mi proceso académico. Los principios y valores que me han inculcado me han permitido llegar hasta este punto, gracias. Dedico también a mi amigo Sergio, sin su trabajo y esfuerzo no lo hubiésemos conseguido.

Andrés Vanegas.

Dedicatoria

A mis padres quienes siempre creyeron en mí y me motivaron a ser cada día mejor, a mi novia que con su apoyo nunca permitió que me rindiera.

A Victor Hugo Pinilla-Coxe por su cariño y apoyo incondicional. Por estar ahí para mí y mostrarme que tengo lo que se requiere para triunfar y lograr todo lo que me proponga en la vida.

A Liliana Suárez Mateus en agradecimiento a su apoyo durante todo este largo proceso.

A mi amigo y compañero quien nunca abandonó el barco. “Ninguno de nosotros es tan listo como todos nosotros” - Ken Blanchard.

Sabiendo que jamás habrá manera de agradecer en esta vida de lucha y superación constante, deseo expresarles que mis esfuerzos y logros son también suyos. Con cariño, admiración y respeto

Sergio Bohórquez

Agradecimientos

En agradecimiento a nuestro docente, director y amigo Carlos Fernando Arenas por su incondicional apoyo durante todo este largo proceso. A la universidad que durante varios años fue nuestra casa de estudios y a los docentes que hicieron parte de este proceso de formación profesional. A la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga y al Instituto Colombiano Agropecuario quienes nos facilitaron este proceso colocando a nuestra disposición importante información, con el ánimo de contribuir a nuestra labor de investigación.

Contenido

Introducción	16
1.1 Planteamiento del problema	18
1.2 Justificación.....	19
1.3 Objetivos	21
1.3.1 Objetivo general.....	21
1.3.2 Objetivos específicos	21
2. Marco referencial.....	22
2.1 Marco contextual.....	22
2.1.1 Recurso hídrico en Colombia.....	22
2.1.2 Variabilidad climática en Colombia	23
2.1.3 Descripción de la zona de estudio.....	26
2.1.3.1 Clima.	27
2.1.3.2. Suelos.	28
2.1.3.3 Vegetación.....	28
2.2 Marco teórico	29
2.2.1 Agua virtual	29
2.2.2 Huella hídrica.....	30
2.2.3 Huella hídrica azul.	30
2.2.4 Huella hídrica verde.	31
2.2.5 Huella hídrica gris.....	32
2.2.6 Huella hídrica total.....	32
2.2.7 Huella hídrica en una cuenca hidrográfica.....	33

2.2.8	Análisis de sostenibilidad	34
3.	Metodología.....	35
3.1	Delimitación del área de estudio	35
3.2	Estaciones hidrometeorológicas.....	35
3.3	Variabilidad climática	37
3.4	Modelo hidrológico.....	39
3.4.1	Parámetros morfométricos.....	40
3.4.2	Número de curva.....	41
3.4.2.1	Cálculo del número de curva.....	42
3.4.3	Otros componentes físicos	44
3.4.4	Componentes del ciclo hidrológico	45
3.4.5	Especificaciones de control.....	46
3.5	Caudal ecológico	47
3.5.1	Importancia ecológica de la cuenca	47
3.5.2	Presión de uso de la cuenca	47
3.5.3	Matriz de objetivos ambientales y cálculo del caudal ecológico.....	48
3.6	Huella hídrica agrícola	49
3.6.1	Requerimientos de agua verde y azul de los cultivos (CWUverde y CWUazul) ...	50
3.6.2	Agua virtual, huella hídrica azul y verde	51
3.6.3	Agua virtual y huella hídrica gris agrícola.....	51
3.7	Huella hídrica pecuaria.....	52
3.7.1	Huella hídrica del alimento	53
3.7.2	Huella hídrica del consumo	54

3.7.3	Huella hídrica gris del sector pecuario.....	55
3.8	Análisis de sostenibilidad ambiental	56
3.8.1	Análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul.	57
3.8.2	Análisis ambiental de la huella hídrica verde	57
3.8.3	Análisis ambiental de la huella hídrica gris	58
4.	Resultados.....	58
4.1	Área de estudio	59
4.2	Variabilidad climática	60
4.3	Modelo hidrológico	63
4.3.1	Mapas	63
4.3.2	Componentes del modelo.....	68
4.3.3	Resultados de la modelación.....	70
4.4	Caudales ecológicos	73
4.5	Huella hídrica agrícola	75
4.5.1	Huella hídrica agrícola por tonelada	80
4.5.2	Huella hídrica agrícola mensual.....	82
4.6	Huella hídrica pecuaria.....	85
4.6.1	Huella hídrica pecuaria por tonelada	88
4.6.2	Huella hídrica pecuaria mensual.	90
4.7	Análisis de sostenibilidad.....	92
4.7.1	Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica verde	92
4.7.2	Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica azul	94
4.7.3	Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica gris.....	96

5. Discusión	98
6. Conclusiones.....	106
Referencias	108

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Oferta total por área hidrográfica.....</i>	23
Tabla 2. <i>Categorización de los valores de los indicadores hidroclimatológicos</i>	25
Tabla 3. <i>Cultivos presentes en el área de estudio.....</i>	29
Tabla 4. <i>Estaciones utilizadas en el estudio.</i>	36
Tabla 5. <i>Variables hidrometeorológicas.....</i>	37
Tabla 6. <i>Insumos necesarios para la elaboración del modelo meteorológico.</i>	40
Tabla 7. <i>Parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica.</i>	41
Tabla 8. <i>Grupos hidrológicos del suelo</i>	42
Tabla 9. <i>Componentes físicos relacionados a las pérdidas del modelo.</i>	44
Tabla 10. <i>Componentes relacionados al ciclo hidrológico en el modelo.....</i>	45
Tabla 11. <i>Componentes relacionados al ciclo hidrológico en el modelo.....</i>	49
Tabla 12. <i>Consumo de agua diario por cada subsector.</i>	55
Tabla 13. <i>Aporte de nitrógeno en heces de cada subsector.....</i>	56
Tabla 14. <i>Variabilidad climática.</i>	60
Tabla 15. <i>Parámetros morfométricos cuenca Suratá bajo en Bucaramanga.....</i>	68
Tabla 16. <i>Resumen de resultados modelación de caudales.</i>	72
Tabla 17. <i>Caudales ecológicos de los promedios mensuales.</i>	73
Tabla 18. <i>Comparación Huella Hídrica Agrícola Total.....</i>	75
Tabla 19. <i>Comparación Huella Hídrica Pecuaria Total.</i>	86
Tabla 20. <i>Comparación de los aportes de cada subsector a la Huella Hídrica Pecuaria Total.</i>	86
Tabla 21. <i>Comparación de las huellas hídricas virtuales pecuarias.....</i>	89
Tabla 22. <i>Comparación huella hídrica virtual, año húmedo (2010).</i>	100

Tabla 23. <i>Comparación huella hídrica virtual, año seco (2015)</i>	101
---	-----

Tabla 24. <i>Comparación huella hídrica virtual, año normal (2019)</i>	101
--	-----

Tabla 25. <i>Porcentaje de escasez máximo presentado para cada año</i>	105
--	-----

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Clasificación climática de Colombia, Caldas-Lang.</i>	24
Figura 2. <i>Distribución del índice de aridez por área hidrográfica.</i>	25
Figura 3. <i>Distribución del índice de regulación hídrica por área hidrográfica</i>	26
Figura 4. <i>Microcuenca río Suratá bajo.</i>	27
Figura 5. <i>Representación esquemática de los componentes de la huella hídrica.</i>	33
Figura 6. <i>Huella hídrica verde y azul en relación con el balance hídrico de una cuenca hidrográfica.</i>	34
Figura 7. <i>Reclasificación propuesta por Villegas, P.</i>	43
Figura 8. <i>Ejemplo de tabla con los valores de NC para cada tipo y uso de suelo.</i>	43
Figura 9. <i>Especificaciones de control para el año 2010.</i>	46
Figura 10. <i>Matriz de objetivos ambientales</i>	48
Figura 11. <i>Suratá bajo en el municipio de Bucaramanga.</i>	59
Figura 12. <i>Precipitaciones mensuales para cada uno de los años seleccionados.</i>	61
Figura 13. <i>Tendencia de temperatura para el año 2015 (año seco)</i>	62
Figura 14. <i>Tendencia de temperatura para el año 2010 (año húmedo)</i>	62
Figura 15. <i>Tendencia de temperatura para el año 2019 (año normal)</i>	63
Figura 16. <i>Modelo digital de elevaciones microcuenca Suratá bajo en Bucaramanga.</i>	64
Figura 17. <i>Tipos de suelo de la microcuenca Suratá bajo en Bucaramanga.</i>	64
Figura 18. <i>Coberturas y usos del suelo de la microcuenca Suratá bajo en Bucaramanga, año 2010</i>	65
Figura 19. <i>Coberturas y usos del suelo de la microcuenca Suratá bajo en Bucaramanga, años 2015-2019.</i>	66

Figura 20. <i>Número de curva de la microcuenca Suratá bajo en Bucaramanga, año 2010.</i>	67
Figura 21. <i>Número de curva de la microcuenca Suratá bajo en Bucaramanga, años 2015-2019.</i>	67
Figura 22. <i>Caudales observados en los diferentes años de variabilidad climática.</i>	69
Figura 23. <i>Precipitaciones promediadas, estaciones IDEAM y Matajira.</i>	69
Figura 24. <i>Esquemización del modelo del área de estudio.</i>	70
Figura 25. <i>Hidrograma obtenido, año 2010.</i>	71
Figura 26. <i>Hidrograma obtenido, año 2015.</i>	71
Figura 27. <i>Hidrograma obtenido, año 2019.</i>	72
Figura 28. <i>Caudal ecológico 60%, año 2010.</i>	74
Figura 29. <i>Caudal ecológico 60%, año 2015.</i>	74
Figura 30. <i>Caudal ecológico 60%, año 2019.</i>	75
Figura 31. <i>Aporte por cultivo a la HH agrícola total, año húmedo (2010).</i>	76
Figura 32. <i>Aporte por cultivo a la HH agrícola total, año normal (2019).</i>	77
Figura 33. <i>Aporte por cultivo a la HH agrícola total, año seco (2015).</i>	77
Figura 34. <i>Huella hídrica agrícola, año húmedo (2010).</i>	79
Figura 35. <i>Huella hídrica agrícola, año normal (2019).</i>	79
Figura 36. <i>Huella hídrica agrícola, año seco (2015).</i>	80
Figura 37. <i>Huella hídrica agrícola por tonelada, año húmedo (2010).</i>	81
Figura 38. <i>Huella hídrica agrícola por tonelada, año normal (2019).</i>	81
Figura 39. <i>Huella hídrica agrícola por tonelada, año seco (2015).</i>	82
Figura 40. <i>Huella hídrica agrícola mensual, año húmedo (2010).</i>	83
Figura 41. <i>Huella hídrica agrícola mensual, año seco (2015).</i>	83

Figura 42. <i>Huella hídrica agrícola mensual, año normal (2019).</i>	84
Figura 43. <i>Huella hídrica agrícola gris a escala mensual, todos los años.</i>	85
Figura 44. <i>Huella hídrica pecuaria por subsector, año húmedo (2010).</i>	87
Figura 45. <i>Huella hídrica pecuaria por subsector, año normal (2019).</i>	88
Figura 46. <i>Huella hídrica pecuaria por subsector, año seco (2015).</i>	88
Figura 47. <i>Huella hídrica pecuaria a escala mensual, año húmedo (2010).</i>	90
Figura 48. <i>Huella hídrica pecuaria a escala mensual, año normal (2019).</i>	91
Figura 49. <i>Huella hídrica pecuaria a escala mensual, año seco (2015).</i>	91
Figura 50. <i>Huella hídrica verde vs oferta de agua verde, año húmedo (2010).</i>	93
Figura 51. <i>Huella hídrica verde vs oferta de agua verde, año normal (2019).</i>	93
Figura 52. <i>Huella hídrica verde vs oferta de agua verde, año seco (2015).</i>	94
Figura 53. <i>Huella hídrica azul vs oferta de agua neta, año húmedo (2010).</i>	95
Figura 54. <i>Huella hídrica azul vs oferta de agua neta, año normal (2019).</i>	95
Figura 55. <i>Huella hídrica azul vs oferta de agua neta, año seco (2015).</i>	96
Figura 56. <i>Huella hídrica gris vs oferta natural regulada, año húmedo (2010).</i>	97
Figura 57. <i>Huella hídrica gris vs oferta natural regulada, año normal (2019).</i>	97
Figura 58. <i>Huella hídrica gris vs oferta natural regulada, año seco (2015).</i>	98
Figura 59. <i>Comparación gráfica de los resultados de HH agrícola virtual, con Builes (2013) y Mekonnen y Hoekstra (2011), año húmedo (2010).</i>	102
Figura 60. <i>Comparación gráfica de los resultados de HH agrícola virtual, con Builes (2013) y Mekonnen y Hoekstra (2011), año seco (2015).</i>	102
Figura 61. <i>Comparación gráfica de los resultados de HH agrícola virtual, con Builes (2013) y Mekonnen y Hoekstra (2011), año normal (2019).</i>	103

Resumen

El presente estudio tiene por objetivo cuantificar la huella hídrica total de las actividades agrícolas y pecuarias presentes en una porción de la microcuenca río Surata Bajo siguiendo principalmente los lineamientos metodológicos planteados para el cálculo de la huella hídrica. Se plantearon 3 escenarios representativos de precipitación denominados como año húmedo, normal y seco, y con base en estos se calcularon las diferentes huellas hídricas, tanto agrícola como pecuaria. Finalmente, se evaluó la sostenibilidad ambiental del indicador de huella hídrica, observando que la cuenca tiene la capacidad de cubrir las necesidades de las actividades agropecuarias, estableciendo así, información pertinente para la toma de decisiones en cuanto a la gestión del recurso hídrico. Los resultados obtenidos muestran que la Huella Hídrica Agrícola fue de 993.765 m^3 en el año húmedo, de $2'381.692 \text{ m}^3$ en el año normal y de $1'428.930 \text{ m}^3$ en el año seco. En cuanto a la Huella Hídrica Pecuaria, esta fue de $3'398.961 \text{ m}^3$ para el año húmedo, de $2'363.593 \text{ m}^3$ para el año normal y de $2'094.504 \text{ m}^3$ para el año seco. En los años húmedo y normal, el componente verde fue el que más contribuyó a la generación de la huella hídrica agrícola, representando el 76.5% y 70.3% respectivamente. Sin embargo, en el año seco, el componente que más contribuyó fue el azul, con un 47.1%. Asimismo, el componente verde fue el mayor contribuyente en la Huella Hídrica pecuaria, destacando que el subsector bovino fue el mayor contribuyente a la huella hídrica pecuaria total con un promedio del 84% para los tres años.

Palabras Clave: Huella hídrica agropecuaria, Recurso hídrico, Microcuenca Suratá Bajo, Bucaramanga.

Abstract

The objective of this study is to quantify the total water footprint of agricultural and livestock activities present in a portion of the Surata Bajo river micro-watershed, mainly following the methodological guidelines for the calculation of the water footprint. Three representative precipitation scenarios were proposed, called wet, normal, and dry year, and based on these, the different agricultural and livestock water footprints were calculated. Finally, the environmental sustainability of the water footprint indicator was evaluated, noting that the basin has the capacity to cover the needs of agricultural and livestock activities, thus establishing relevant information for decision making regarding water resource management. The results obtained show that the Agricultural Water Footprint was 993,765 m³ in the wet year, 2'381,692 m³ in the normal year and 1'428,930 m³ in the dry year. The Livestock Water Footprint was 3'398,961 m³ in the wet year, 2'363,593 m³ in the normal year and 2'094,504 m³ in the dry year. In the wet and normal years, the green component contributed the most to the generation of the agricultural water footprint, representing 76.5% and 70.3% respectively. However, in the dry year, the component that contributed the most was blue, with 47.1%. Likewise, the green component was the largest contributor to the livestock water footprint, highlighting that the cattle subsector was the largest contributor to the total livestock water footprint with an average of 84% for the three years.

Keywords: Agricultural water footprint, Water resources, Suratá Bajo micro-watershed, Bucaramanga.

Introducción

Durante los últimos años la preocupación por la preservación de los recursos ha ido en constante aumento, las sociedades cada vez son más conscientes sobre la importancia de cuidar su entorno y lo que allí habita, evitando el desperdicio sin sentido y sobre todo generar contaminación. Dentro de los recursos más importantes y sobre los cuales hay más preocupación, se encuentra el recurso hídrico, este se constituye en uno de los recursos naturales renovables más importantes para la raza humana puesto que es necesario para nuestra supervivencia y desarrollo. Con el fin de garantizar la oferta del recurso hídrico para las generaciones venideras se han realizado múltiples estudios, creando una gran variedad de metodologías y propuesto diversas acciones para lograrlo. Está claro que, para tomar decisiones y actuar de forma acertada frente a cualquier problema, es necesario primero conocerlo, por lo tanto, el uso de indicadores ha permitido observar y medir el estado del recurso hídrico en cuanto a cantidad y calidad.

En este sentido, el concepto de huella hídrica (HH) introducido por Hoekstra en el año 2003 y posteriormente desarrollado por Hoekstra y Chapagain para el año 2008, surge como respuesta a la necesidad de promover la correcta gestión del recurso hídrico a nivel mundial. La HH de un producto es, en términos generales, el volumen total de agua dulce usado para producir dicho producto [2], y se divide en tres componentes: verde, azul y gris. Este concepto puede ser implementado tanto a productos como también a procesos e, incluso, áreas geográficamente delimitadas como lo es el caso de las cuencas hidrográficas, estas últimas siendo de gran relevancia pues dentro de estas se realiza la planeación y la gestión de los recursos naturales [3].

En la microcuenca del Río Surata Bajo se desarrollan diversas actividades humanas, que demandan agua y generan impactos que contribuyen al deterioro gradual del recurso hídrico. Una de las principales actividades económicas de la región es el desarrollo agrícola y pecuario, el cual,

en el contexto colombiano es el sector que mayor cantidad de agua demanda [4]. De acuerdo con lo anterior, se propone el concepto de huella hídrica como herramienta idónea para medir el uso del agua por parte de dichas actividades, pues, la evaluación de este indicador permite comprender de qué manera afectan las actividades humanas en los ciclos naturales del agua y a su vez, constituye una fuente de información para la gestión integral del recurso hídrico que, sumado al análisis de sostenibilidad hídrica permiten obtener todo un panorama del estado del recurso hídrico en una cuenca hidrográfica [1], [3] . Por lo tanto, en este proyecto de investigación se determinó la huella hídrica de las actividades agropecuarias en 3 años que representen la variabilidad climática (húmedo, normal y seco) y se evaluó la sostenibilidad hídrica de este indicador en el área de la microcuenca del río Suratá Bajo, ubicada en el municipio de Bucaramanga.

1. Evaluación de la Huella Hídrica Agropecuaria de la Microcuenca Río Suratá Bajo en el Municipio de Bucaramanga.

1.1 Planteamiento del problema

El agua es el recurso más importante para los seres vivos, pues además de intervenir en los procesos metabólicos de los organismos en los seres humanos, cubre desde las necesidades más básicas hasta las más complejas en cualquier proceso productivo. En Colombia, el Estudio Nacional del Agua 2018 ENA, llevado a cabo por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), determina que las actividades agropecuarias representan la mayor parte de la demanda hídrica del país, resaltando que en el área hidrográfica Magdalena-Cauca, dentro de la que está ubicado el departamento de Santander, el sector agropecuario representa el 50.7% de la demanda del recurso [4].

Por otra parte, se menciona que 50 de los 87 municipios en Santander presentan riesgo de desabastecimiento hídrico en temporadas secas, entre ellos los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta y Lebrija. Según Diego Arévalo en [5]. Esto se debe principalmente a que dichos municipios solo se abastecen de la cuenca del Alto Lebrija, la cual, además de cubrir una gran población (1.2 millones de habitantes, aproximadamente), posee una única fuente de agua, concentrada en el Páramo de Santurbán. Teniendo en cuenta que, de esta cuenca principal, hace parte la Subcuenca del Río Suratá, como fuente de principal abastecimiento del municipio de Bucaramanga.

Por otra parte, la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga menciona que, entre los años 2010 y 2015 se registraron caudales máximo promedio entre 500 y 700 L/s [6]. Sin embargo, debido al patrón climático denominado El Niño-Oscilación del Sur (2014-2016), en septiembre del 2015 se observó el caudal más bajo registrado con 420 L/s.

En Colombia, las mediciones de uso del agua se han realizado tradicionalmente sobre la extracción de agua, y aunque permiten medir el agua potable utilizada directamente por los sectores usuarios, no permiten medir la totalidad de las pérdidas del recurso, pues no consideran el uso indirecto. La huella hídrica, por el contrario, aborda los usos directos e indirectos del agua, razón por la cual, se considera un indicador integral de la apropiación del recurso hídrico. Cabe resaltar que el ENA 2018 [4], incluye la determinación de la huella hídrica; sin embargo, es calculada de forma general, por ende, no es posible observar las particularidades e impactos de las diferentes entidades territoriales del país.

Teniendo en cuenta que el sector agropecuario corresponde a una de las principales actividades económicas de Bucaramanga, y que a su vez es el sector que presenta mayor demanda hídrica a nivel nacional, se propone realizar el cálculo de la huella hídrica agropecuaria de la microcuenca Suratá Bajo en el municipio de Bucaramanga, en diferentes escenarios de variabilidad climática, para posteriormente, analizar la sostenibilidad ambiental de dicho indicador. Por medio de este documento se pretende mostrar los impactos ambientales que genera una de las principales actividades económicas de la región y generar conciencia acerca de la importancia de la correcta gestión del agua.

1.2 Justificación

El agua es un recurso natural de gran importancia, es esencial para la existencia de vida y aunque sea categorizado como “renovable”, no es inagotable. Por lo tanto, la creciente demanda sobre este recurso y la necesidad de preservar el medio natural, hacen indispensable la eficiencia en la gestión y administración por parte de las autoridades ambientales. El uso de indicadores es fundamental para operar la generación, almacenamiento, análisis y flujo de la información, relevante y

pertinente en cuanto a temas ambientales; y pueden usarse en escalas internacionales, nacionales y locales [7].

La huella hídrica como indicador, establece una relación directa entre los sistemas hídricos y el consumo humano. Dicha relación puede determinar problemas como la escasez o la contaminación del agua, y a su vez, puede permitir la mejora de la gestión y de la producción del agua. Por otra parte, la capacidad que tiene la huella hídrica de medir el uso directo e indirecto del agua permite realizar un énfasis en la responsabilidad que tienen para efectuar una mejor gestión del recurso, tanto los agentes productores, como los consumidores.

El concepto de huella hídrica se puede aplicar a espacios delimitados geográficamente, de tal forma que diferentes autores han determinado la huella hídrica en cuencas hidrográficas. En Colombia, Builes [3] realizó la cuantificación de la HH de las actividades agropecuarias en la cuenca del río Porce. Allí identificó puntos críticos donde la HH no es ambientalmente sostenible, a partir de esto genera lineamientos de manejo para la gestión del recurso hídrico de la cuenca. Por otra parte, Arango [8] determinó la HH del sector doméstico en la cuenca del río Porce, complementando lo antes hecho por Builes. Este estudio obtiene relevancia puesto que tiene un enfoque hacia el sector doméstico. A nivel nacional, también se estimó la sostenibilidad de los cultivos de arroz y palma de aceite en la cuenca del río Guayuriba, Tovar et al. [9] estimaron dicha sostenibilidad por medio del indicador de HH para el periodo productivo del año 2013, identificando que en la cuenca analizada hubo un equilibrio, entre el consumo y la disponibilidad de agua verde, es decir, el indicador de HH verde fue sostenible, sin embargo, en cuanto al agua azul se evidenció que para los meses secos la demanda de recurso fue mayor que la oferta disponible.

En América Latina, Novoa [10] determinó también la HH agrícola de la cuenca del río Cachapoal en Chile, además, evaluó el efecto de la variabilidad climática estableciendo un año húmedo, uno normal y uno seco mediante el método de los percentiles. Por otra parte, Salmoral et al. [11] calcularon la HH de la cuenca del Guadalquivir en España, determinaron que el 80% del agua consumida provenía del sector agrícola. Asimismo, presentaron novedades con respecto a la metodología para el cálculo de la HH, pues consideraron la disponibilidad de agua teniendo en cuenta las dotaciones y el nivel de sequía respecto al nivel de agua en los embalses. Cabe resaltar que estimaron también la HH en cuerpos de agua subterráneos.

De acuerdo con lo anterior, es pertinente determinar la HH agropecuaria y evaluar la sostenibilidad ambiental de la microcuenca Suratá Bajo en Bucaramanga, pues permitiría conocer el impacto que genera uno de los principales sectores económicos de la región, así como uno de los más demandantes en cuanto a recursos hídricos, información relevante para las entidades encargadas de la gestión de los recursos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la sostenibilidad hídrica de las actividades agropecuarias en el área de la microcuenca río Suratá Bajo, ubicada en el municipio de Bucaramanga, mediante el indicador de consumo huella hídrica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar los años representativos de la variabilidad climática para tres regímenes de precipitación: húmedo, normal y seco, en la zona de estudio.

- Estimar la huella hídrica total de las actividades agropecuarias de la zona objeto de estudio para cada uno de los años que representan la variabilidad climática.
- Determinar la sostenibilidad ambiental del indicador huella hídrica aplicando la metodología planteada por *Water Footprint Network* en el área de la microcuenca río Surata Bajo, ubicada en el municipio de Bucaramanga.

2. Marco referencial

2.1 Marco contextual

Debido a que la huella hídrica puede aplicarse en cualquier espacio geográficamente delimitado es necesario contextualizar la región en la que se realiza este estudio.

2.1.1 Recurso hídrico en Colombia

“Por su localización geográfica, su orografía y una gran variedad de regímenes climáticos, Colombia se ubica entre los países con mayor riqueza en recursos hídricos en el mundo” [12].

Debido a que el país cuenta con tres cordilleras, dos océanos, múltiples ecosistemas de tipo paramo, bosques y una ubicación privilegiada, posee una oferta hídrica importante, la cual durante años lo ubicó como el sexto país con mayor disponibilidad del recurso hídrico a nivel mundial [13]. En cuanto a escurrimiento, a nivel mundial el valor de rendimiento promedio es de 10 l/s/km², para Latinoamérica se conocen valores promedio de 21 l/s/km² y para Colombia se cuenta con un valor promedio de 56,2 l/s/km² [4]. Sin embargo, aunque Colombia posea más de 5 veces el recurso hídrico promedio mundial, este no está distribuido de manera equitativa en todo el territorio [4]. En la Tabla 1 se presentan las áreas hidrográficas de Colombia, así como su oferta hídrica.

Tabla 1. *Oferta total por área hidrográfica*

<i>Área hidrográfica</i>	<i>Oferta Total (Mm³)</i>	<i>Caudal medio (m³/s)</i>
<i>Caribe</i>	200280	6350.8
<i>Magdalena Cauca</i>	273338	8667.4
<i>Orinoco</i>	533843	16928
<i>Amazonas</i>	728247	23092.5
<i>Pacífico</i>	287405	9113.5

Nota. Mm³: Millones de metros cúbicos. Tomado de Estudio Nacional del Agua 2018 [4]

2.1.2 Variabilidad climática en Colombia

El clima colombiano se encuentra relacionado con aspectos geográficos y atmosféricos tales como latitud, altitud, temperatura, precipitaciones, humedad, radiación solar directa. Estas condiciones permiten encontrar en Colombia todos los pisos térmicos con temperaturas que van desde 32° C en las regiones más bajas hasta temperaturas inferiores a los 0° C. En Colombia, la variación interanual del clima se debe al fenómeno del Niño y los cambios intra-anales se deben a la zona de convergencia intertropical, donde los vientos y cálidos y húmedos provenientes de las latitudes Norte y Sur chocan, así como de la influencia del chorro en el Chocó y de estructuras atmosféricas potencialmente generadoras de tiempo adverso, con ciclos de vida mayores a los de una simple tormenta denominados Sistemas Convectivos de Mesoescala [14].

En Colombia se han trabajado las clasificaciones climáticas de Caldas-Lang, W. Thornthwaite y W. Koppen. [15]. Por su practicidad y sencillez, la clasificación de Caldas-Lang ha sido una de las más utilizadas, además de que considera adecuadamente el factor térmico y el factor de humedad [15]. En la figura 1 es posible observar la clasificación climática de Colombia según la metodología de Caldas-Lang.

Figura 1. *Clasificación climática de Colombia, Caldas-Lang.*

Nota. Tomado y adaptado de Atlas Interactivo IDEAM, [16].

Por otra parte, el ENA menciona que la evaluación del sistema nacional natural se fundamenta en indicadores que permiten expresar numérica y cualitativamente las características del clima y la regulación de caudales, destacando que descartan la intervención antrópica [4]. Dichos indicadores son: el índice de aridez (IA) y el índice de regulación hídrica (IRH). El IA “califica cualitativamente las condiciones naturales de aridez, midiendo el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas de una región” [4], y el IRH es un indicador que “califica cualitativamente la capacidad de retención y regulación hídrica, por medio de la forma de la curva de duración de caudales medios diarios (CDC), para señalar las zonas que escurren de forma más estable y la ocurrencia de caudales extremos” [4]. En la Tabla 2

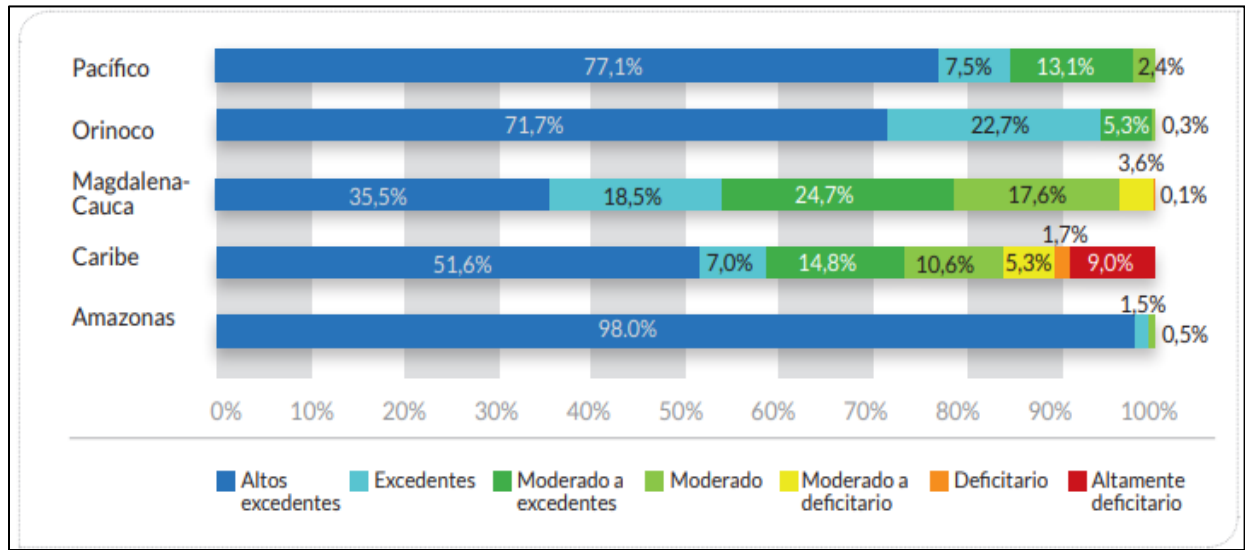
se categorizan los valores de los indicadores hidroclimatológicos, y en las Figuras 2 y 3 se presenta la distribución porcentual de dichos indicadores en las áreas hidrográficas del país.

Tabla 2. Categorización de los valores de los indicadores hidroclimatológicos

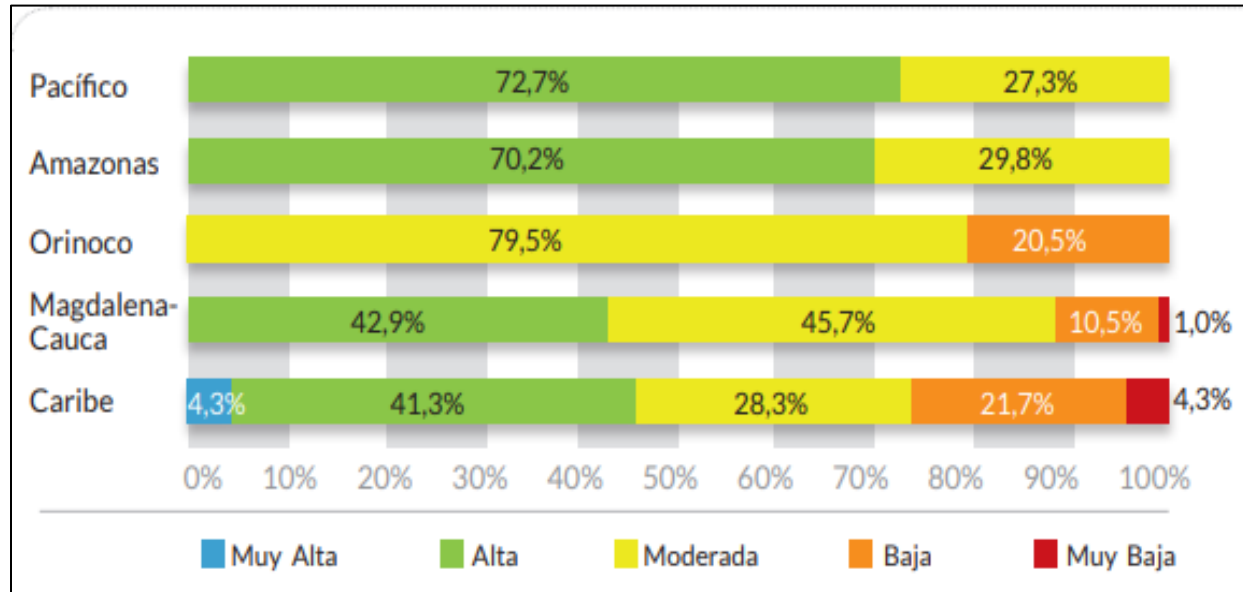
IA	Categoría	IRH	Categoría
<0.15	Altos Excedentes	IRH < 0.50	Muy Baja
0.15 - 0.19	Excedentes	0.50 < IRH ≤ 0.65	Baja
0.20 - 0.29	Moderado a excedentes	0.65 < IRH ≤ 0.75	Moderada
0.30 - 0.39	Moderado	0.75 < IRH ≤ 0.85	Alta
0.40 - 0.49	Moderado a deficitario	IRH > 0.85	Muy Alta
0.50 - 0.59	Deficitario		
> 0.60	Altamente deficitario		

Nota. Tomado y adaptado de Estudio Nacional del Agua 2018 [4]

Figura 2. Distribución del índice de aridez por área hidrográfica.



Nota. Tomado y adaptado de Estudio Nacional del Agua 2018 [4]

Figura 3. Distribución del índice de regulación hídrica por área hidrográfica

Nota. Tomado y adaptado de Estudio Nacional del Agua 2018 [4]

2.1.3 Descripción de la zona de estudio

La microcuenca del río Suratá bajo cuenta con 12438.12 Hectáreas, de las cuales, el 27.46% pertenece al municipio de Matanza, el 39.99% al municipio de Charta y el 32.57% pertenece a Bucaramanga [17]. La región se encuentra ubicada al Nor-Oriente de Colombia sobre la cordillera oriental dónde es posible encontrar afloramientos “de rocas sedimentarias, de bajo grado de metamorfismo, e ígneas, distribuidas entre el paleozoico, jurásico, cretácico, y cuaternario” [17]. En la Figura 4, se presenta la Subcuenca del Río Suratá, cabe resaltar que este río posee un curso paralelo a la Falla del río Suratá, la cual se extiende desde Bucaramanga hacia el noroeste.

Figura 4. Microcuenca río Suratá bajo.

Nota. Adaptado de Gestión del recurso hídrico en la jurisdicción de la CDMB [18].

2.1.3.1 Clima. El clima de la microcuenca se encuentra determinado por su ubicación geográfica y por aspectos atmosféricos, tales como precipitación, humedad y brillo solar. La temperatura de la región varía entre 18 °C hasta los 23.5 °C. Su humedad relativa es de 83% en su valor promedio, y presenta valores mínimos de 79% y máximos de 86%. Por otra parte, el brillo solar promedio que recibe esta región es de 180.6 horas sol/mes; sin embargo, en los meses de diciembre y enero presenta picos de 248.3 h sol/mes, mientras que en el mes de junio presenta sus valores mínimos con 145.5 h sol/mes. En términos de precipitación, la región presenta un comportamiento bimodal con dos temporadas de lluvia, las cuales ocurren durante abril-mayo y octubre-noviembre y dos periodos secos intercalados los cuales ocurren en los meses restantes [17]. Por otra parte, “el mes más lluvioso es octubre con 178 mm y 153.4 mm ,respectivamente; el más seco es enero con 26.2 mm y 20.3 mm, respectivamente” [17]. Cabe resaltar que al oeste

de la microcuenca se presentan los mayores indicadores de precipitación mientras que al noreste se registran los valores mínimos de precipitación en tiempos de sequía.

2.1.3.2. Suelos. En las zonas altas de la microcuenca río Surata bajo hay presencia de suelos profundos y moderadamente superficiales, poseen texturas medias, moderadamente gruesas y con saturación de aluminio en algunos sectores; su fertilidad es de baja a moderada. Por otra parte, en zonas medias y bajas de la microcuenca, los suelos son superficiales con texturas arcillosas, presentan buen drenaje y alta fertilidad natural. Finalmente, en la microcuenca se encuentran distribuidos suelos asociados a relieves quebrados, de poca profundidad y muy baja fertilidad [17].

De forma específica, según el Estudio general de suelos del departamento de Santander del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) [19], el área de estudio está conformada por consociaciones de suelos Lithic Ustorthents (LWA), Typic Ustorthents (MRB); asociaciones de suelos Typic Ustropepts - Ustoxic Dystropepts (LWB), Typic Ustropepts - Typic Ustorthents - Entic Haplustolls (LWC); grupos indiferenciados Typic Troporthents y Oxid Dystropepts (MQB), Typic Ustorthents y afloramientos rocosos (MWA) y por el complejo Mollic Ustifluvents – Typic Ustorthents (MRH).

2.1.3.3 Vegetación. En la microcuenca, se presentan usos en cultivos y tierras misceláneas, pastos naturales y mejorados, tierras agroforestales y rastrojos, entre otros [20]. En general, en la microcuenca y en la subcuenca río Surata, existe una tendencia alta hacia la explotación agropecuaria puesto que, esta microcuenca es considerada como despensa pecuaria y agrícola del

Área Metropolitana de Bucaramanga. En la Tabla 3 se presentan los cultivos registrados en el área de estudio por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) para los años de estudio.

Tabla 3. *Cultivos presentes en el área de estudio.*

Año 2010	Año 2015	Año 2019
Aguacate	Aguacate	Aguacate
Cacao	Cacao	Cacao
Café	Café	Café
Cítricos	Cítricos	Cítricos
Guanábana	Pitahaya	Guanábana
Maracuyá	Yuca	Pitahaya
Mora	Frijol	Plátano
Pitahaya	Habichuela	Uva
Yuca	Maíz	Yuca
Frijol	Tomate	Frijol
Habichuela		Habichuela
Hortalizas		Maíz
Maíz		Tomate
Tomate		

Nota. Adaptado de Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA).

2.2 Marco Teórico

Para la construcción y desarrollo de la investigación se contempla la aplicación de los siguientes temas:

2.2.1 Agua virtual

Según lo planteado por Hoekstra [21], existen dos enfoques de estudio en cuanto al concepto de agua virtual. El primer enfoque parte de la definición del volumen de agua que se utilizó realmente para producir el producto y dependerá de las condiciones de producción tales como, el lugar, el tiempo de producción y el uso eficiente del agua. Por otra parte, el segundo enfoque radica en la

cantidad de agua que habría sido requerida si el producto se hubiese elaborado en el lugar que es necesitado. Este enfoque permite comparar las cantidades de agua necesarias para la producción de un mismo producto en lugares diferentes, cabe resaltar que la estimación de agua virtual y la comparación se dificultan si uno de los lugares no puede producirlo, principalmente por sus condiciones climáticas.

2.2.2 Huella hídrica (HH)

La HH es un indicador que permite observar de qué manera se consume el agua dulce. A su vez, este indicador no sólo tiene en cuenta el consumo de agua directo de un consumidor o producto, sino también el consumo indirecto. El concepto de HH puede verse también como un indicador mundial de apropiación de los recursos de agua dulce. En términos generales, la HH muestra los volúmenes de consumo de agua por fuentes y volúmenes de contaminación por cada tipo de contaminante [1]. Asimismo, Hoekstra [1] señala que la HH puede ser calculada y a su vez, puede ser aplicada para procesos, productos y consumidores a nivel de país, región, ciudad e incluso cuenca o área geográfica, también señala que esta es medida en términos de volumen de agua empleada y/o contaminada. Igualmente, la HH relaciona el transporte, las cualidades climáticas, flujos naturales vinculados a zonas, variaciones espaciales y estacionales de suministro basados en balances hídricos, resaltando la importancia que tienen los cuerpos de agua dulces tanto superficiales como subterráneas, como componentes principales del medio ambiente y la sociedad.

2.2.3 Huella hídrica azul.

La huella hídrica azul (HHA) hace referencia al uso de agua azul, es decir, agua que se encuentra en la superficie y aguas subterráneas. El uso de agua azul hace referencia a la pérdida de la cantidad

disponible de agua en un área de captación y estas pérdidas pueden estar relacionadas a uno de los cuatro casos siguientes [1]:

- El agua se evapora.
- El agua se incorpora en un producto.
- El agua no vuelve a la misma zona de flujo, por ejemplo, es devuelta a otra zona de captación o al mar.
- El agua no vuelve en el mismo periodo, por ejemplo, si se retira en un periodo seco y se devuelve en un periodo de lluvia.

Cuando se habla de la evaporación, la cual generalmente es la más importante, se hace referencia a todas las pérdidas que sufre un cuerpo de agua o cuenca por este fenómeno. Generalmente, todo lo relacionado con la producción cuenta como evaporación, incluyendo el agua que se evapora durante el proceso de almacenamiento, transporte, tratamiento y la eliminación.

2.2.4 Huella hídrica verde.

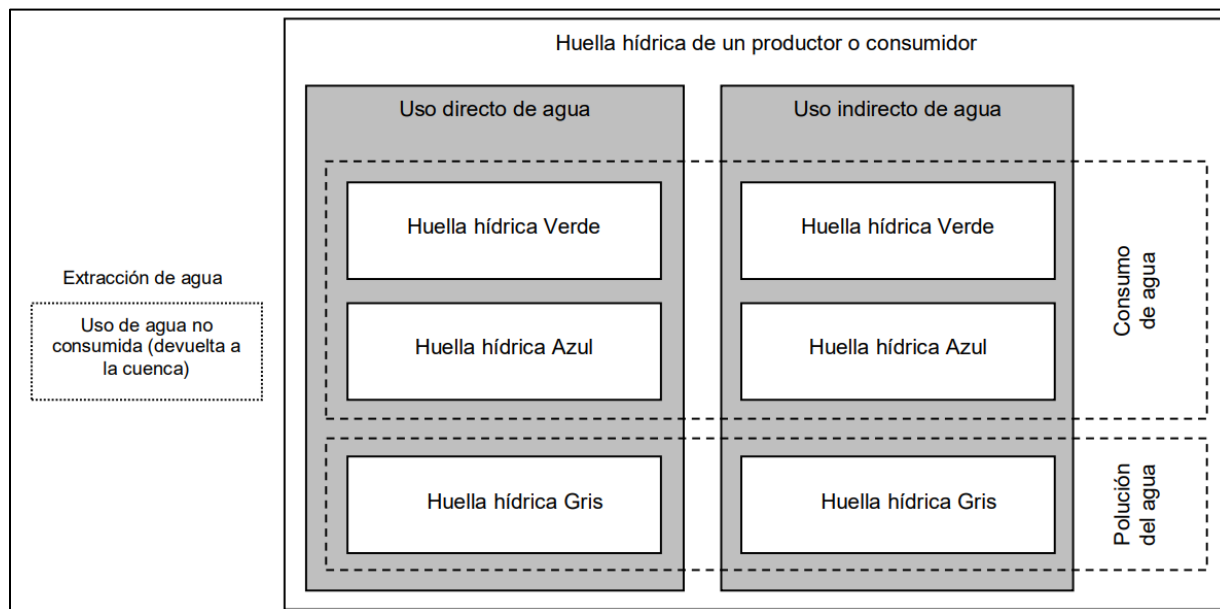
La huella hídrica verde (HHV) hace referencia al uso de agua verde. El termino agua verde hace referencia a la lluvia que se mantiene en el suelo o su superficie, sin sumarse a escorrentía o aguas subterráneas, es decir, que no se filtre o se incorpore río abajo, puesto que finalmente, esta es la parte de la precipitación que se evapora o que transpiran las plantas [1]. En pocas palabras es la cantidad de agua lluvia incorporada en la elaboración de un producto.

2.2.5 Huella hídrica gris.

La huella hídrica gris (HHG) hace referencia al “volumen de agua que se requiere para asimilar los residuos, cuantificada como el volumen de agua necesaria para diluir los contaminantes hasta el punto en que la calidad del agua ambiental se mantenga por encima de las normas de calidad del agua” [1]. El concepto de HHG permite abordar la contaminación del recurso desde la perspectiva de que la contaminación del agua puede ser expresada en términos del volumen de agua que se requiere para diluir los contaminantes, de tal manera que no afecten los niveles naturales de un afluente o cuerpo de agua. Cabe resaltar que la HHG es un indicador y no hace referencia a diluir contaminantes como tal, está claro que la prioridad radica en disminuir las emisiones.

2.2.6 Huella hídrica total

La huella hídrica total está compuesta por la HH verde, azul y gris, y puede aplicarse a un producto, grupo, colectivo o zona geográficamente delimitada. [1]. El concepto consiste en la sumatoria de los componentes y es mostrada como el volumen de agua por unidad de tiempo. Dependiendo del nivel de detalle que se quiera proporcionar, la HH total puede expresarse en días, meses o años. En la Figura 5 se presenta un esquema con los diferentes componentes de la huella hídrica.

Figura 5. Representación esquemática de los componentes de la huella hídrica.

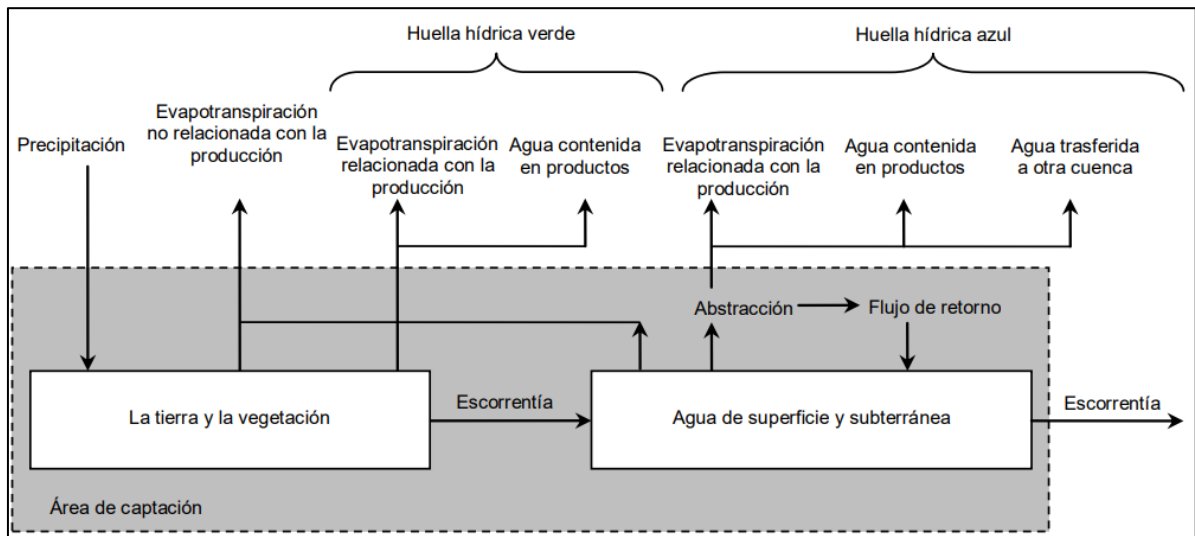
Nota. Tomado de “The Water Footprint Assessment Manual” [1]

2.2.7 Huella hídrica en una cuenca hidrográfica

La huella hídrica de un área delimitada geográficamente está definida como el consumo y contaminación total del agua dulce en dicha área. De acuerdo con lo anterior, resulta importante definir los límites de la zona en cuestión. Esta área puede ser una zona de captación, una cuenca hidrográfica, una ciudad, un departamento, un país o cualquier otro tipo de unidad territorial[1].

Cuando se habla de HH en una cuenca y sus componentes, la HHV tiene que ver con el consumo humano de los flujos de evaporación de la superficie de la tierra, generalmente para usos de cultivos [1]. La HHA tiene que ver con el uso que se dé al agua producto de captación de la esorrentía de la cuenca, la cual no vuelve a incorporarse al flujo natural. En la Figura 7 se presenta de manera grafica la relación entre la HHV y HHA con el balance hídrico de una cuenca.

Figura 6. Huella hídrica verde y azul en relación con el balance hídrico de una cuenca hidrográfica.



Nota. Adaptado de “The Water Footprint Assessment Manual” [1].

2.2.8 Análisis de sostenibilidad

La sostenibilidad hace referencia al equilibrio de una especie con los recursos de su entorno, partiendo del anterior concepto, es posible afirmar que la HH es un indicador con capacidad de evaluarla. El análisis de sostenibilidad de una cuenca hidrográfica consiste en comparar los valores estimados de la HHV o HHA con la disponibilidad de agua verde o azul, mientras que la HHG se compara con la capacidad disponible de asimilación de cargas contaminantes [1]. Cabe resaltar que, a diferencia de indicadores como el índice de estrés hídrico, índice de escasez de agua, índice de disponibilidad de agua y el índice de explotación de recursos hídricos, la HH es un indicador más completo, pues además de evaluar la existencia de déficit en los recursos disponibles, la HH cuantifica el uso consuntivo y no consuntivo del agua requerido para cualquier actividad y lo relaciona con las diferentes fuentes del recurso [10].

3. Metodología

En términos generales, la metodología de este proyecto puede ser dividida en 4 fases: la determinación de la variabilidad climática, el desarrollo del modelo hidrológico, el cálculo de la huella hídrica y el análisis de sostenibilidad. Sin embargo, a continuación, se presenta el procedimiento detallado.

3.1 Delimitación del área de estudio

En Colombia, la zonificación y codificación de cuencas hidrográficas es llevada a cabo por el IDEAM, el cual pertenece al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. De acuerdo con lo anterior, se opta por solicitar información a la principal autoridad ambiental a nivel regional, la CDMB. Entidad que proporcionó archivos en formato *shapefile* de la delimitación de la microcuenca Suratá Bajo (2319-01-03-05), y de los drenajes que conforman su red hídrica. Asimismo, para definir el área de estudio se recortó el área de la microcuenca en los límites del municipio de Bucaramanga.

3.2 Estaciones hidrometeorológicas

Para la determinación de la variabilidad climática, así como para el desarrollo del modelo hidrológico es necesario contar con información hidrometeorológica del área de estudio. Dicha información fue obtenida del IDEAM mediante su portal de consulta y descarga de datos hidrometeorológicos, los datos corresponden a un periodo de tiempo desde 1990 hasta 2020. En la Tabla 4 se presentan las estaciones utilizadas para llevar a cabo el estudio.

Tabla 4. Estaciones utilizadas en el estudio.

Municipio	Nombre	Tipo de Estación	Cantidad Probable	Altitud (msnm)	Latitud	Longitud
Matanza	Matajira	Pluviométrica	11324	996	7.2133333	-73.064722
Bucaramanga	La Floresta	Pluviográfica	11324	925	7.0902778	-73.123889
Bucaramanga	Bucaramanga IDEAM	Pluviográfica	8826	125	7.1283333	-73.118333
Bucaramanga	Majadas	Limnigráfica	6940	760	7.1602778	-73.093056
Bucaramanga	Captación Bosconia AMB	Limnimétrica	11324	--	--	--
Lebrija	Aeropuerto Palonegro	Sinóptica Ppal.	10835	1189	7.1214722	-73.184528

Las estaciones fueron escogidas teniendo en cuenta la cercanía al área de estudio y a la cantidad de datos que estas poseen. En este sentido, se escogen las estaciones Bucaramanga IDEAM y Matajira como estaciones pluviométricas principales, mientras que la estación La Floresta se utilizó para rellenar los datos faltantes de la estación Bucaramanga IDEAM mediante el método de razón Q. Se utilizan también las estaciones Majadas y Captación Bosconia AMB, como estaciones que miden el caudal para poder realizar la validación del modelo hidrológico. Asimismo, se utiliza la estación Aeropuerto Palonegro para obtener datos climatológicos, necesarios para el cálculo de la HH, cabe resaltar que la información se encontraba incompleta y fue requerido el uso de fuentes externas que cuenten con información climatológica del área de estudio (temperatura, horas de sol, velocidad del viento y humedad). En la Tabla 5 se presentan las variables hidrometeorológicas requeridas para la elaboración del proyecto.

Tabla 5. Variables hidrometeorológicas.

Variable	Método de Relleno de datos	Uso	Fuente
Precipitación	Razón Q	Variabilidad climática, modelo hidrológico, huella hídrica	IDEAM [22]
Caudales	No requerido	Modelo hidrológico	IDEAM [22], Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.
Temperatura	Interpolación Lineal	Huella hídrica	IDEAM [22], tutiempo.net [23]
Humedad	No requerido	Huella hídrica	IDEAM [22], tutiempo.net [23]
Velocidad del viento	No requerido	Huella hídrica	IDEAM [22], tutiempo.net [23]
Horas de sol	No requerido	Huella hídrica	IDEAM [22], sunrise.maplogs.com [24]

3.3 Variabilidad climática

La determinación de la variabilidad climática se basó en la sequía meteorológica, la cual se relaciona con la escasez de precipitación para determinados periodos de tiempo. Existen diferentes metodologías para determinar la sequía meteorológica, en este proyecto se utilizaron dos metodologías diferentes con el fin de abarcar la información desde dos perspectivas, la primera se basa en el promedio aritmético de los datos, y la segunda en el orden ascendente de los mismos.

De acuerdo con el Instituto Geológico y Minero de España (IGME), es posible determinar la variabilidad climática a partir de la media aritmética de una serie de datos, pues indican que una precipitación inferior al 15% y una superior al 15% de la media aritmética corresponderían a años secos y húmedos respectivamente, mientras que los años comprendidos entre dichos extremos se consideran normales. [25].

A su vez, se aplica el método de los cuartiles. Según sea la necesidad, estos pueden ser quintiles, deciles o percentiles. La técnica en general consiste en dividir la distribución de eventos de

precipitación en intervalos para cada 20% (quintil), 10% (decil) o 1% (percentil). Con el fin de buscar precisión a la hora de definir los umbrales se seleccionó el método de los percentiles, pues este realiza distribuciones del 1% en la serie de datos [26]. El método se basa en dividir en intervalos de 1% la distribución de ocurrencias pluviométricas, para un periodo de tiempo lo más extenso posible, [26].

En este caso, se utilizó un promedio de valores obtenidos a partir de dos estaciones (Bucaramanga IDEAM, Matajira) que cumplieran con criterios de selección establecidos como: cercanía al área de estudio, contar con series de datos amplias, además de contar con datos completos para la última década. Ahora bien, para su aplicación es necesario ordenar los datos, en este caso las precipitaciones totales anuales, de menor a mayor, y seguido a esto se calculan los índices para cada uno de los percentiles, la ecuación requerida es la siguiente:

$$I = \left(\frac{P}{100} \right) * N \quad (1)$$

Donde,

P = Percentil

N = Cantidad de datos de la serie

Debido a que los índices son requeridos en números enteros, se deben aproximar los índices a su entero superior. Finalmente, al estar los datos ordenados de menor a mayor en términos de precipitaciones, se escogen los años correspondientes a los índices 1, 50 y 100, puesto que, son estos los que representan tanto el extremo más bajo, el más alto y la media de los datos. En ese sentido, el índice No. 1 representa el año más seco pues es el escenario con menos precipitación, el índice No. 50 representa el año normal debido a que representa el punto medio de los datos de precipitación y finalmente, el índice No. 100 representa el año más húmedo, pues es en este escenario donde más precipitación hubo.

3.4 Modelo hidrológico

Un modelo hidrológico corresponde a una representación de forma física o matemática de un sistema real y complejo, denominado prototipo. Matemáticamente, el sistema real se representa mediante expresiones analíticas. Normalmente el sistema físico real representado es una cuenca hidrográfica, y junto a esta se modelan sus componentes del ciclo hidrológico [27]. En este caso, el modelo a utilizar es el Hidrograma Unitario del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de Estados Unidos, este modelo lluvia-escorrentía permite mostrar cómo la adición de una unidad de escorrentía afecta el caudal de un río en un tiempo específico. Es necesario mencionar que, para el desarrollo del modelo se utiliza el software HEC-HMS del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, pues este software además de ser de uso gratuito posee gran aceptación internacional.

Como se menciona previamente los modelos hidrológicos están conformados por dos aspectos:

- La cuenca hidrográfica y sus características físicas, como su delimitación, su morfometría, su número de curva, su porcentaje de impermeabilidad y su abstracción inicial;
- Los componentes del ciclo hidrológico modelados en ella, como la precipitación, la escorrentía y los caudales.

En la Tabla 6 se presentan los insumos requeridos para la elaboración del modelo, así como la fuente de dichos insumos.

Tabla 6. *Insumos necesarios para la elaboración del modelo meteorológico.*

Insumo	Formato	Fuente
Mapa delimitación microcuenca Suratá bajo	Shapefile	CDMB
Mapa de la red hídrica de la microcuenca Suratá bajo	Shapefile	CDMB
Mapa de distribución de características del suelo de Santander (Tipos de Suelos)	Shapefile	IGAC
Mapa de coberturas y usos del suelo	Shapefile	IGAC
Modelo Digital de Elevación (DEM)	GeoTIFF	EOSDIS-NASA
Precipitación: Estación IDEAM (23190830) y estación Matajira (23190340).	csv, xlsx	IDEAM
Caudales: Estación Majadas (23197700), Planta de Tratamiento de Bosconia.	csv, xlsx	IDEAM, AMB

A continuación, se describen los componentes del modelo hidrológico y cómo se integran los insumos en ellos.

3.4.1 Parámetros morfométricos

La morfometría de cuencas corresponde al estudio mediante valores numéricos de las características físicas de una cuenca hidrográfica, tales como, su red de drenajes, su forma y sus pendientes [28]. En la tabla 7 se presentan los parámetros y se mencionan los métodos mediante el cual se obtuvo cada uno.

Tabla 7. *Parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica.*

Parámetro	Método
Área	Se calcula con ArcMap a partir del formato SHP del área de estudio
Perímetro	Se calcula con ArcMap a partir del formato SHP del área de estudio
Longitud del cauce principal	Se calcula con ArcMap a partir del formato SHP de la red de drenajes.
Pendiente del cauce principal	Las variables de la siguiente ecuación se calculan con Arc Map a partir de un DEM del área de estudio. * $S = \Delta H / \Delta L$ Donde: S= Pendiente del cauce principal ΔH = Caída de alturas (metros) ΔL = Longitud del tramo en la que la caída ocurre (metros)
Tiempo de Concentración	Las variables de la siguiente ecuación son calculadas en los parámetros anteriores. * $T_c = 0.06628 * (L/S^{0.5})^{0.77}$ Donde: Tc= Tiempo de concentración (horas) L=Longitud del cauce principal (km) S= Pendiente del cauce principal (m/m)
Tiempo de Retardo	Las variables de la siguiente ecuación son calculadas en los parámetros anteriores. ** $T_{Lag} = 0.6 * T_c$ Donde: TLag=Tiempo de retardo (horas) Tc= Tiempo de concentración (horas)

Nota. * Las ecuaciones se obtuvieron de [20]. ** La ecuación se obtiene de [29].

3.4.2 Número de curva

El número de curva (NC), es un modelo empírico desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos y permite determinar la escorrentía superficial acumulada. Dicho modelo expresa la capacidad de generar escorrentía a través de un número hidrológico el cual posee valores de 0 a 100, valores cercanos a 0 representan alta permeabilidad del terreno, mientras

que valores cercanos a 100 representan condiciones de impermeabilidad [30]. El cálculo de NC se realiza mediante la metodología propuesta por Villegas, P. en [31].

3.4.2.1 Cálculo del número de curva. La metodología de Villegas en [31], se simplifica en los siguientes pasos:

1. Asignar a los diferentes tipos de suelo del área de estudio, su respectivo grupo hidrológico, teniendo en cuenta la Tabla 8.

Tabla 8. *Grupos hidrológicos del suelo*

Grupo Hidrológico	Características	Velocidad de Infiltración	Textura
A	Suelos de mayor permeabilidad y menor escorrentía.	> 76 mm/h	Arenosa; Arenosa-Limosa
B	Suelos de permeabilidad moderada	38 - 76 mm/h	Franca; Franco-arcillosa-arenosa; Franco-limosa
C	Suelos con poca permeabilidad	13 - 38 mm/h	Franco-arcillosa; Franco-arcillo-limosa; Arcillo-arenosa
D	Suelos con gran impermeabilidad y mayor escorrentía	< 13 mm/h	Arcillosa

Nota. El principal parámetro para realizar la clasificación de los suelos en sus diferentes grupos hidrológicos es la textura. Tomado y adaptado de [31]

2. Realizar la reclasificación simplificada del mapa de coberturas y usos del suelo, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. *Reclasificación propuesta por Villegas, P.*

Clasificación original		Reclasificación	
Numero	Descripción	Numero	Descripción
11	Agua a cielo abierto	1	Agua
90	Humedales leñosos		
95	Humedales herbáceos emergentes		
21	Poblados en espacios abiertos	2	Residencial media
22	Poblados de baja intensidad		
23	Poblados de mediana densidad		
24	Poblados de alta densidad		
41	Bosques secos	3	Bosque
42	Bosques verdes		
43	Bosques mixtos		
31	Tierra fértil	4	Agricultura
52	Arbustos/matorrales		
71	Pastizales/herbáceas		
81	Pasto/heno		
82	Cultivos		

Nota. Tomado y adaptado de [31]

- Mediante el software ArcMap realizar una intersección entre los mapas previamente reclasificados, obteniendo así un nuevo mapa.
- Crear una tabla en el ArcMap con los siguientes valores de NC (ver figura 8).

Figura 8. *Ejemplo de tabla con los valores de NC para cada tipo y uso de suelo.*

Table							
NCLookUp							
	OID	LUvalue	Descriptio	A	B	C	D
▶	0	1	Water	100	100	100	100
	1	2	Medium residential	57	72	81	86
	2	3	Forest	30	58	71	78
	3	4	Agricultural	67	77	83	87

(0 out of 4 Selected)

Nota. Tomado y adaptado de [31].

5. Contando con el mapa intersección, la tabla con los valores de NC y el DEM del área de estudio, generar en el software ArcMap el ráster de NC con ayuda de la extensión HEC-GeoHMS. Cuando se genera el ráster, el software asigna automáticamente un valor de NC a cada uno de los polígonos que conforman el mapa intersección.
6. Finalmente, el número de curva de la cuenca se calcula a través de un promedio ponderado, como se muestra a continuación.

$$NC = \frac{\sum(NCi * Ai)}{\sum(Ai)} \quad (2)$$

Donde,

NC=Número de curva de la cuenca

NCi= Número de curva de un polígono

Ai= Área de un polígono

3.4.3 Otros componentes físicos

En la Tabla 9 se presentan una serie de componentes físicos que están relacionados directamente al modelo hidrológico y a las pérdidas de este, así mismo se describen los métodos mediante los cuales fueron obtenidos.

Tabla 9. Componentes físicos relacionados a las pérdidas del modelo.

Componente	Método
Abstracción Inicial	Las variables de la siguiente ecuación son calculadas en los componentes anteriores. * $P0 = (508/NC) - 5.08$ Donde: P0 = Umbral de escorrentías o Abstracción inicial en centímetros NC: Número de curva calculado para la cuenca

Componente	Método
Porcentaje de Impermeabilización	Las variables de la siguiente ecuación se obtienen del mapa "coberturas y usos del suelo", y se calculan mediante el software ArcMap ** %Impermeabilización = (A.Urbana/A.Total)*100 Donde: Área Urbana: Corresponde al área urbana de la zona de estudio (km²). Área Total: Corresponde al área total de la zona de estudio (km²).

Nota. * Ecuación obtenida de [32]. ** La ecuación se obtiene de [29].

3.4.4 Componentes del ciclo hidrológico

En la Tabla 10 se describen los métodos por los cuales se obtuvieron los componentes del ciclo hidrológico. Cabe resaltar que las fuentes de información de los componentes ya fueron mencionadas.

Tabla 10. Componentes relacionados al ciclo hidrológico en el modelo.

Componente	Método
Precipitación	Mediante un mapa de Isoyetas se determina que las precipitaciones en el área de estudio poseen una distribución relativamente uniforme, por lo tanto, se decide promediar las precipitaciones diarias de las estaciones IDEAM y Matajira para los años de variabilidad climática (2010, 2015 y 2019). Dicha información se introduce en el modelo como datos de series de tiempo.
Caudal Observado	Con esta información se realizará la validación del modelo hidrológico. Aunque las dos estaciones poseen información del mismo cuerpo de agua, se opta por trabajar con la estación que se encuentre aguas abajo, en este caso la estación PTAP Bosconia. Esta información también se introduce en el modelo como datos de series de tiempo.

Componente	Método
Flujo Base	En este caso, se integra el flujo base al modelo mediante el método de recesión. Los parámetros que conforman este método son: descarga inicial, se obtiene a partir de los caudales observados, promediando los valores en temporada de sequía; constante de recesión; relación hasta el pico; Ambos se extraen de “Análisis de flujo base usando curvas maestras de recesión y algoritmos numéricos en cuencas de montaña: Cuenca del río Suratá y cuenca del Río de Oro” [33]

3.4.5 Especificaciones de control

Finalmente, “se deben definir unas especificaciones de cálculo para así determinar la cantidad de puntos en que se discretizan los hidrogramas” [34] . Para poder ejecutar el modelo, el software requiere el periodo de tiempo en el que se desea ejecutar, por lo tanto, se indican la fecha de inicio, la fecha final y los incrementos/intervalos de tiempo. Este proceso se repite para cada uno de los años de variabilidad climática. En la Figura 9 es posible observar la sección de las especificaciones de control que muestra el software HEC-HMS.

Figura 9. Especificaciones de control para el año 2010.

Name: Control 2010	
Description:	
*Start Date (ddMMYYYY)	01ene.2010
*Start Time (HH:mm)	00:00
*End Date (ddMMYYYY)	31dic.2010
*End Time (HH:mm)	00:00
Time Interval:	1 Day

Nota. Elaborado por los autores en el software HEC-HMS.

3.5 Caudal ecológico

Se denomina caudal ecológico a aquel que permite mantener los ecosistemas de agua dulce, así como los estuarios y los medios de supervivencia y bienestar humano que son dependientes de dichos ecosistemas. Los caudales ecológicos deben ser suficientes en aspectos de cantidad, calidad y temporalidad [1]. La obtención del caudal ecológico se determina mediante la aproximación hidrológica de gran visión consignada en [35], y depende principalmente de fijar un objetivo ambiental para la cuenca. Para establecer el objetivo ambiental es necesario obtener los siguientes factores.

3.5.1 Importancia ecológica de la cuenca

Para determinar la importancia ecológica del área de estudio se solicitó a la CDMB la zonificación ambiental que establecieron en el Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuenca Hidrográfica POMCA del Río Alto Lebrija, del cual hace parte la microcuenca Río Suratá Bajo. La zonificación ambiental fue proporcionada en formato *shapefile* y gracias al software ArcGis fue posible calcular las áreas de la zona de estudio destinadas y no destinadas para la conservación y protección ambiental. Se determinó que el 86.63% del área de estudio corresponde a áreas destinadas para la conservación, y que el 44% del área de estudio presenta conflicto, pues su uso actual no corresponde al uso destinado, por estos motivos se categoriza como una zona de muy alta importancia ambiental.

3.5.2 Presión de uso de la cuenca

Mediante una revisión al POMCA Río Alto Lebrija [20], fue posible encontrar indicadores que representen la presión de uso que el ser humano aplica sobre la microcuenca. El Índice de Uso de

Agua Superficial (IUA) establece una relación entre la demanda y la oferta del recurso, permitiendo mostrar de forma porcentual la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios [20], razón por la cual es considerado el más apropiado para los requerimientos del estudio. Asimismo, en [20], se menciona que para la microcuenca Río Suratá Bajo, la oferta hídrica superficial disponible es de 11.445 m³/s, la demanda hídrica de 0.052 m³/s y el IUA es de 0.454%, clasificado como muy bajo por ser inferior al 1%.

3.5.3 Matriz de objetivos ambientales y cálculo del caudal ecológico

“El estado de conservación deseado representa el objetivo ambiental asignado para la cuenca” [35], y se calcula en base a la siguiente gráfica, la cual está en función de la importancia ecológica y la presión de uso. En la Figura 10 se puede observar la matriz en la que se fundamenta la selección de los objetivos ambientales.

Figura 10. Matriz de objetivos ambientales

Importancia ecológica	Muy alta	A	A	B	C
	Alta	A	B	B	C
	Media	A	B	C	C
	Baja	A	B	C	D
		Baja	Media	Alta	Muy Alta
		Presión de uso			

Nota. Representa un objetivo ambiental cuyo estado o nivel de conservación deseado es, A= Muy bueno; B= Bueno; C= Moderado y D= Deficiente. Tomado de [35].

Teniendo en cuenta que la importancia ecológica es muy alta y la presión de uso es baja, el objetivo ambiental busca un estado o nivel de conservación muy bueno. Finalmente, se propone la

tabla 11 de referencia para asignar volúmenes de caudal ecológicos conforme a los objetivos ambientales [35].

Tabla 11. Componentes relacionados al ciclo hidrológico en el modelo.

OBJETIVO AMBIENTAL	ESTADO DE CONSERVACIÓN	CAUDAL ECOLÓGICO (%)	
		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

Nota. Tomado de [35].

De acuerdo con la tabla anterior, los caudales ecológicos para un estado de conservación deseado como muy bueno deben ser superiores al 40% de los caudales observados y/o modelados. En este caso, teniendo en cuenta que la microcuenca presenta una muy baja presión de uso, bajo criterio de los autores se establece un caudal ecológico correspondiente al 60% de los caudales modelados.

3.6 Huella hídrica agrícola

La huella hídrica agrícola, es el agua utilizada tanto directa, como indirectamente para la producción de bienes o servicios, en este caso cultivos [3]. Esta HH posee los tres componentes para su cálculo: HH azul, HH verde y HH gris. Por esta razón, la huella hídrica del proceso de cultivos (HHproc) se calculará por medio de la siguiente ecuación:

$$HH_{proc}(m^3/ton). = HH_{proc, azul} + HH_{proc, verde} + HH_{proc, gris} \quad (3)$$

En el proceso del cálculo de la HHproc se hace necesario calcular también los requerimientos de agua de los cultivos de la zona de estudio, por medio del análisis de diferentes variables [3].

Para este proceso de cuantificación de los requerimientos de agua de los cultivos se usó el software CROPWAT 8.0 que se basa en el método FAO Penman-Monteith. Este método calcula factores como la **evapotranspiración de los cultivos (ET)**, a partir de datos suministrados al software como la radiación solar diaria, variables de temperatura, variables de humedad, entre otras.

En cuanto a los componentes de la HH de los cultivos, el componente verde de la huella hídrica de un cultivo (HHproc, verde) es el coeficiente resultante de dividir el agua verde total utilizada por el cultivo (CWU – m³/ha) entre el rendimiento de dicho cultivo (Y – ton/ha). El componente azul (HHproc, azul) es el mismo concepto anterior haciendo la salvedad que se usa el agua azul total. Ambos componentes pueden calcularse por medio de las siguientes ecuaciones:

$$HH_{proc, verde} = \frac{CWU_{verde}}{Y} \quad (4)$$

$$HH_{proc, azul} = \frac{CWU_{azul}}{Y} \quad (5)$$

3.6.1 *Requerimientos de agua verde y azul de los cultivos (CWUverde y CWUazul)*

La determinación del Requerimiento de Agua del Cultivo (RAC), depende de suministrar al software CROPWAT 8.0, tres tipos de variables: inicialmente, variables climáticas, como la precipitación, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento. En segunda instancia, variables asociadas a los cultivos como la fecha de siembra y cosecha, las fases de crecimiento, la profundidad radicular para cada uno de los cultivos, la altura del cultivo y finalmente, variables asociadas a los tipos de suelos como el agua disponible total, la tasa máxima de infiltración, el agotamiento inicial de la humedad del suelo, entre otras.

A partir de los resultados del RAC se determinan los requerimientos de agua verde y agua azul de los cultivos. El requerimiento de agua verde del cultivo es la precipitación efectiva, la cual corresponde al agua proveniente de las lluvias y que es usada para suplir las necesidades de los

cultivos para un periodo de tiempo, el cual debe ser desde la época de siembra hasta la cosecha del cultivo. Este es denominado como CWUverde y esta expresado en mm, razón por la cual debe ser multiplicado por 10 para ser expresado en m^3/ha . Por otra parte, el requerimiento de agua azul, denominado CWUazul, corresponde a la resta entre el valor del requerimiento de riego y la precipitación efectiva. Teniendo en cuenta esto, si la diferencia es menor o igual a 0, significa que la precipitación puede suplir el requerimiento de riego, por lo tanto, no habrá CWUazul. De forma similar, debe multiplicarse por 10 para expresarse en m^3/ha .

3.6.2 Agua virtual, huella hídrica azul y verde

El modelo presenta la HHV virtual como el coeficiente resultante al dividir el valor de CWUverde en m^3/ha y el rendimiento del cultivo (Y) en t/ha , para así tener un valor en m^3/t . En cuanto a la HHA, se aplica la misma metodología antes expuesta.

3.6.3 Agua virtual y huella hídrica gris agrícola

En cuanto al cálculo de la HHG, solo se tuvo en cuenta la contaminación por aplicación de fertilizantes específicamente la aplicación de nitrógeno. Para esto debe tenerse en cuenta la siguiente información:

- Tasa de lixiviación del nitrógeno: 10% del nitrógeno total aplicado (Hoekstra & Chapagain, 2008).
- Concentración máxima permitida de nitrógeno: 30 mgN/litro (Boulay et al., 2011.)
- Concentración natural del nitrógeno: 0,01 mgN/litro (REDRIO, 2011).

Para realizar el cálculo de la HHG se divide la cantidad de fertilizante aplicado (kg/ha), con la diferencia entre la concentración máxima permitida (kg/m³) y la concentración natural (kg/m³) según la siguiente formula:

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}} \quad (6)$$

En donde,

HH_{proc, gris}: Huella hídrica gris producto agrícola especificado (m³/ha)

L: Cantidad de fertilizante aplicado (kg/ha)

C_{máx}: Concentración máxima permisible del N en el agua (kg/m³)

C_{nat}: concentración natural de N en el agua (kg/m³)

3.7 Huella hídrica pecuaria

La huella hídrica pecuaria está dada en unidades de m³/t de peso vivo, y esta es el producto de la división del gasto total de recurso hídrico por la cantidad de cabezas de ganado de distinto tipo dentro de la cuenca rio Suratá bajo, multiplicado por el peso vivo promedio de cada uno [3]. Para este caso se tuvieron en cuenta los subsectores bovino, equino, caprino, ovino, avícola y porcino.

De la misma manera que la HH agrícola, la HH pecuaria posee 3 componentes referentes a los tipos de agua. El componente verde, el cual está relacionado con la HH del alimento suministrado a los animales de un área determinada, que en este caso es la cuenca baja del río Suratá. El componente azul que hace referencia al consumo por parte de los diferentes subsectores analizados y finalmente, el componente gris el cual hace referencia a la cantidad de agua necesaria para diluir la contaminación de las actividades pecuarias.

En cuanto al cálculo de la cantidad de animales en la porción de microcuenca, se tuvo en cuenta que, en un área determinada, el número de animales de pastoreo es directamente proporcional al

área total de pastos en dicha superficie y con el tipo de manejo de los animales [3]. Entonces, para realizar el cálculo de la población de animales, se procedió a multiplicar el número total de animales reportados en el municipio de Bucaramanga por el porcentaje de pastos ubicados dentro de la zona de estudio. Para las aves y porcinos se tuvo en cuenta el área rural.

3.7.1 *Huella hídrica del alimento*

La huella hídrica del alimento hace referencia a la HHV producida por los pastos que se encuentran en la cuenca y son usados como alimento de cada uno de los subsectores analizados [3]. Para calcular esta HH se empleó el mismo procedimiento usado para el cálculo de la HH de los cultivos, se definió un rendimiento de 15 t/ha para pastos intensivos y en cuanto a los pastos de tipo extensivo, se definió un rendimiento de 5 ton/ha [3].

Ahora bien, el consumo de pastos por animal es otro factor para tener en cuenta a la hora de calcular la HH del alimento. Este consumo depende principalmente del peso promedio. Para conocer los pesos promedio de los diferentes subsectores analizados, se consultaron diferentes anuarios estadísticos de la zona proporcionados por diversas entidades que se encargan de supervisar temas relacionados con la producción pecuaria en la región, entre estos se encuentra el Instituto Colombiano Agropecuario.

Una vez teniendo los datos de peso promedio de cada uno de los animales pertenecientes a cada subsector, se procede a calcular la cantidad de paso que consume un animal por día en función de su peso, de la siguiente manera:

$$Req. MS \left(\frac{kg}{animal.día} \right) = \frac{peso animal vivo (kg) * rms}{100\%} \quad (7)$$

Donde:

Req.MS = Requerimiento de materia seca por animal

Peso vivo animal = Peso del animal dependiendo del tipo de ganado y de su edad.

Rms= Valor de requerimiento de materia seca con relación al tipo de ganado.

Una vez calculado el requerimiento de materia seca por subsector, se procede a calcular el requerimiento total de forraje verde, de la siguiente manera:

$$Req. total FV \left(\frac{kg}{animal.día} \right) = Req. MS + Req. MS * \left(\frac{hf}{Msf} \right) \quad (8)$$

Donde:

Req. Total FV = requerimiento total de forraje verde por animal por día.

Req MS = Requerimiento de materia seca por animal por día.

Hf = porcentaje de humedad asumido para el forraje verde.

Msf = Porcentaje de materia seca en el forraje verde.

Es importante señalar que, los subsectores pueden estar siendo alimentados con concentrados, sin embargo, estos no se tienen en cuenta dentro del estudio puesto que su HH corresponde al sector industrial.

3.7.2 Huella hídrica del consumo

Para determinar el consumo de cada subsector, se usó principalmente el Estudio Nacional del Agua ENA 2014, el cual muestra los valores medios del consumo de recurso hídrico para ciertos subsectores. Estos valores se usaron para determinar la HHA asociada al consumo de agua. En la Tabla 12 se presenta los diferentes consumos de agua que tiene cada subsector analizado con sus respectivas fuentes de información.

Tabla 12. Consumo de agua diario por cada subsector.

Subsector	L/día	Fuente
Bovinos		
Vaca < 36 meses	54	"ENA 2014" [36].
Vaca > 36 meses	103	
Toro < 36 meses	45	
Toro > 36 meses	70	
Caprinos	3.11	"Manual de producción caprinos y ovinos" [37]
Equinos	52	"El agua en la producción equina" [38]
Ovinos	6.1	"Alimentación y nutrición en los ovinos" [39]
Aves *		
Engorde	0.36	"ENA 2014" [36].
Postura	0.26	
Traspatio	0.25	
Porcinos **	45	"ENA 2014" [36].

Nota. * Se tiene en cuenta el consumo y la limpieza. ** Se tiene en cuenta el consumo, el alojamiento y el lavado.

3.7.3 Huella hídrica gris del sector pecuario

En términos generales, la información disponible para determinar la contaminación del agua debido a las labores pecuarias es escasa para la cuenca del río Suratá. Por este motivo se hizo necesario recurrir a métodos indirectos para la estimación de contaminación por animales.

Para determinar la HH de cada uno de los subsectores, se usó el mismo método empleado para el cálculo de la HHG agrícola. Este consistió en contabilizar solo el nitrógeno aportado a una tasa

de lixiviación del 10% y usando datos de cantidades de nitrógeno contenidas en heces. Los valores usados se encuentran en la tabla 13, presentada a continuación:

Tabla 13. *Aporte de nitrógeno en heces de cada subsector.*

Subsector	Nitrógeno (kg/año)
Caballos	67.55
Bovinos adultos	73.64
Terneros de menos de medio año o menos de 220 kg	27.00
Cerdas de cría de más de 50kg	22.02
Ovejas	13.50
Cabras	10.13
100 gallinas ponedoras	81.81
100 pollos de carne	40.91
Otros pollos (100)	15.00

Nota. Tomado y adaptado de “El estiércol y las prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente” [40]

3.8 Análisis de sostenibilidad ambiental

El análisis de sostenibilidad en términos generales busca establecer relaciones entre las huellas hídricas tanto azul, verde y gris del sector agrícola y pecuario con la totalidad de agua disponible que tiene la microcuenca estudiada. Esta comparación se hizo con cada uno de los componentes de la HH determinados en cada año representativo de la variabilidad climática (año húmedo, normal y seco).

3.8.1 *Análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul.*

Para realizar el análisis de sostenibilidad ambiental de la HHA, en primera instancia fue necesario calcular la HH total, junto con la oferta de agua para la microcuenca río Suratá bajo. La oferta natural de agua fue determinada a partir de modelaciones de la microcuenca, mientras que, el ecológico de la microcuenca fue determinado a partir del método de aproximación hidrológica “de gran visión” propuesto en [35].

Teniendo estos dos valores, se procede a calcular la oferta de agua natural azul mensual, por medio de la siguiente ecuación:

$$O_{Anatural, azul} = Oferta\ natural\ mensual - caudal\ ecologico. \quad (9)$$

Contando con la HHA y la oferta natural de agua azul, se procede a restar ambos valores, para así identificar si la microcuenca tiene la capacidad de abastecer las necesidades de agua de la población o si, por el contrario, la población está demandando mayor cantidad de agua de la que se dispone. Cabe resaltar que, esta esta comparación se hizo para cada uno de los años definidos dentro de la variabilidad climática.

Finalmente, se procede a calcular el índice de escasez para cada uno de los años representativos por medio de la siguiente ecuación.

$$E_{azul\ mensual} = \frac{\Sigma HH_{azul\ mensual}}{O_{Anatural\ regulada}} \quad (10)$$

3.8.2 *Análisis ambiental de la huella hídrica verde*

La sostenibilidad ambiental del componente verde de la HH puede ser entendido como la capacidad que tiene una cuenca u otro espacio geográfico para satisfacer las necesidades de agua verde de las actividades que allí se desarrollan. En esta instancia, el análisis de la sostenibilidad

ambiental se realiza a partir del cálculo del índice de escasez de agua verde, el cual puede calcularse por medio de la siguiente ecuación.

$$Everde\ mensual = \frac{\Sigma HHverde\ mensual}{DAverde} \quad (11)$$

Ahora bien, es importante tener en cuenta que la Disponibilidad de Agua verde, en este caso, fue tomada como la evapotranspiración total de los cultivos a niveles mensuales, este factor fue calculado a través del modelo de Penman-Montheih que usa el software CROPWAT 8.0. Cabe resaltar que el análisis de sostenibilidad ambiental de la HH verde se realizó en los tres diferentes escenarios de la variabilidad climática planteada.

3.8.3 Análisis ambiental de la huella hídrica gris

La HHG es evaluada de manera similar a la HHA. La HHG es comparada con la oferta natural regulada, que corresponde a la diferencia entre la oferta natural de agua azul y la HHA, en determinado periodo de tiempo. Teniendo lo anterior en cuenta se procede a calcular el índice de contaminación del agua o NCA, el cual se puede calcular de la siguiente manera:

$$NCAmensual = \frac{\Sigma HHgris\ mensual}{Oferta\ natural\ regulada} \quad (12)$$

Un nivel del 100% o superior, muestra que la capacidad de la cuenca para asimilar una carga contaminante ha sido superada, por el contrario, valores inferiores al 100% denotan que el afluente aún puede seguir asimilando la carga contaminante analizada [3].

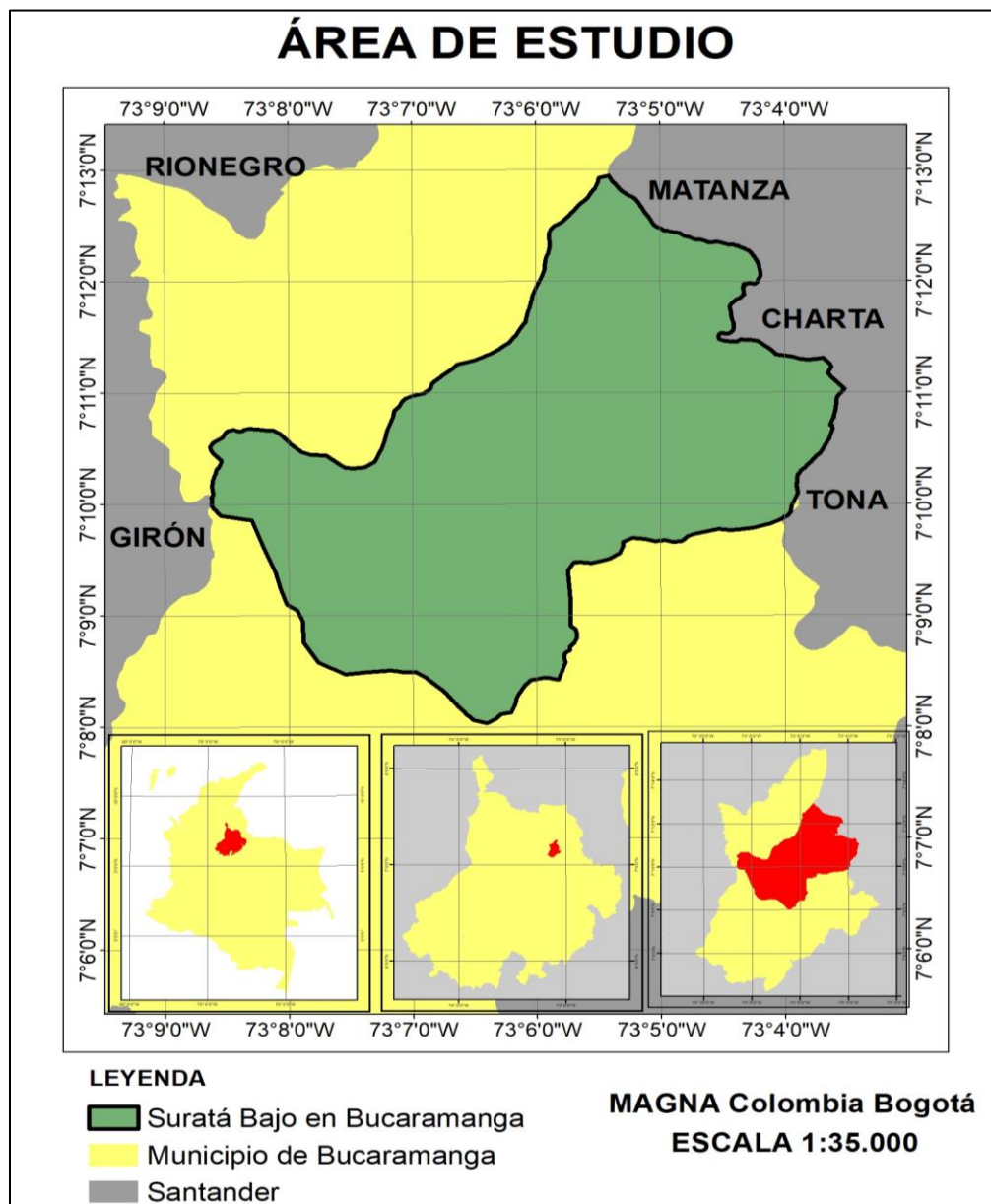
4. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos teniendo en cuenta la metodología planteada previamente.

4.1 Área de estudio

En la figura 11 se presenta el mapa con la porción de la microcuenca Río Suratá Bajo ubicada en Bucaramanga, a su vez, también se presenta la ubicación del municipio en el departamento a manera de referencia.

Figura 11. *Suratá bajo en el municipio de Bucaramanga.*



4.2 Variabilidad climática

Como se mencionó, la determinación de la variabilidad climática tuvo como referencia dos metodologías: la clasificación según el IGME y la clasificación según el método de los percentiles. Para la selección de los años representativos de la variabilidad climática se establecieron una serie de criterios: inicialmente, que los años seleccionados correspondieran a datos recientes; igualmente, que para los años seleccionados se contara con la suficiente información agropecuaria (Evaluaciones municipales agropecuarias, entre otras) y finalmente, que los años seleccionados correspondieran a datos cercanos a los percentiles 1, 50 y 100. En la Tabla 14 se presenta la aplicación de ambas metodologías y los años seleccionados como húmedo, normal y seco (2010, 2019 y 2015, respectivamente).

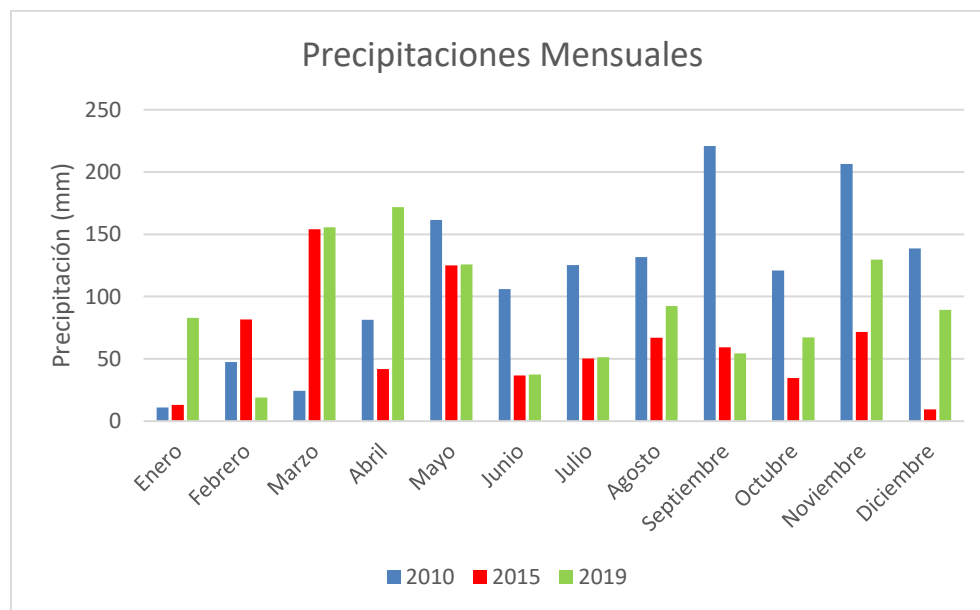
Tabla 14. *Variabilidad climática.*

Orden	Año	Precipitación	Clasif. IGME
1	2015	744.500	Año Seco
2	2002	882.783	Año Seco
3	2017	957.950	Año Normal
4	2009	977.950	Año Normal
5	1997	983.767	Año Normal
6	2007	995.700	Año Normal
7	2000	1000.809	Año Normal
8	2014	1017.500	Año Normal
9	2001	1018.450	Año Normal
10	2013	1032.600	Año Normal
11	1998	1044.788	Año Normal
12	2012	1049.300	Año Normal
13	2004	1059.100	Año Normal
14	2018	1064.650	Año Normal
15	2016	1071.900	Año Normal
16	2019	1077.750	Año Normal
17	2020	1104.612	Año Normal
18	2006	1127.400	Año Normal
19	2005	1176.901	Año Normal

Orden	Año	Precipitación	Clasif. IGME
20	1999	1227.950	Año Normal
21	2008	1251.150	Año Normal
22	2011	1354.800	Año Húmedo
23	2010	1375.450	Año Húmedo
24	2003	1732.672	Año Húmedo
Media Aritmética		1097.101	

Una vez se seleccionaron los años para estudiar, se procedió a realizar los hietogramas para cada uno de los escenarios planteados. Como se puede observar en la figura 12, el comportamiento de las precipitaciones es el esperado, pues en el año 2010 se observan los diagramas de barras más altos, mientras que en el 2015 se observan los más bajos.

Figura 12. *Precipitaciones mensuales para cada uno de los años seleccionados.*



En las figuras 13, 14 y 15 es posible observar las gráficas de tendencia de la temperatura para los años seleccionados. Se denota en estas que, la temperatura para el año 2019 (año normal) fue superior a la temperatura presentada en el año 2015 (año seco), mientras que para el año 2010

(año húmedo) la temperatura tuvo un comportamiento cercano al esperado. Cabe resaltar que, solo se tuvo en cuenta las precipitaciones para la determinación de la variabilidad climática.

Figura 13. *Tendencia de temperatura para el año 2015 (año seco)*

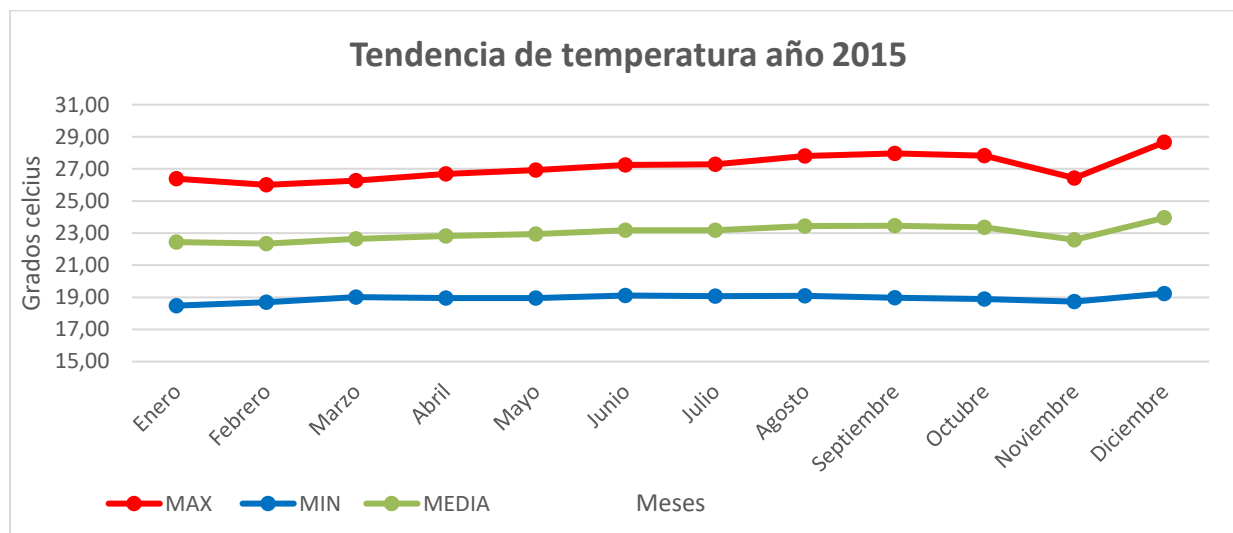


Figura 14. *Tendencia de temperatura para el año 2010 (año húmedo)*

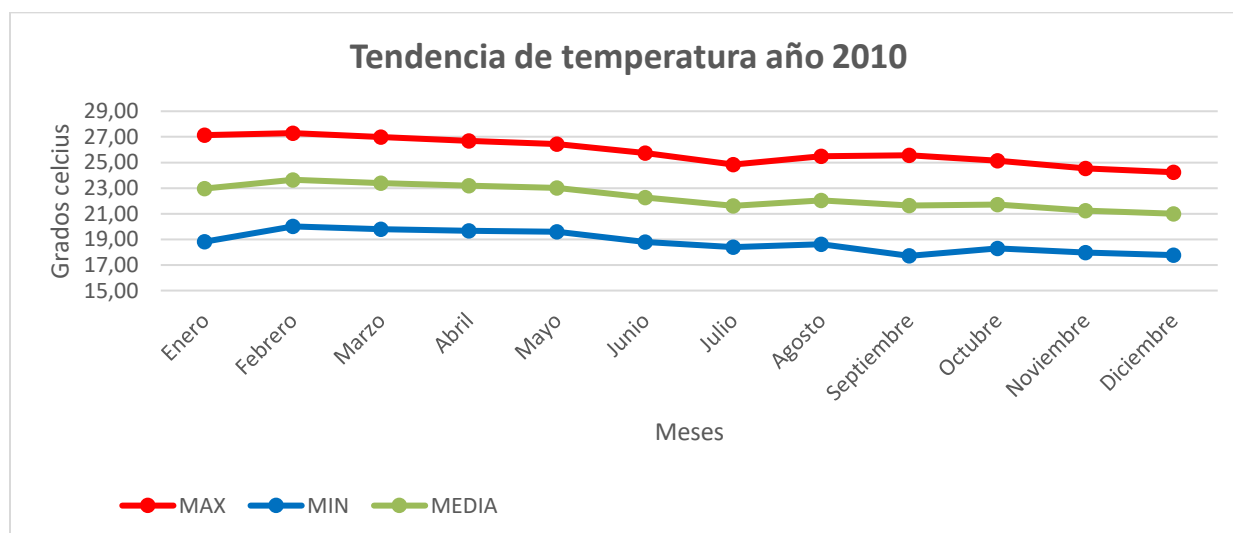
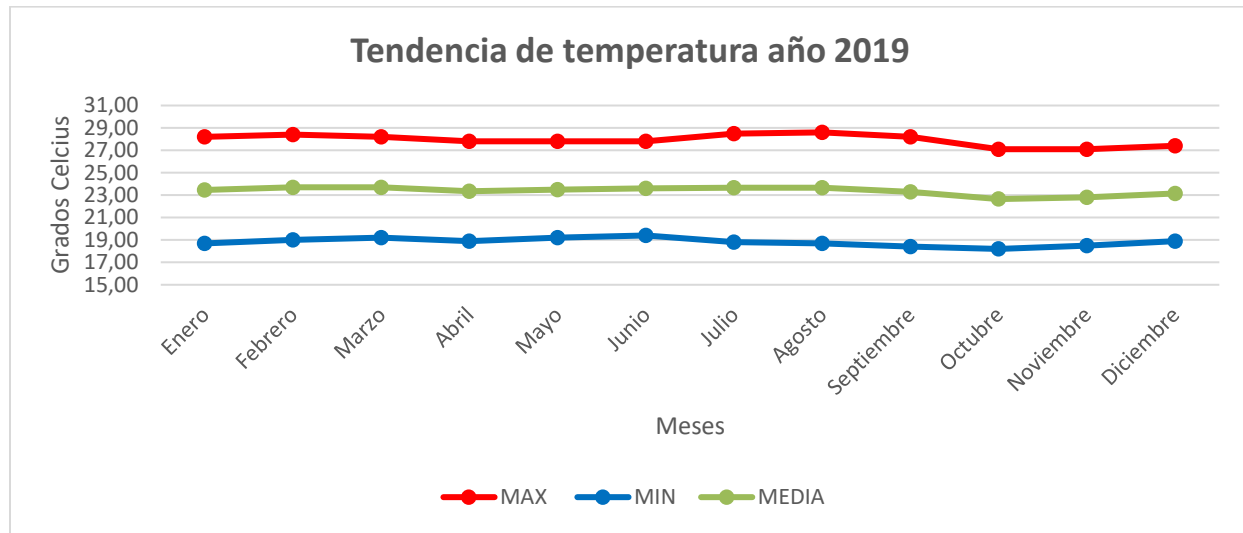


Figura 15. *Tendencia de temperatura para el año 2019 (año normal)*

4.3 Modelo hidrológico

A continuación, se presentan los resultados de la obtención de los componentes del modelo, junto a los resultados del modelo como tal. Es necesario mencionar que el modelo hidrológico se obtuvo con base en la metodología propuesta por [29].

4.3.1 Mapas

Se presentan los mapas elaborados y requeridos para llevar a cabo el modelo hidrológico, entre los cuales se encuentran: el mapa del modelo digital de elevaciones de la microcuenca, el mapa de los tipos de suelo de la microcuenca, los mapas de las coberturas de suelo y los mapas del número de curva. (Observar las Figuras 16 – 21)

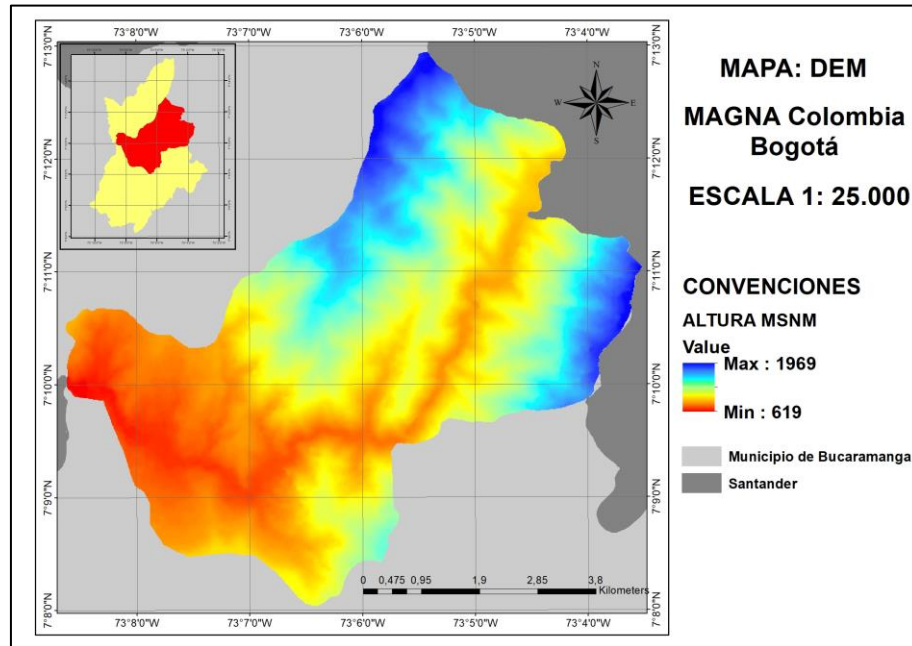
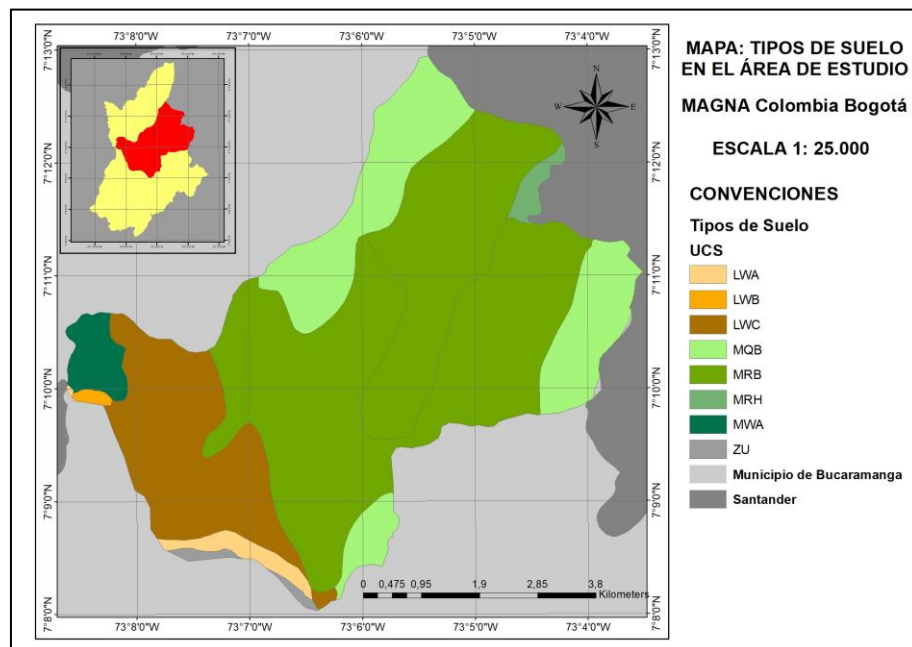
Figura 16. *Modelo digital de elevaciones microcuenca Suratá bajo en Bucaramanga.***Figura 17.** *Tipos de suelo de la microcuenca Suratá bajo en Bucaramanga.*

Figura 18. Coberturas y usos del suelo de la microcuenca Suratá bajo en Bucaramanga, año 2010.

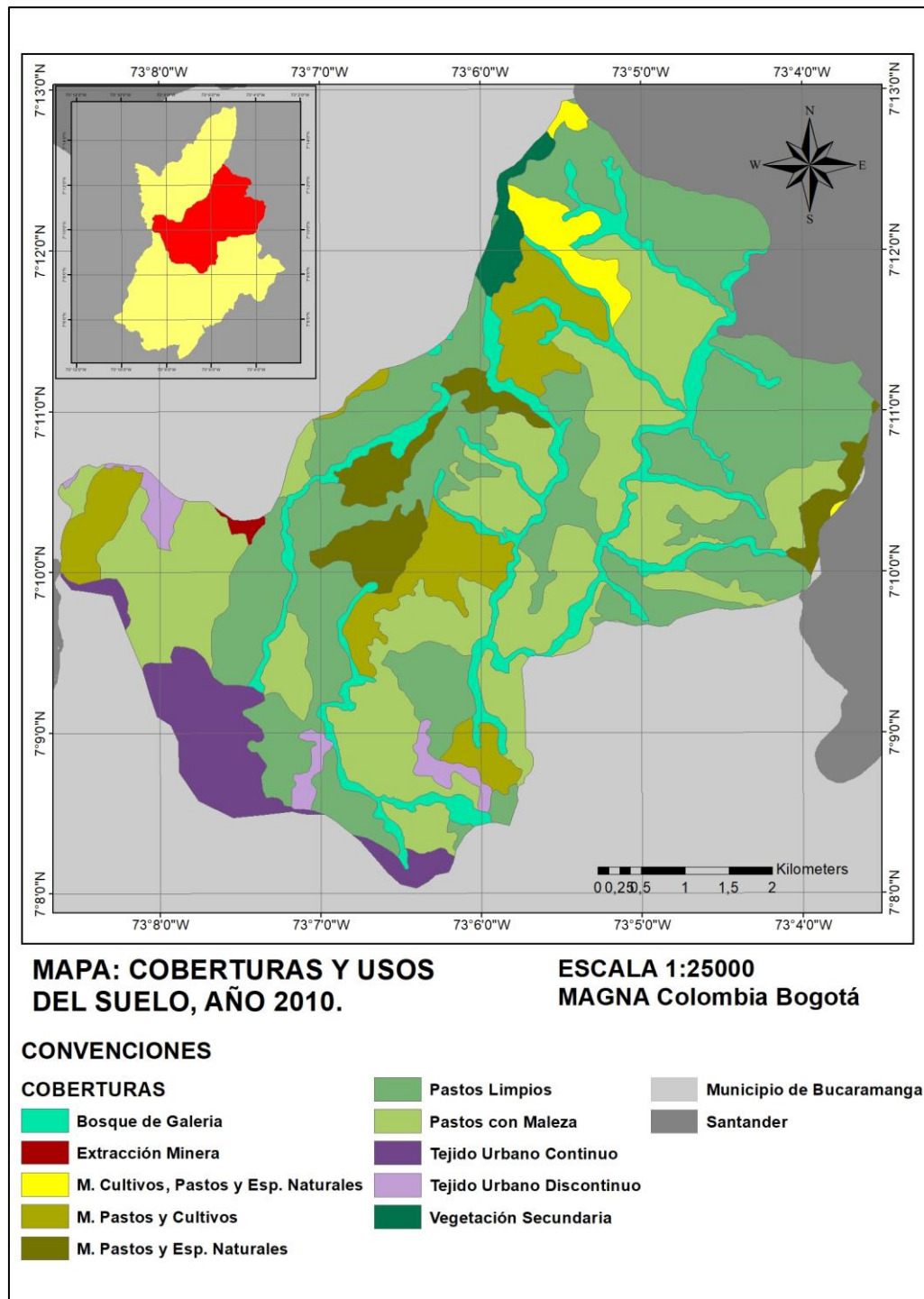


Figura 19. Coberturas y usos del suelo de la microcuenca Suratá bajo en Bucaramanga, años 2015-2019.

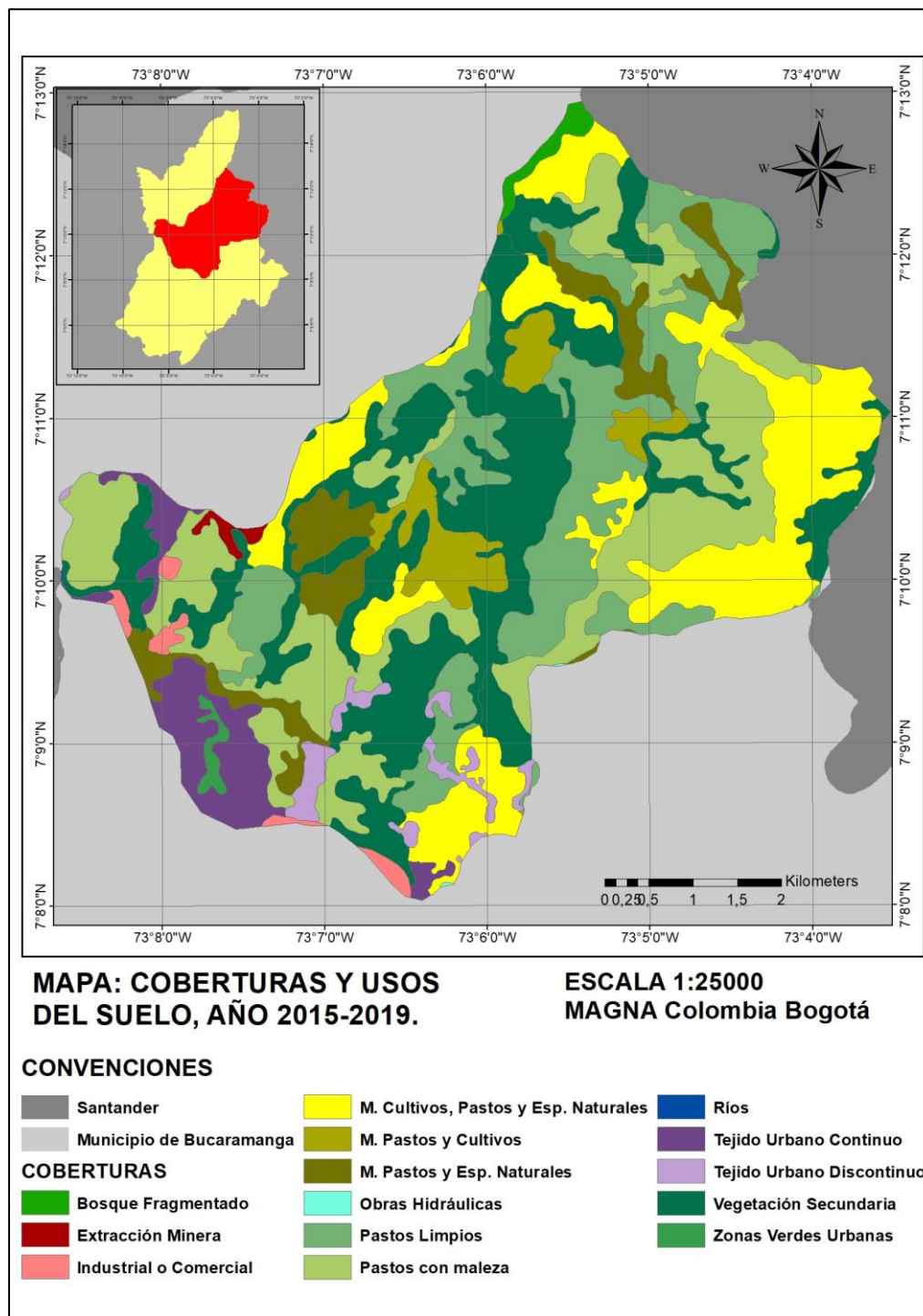
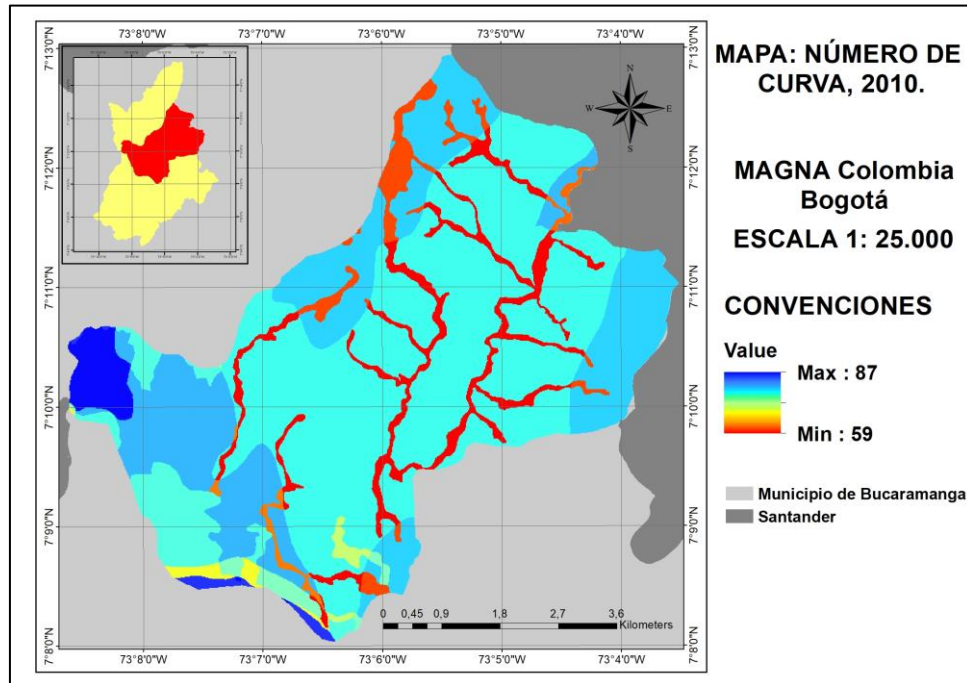
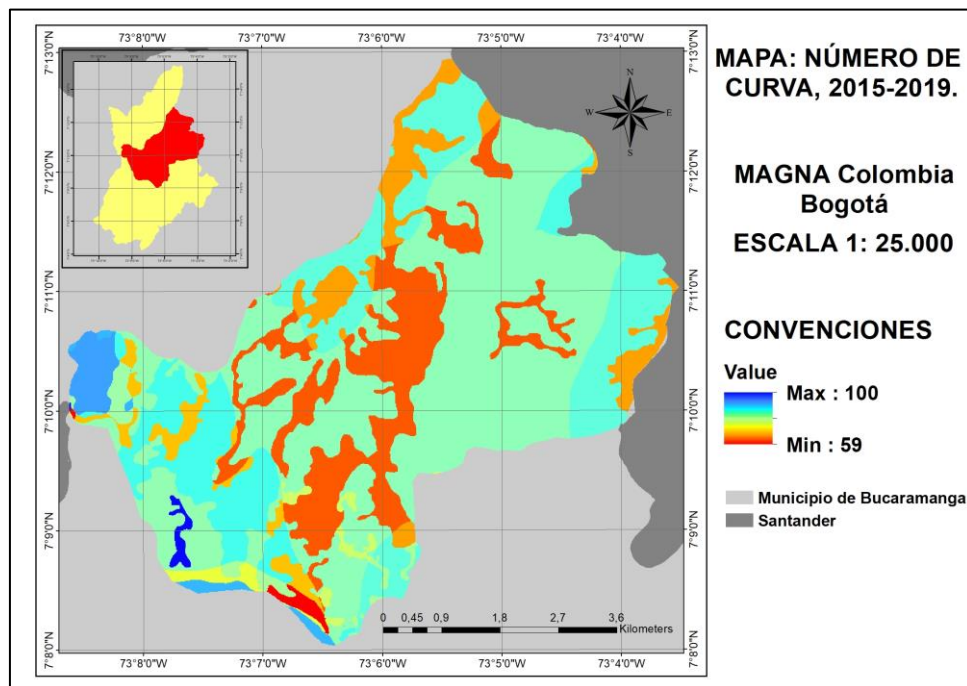


Figura 20. Número de curva de la microcuenca Suratá bajo en Bucaramanga, año 2010.**Figura 21.** Número de curva de la microcuenca Suratá bajo en Bucaramanga, años 2015-2019.

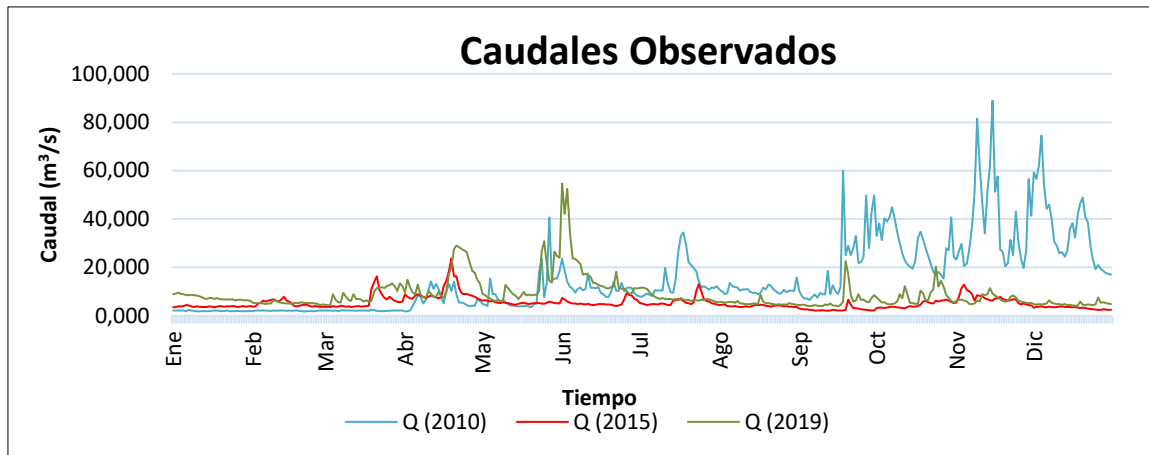
4.3.2 Componentes del modelo

En la Tabla 15 se consignan las características morfométricas y los parámetros calculados. Por otra parte, en las figuras 22 y 23 es posible observar la precipitación ocurrida en la parte baja de la microcuenca durante los años de estudio, así como los caudales observados durante la misma temporalidad.

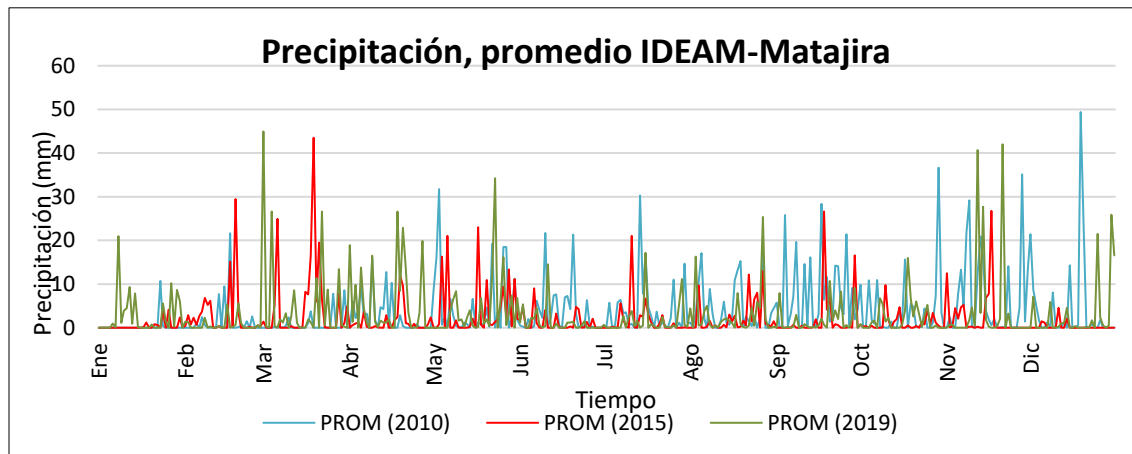
Tabla 15. *Parámetros morfométricos cuenca Suratá bajo en Bucaramanga*

Descripción	Unidad	Valor
Superficie		
Área	km ²	39,48
Perímetro	km	32,73
Cotas		
Cota Max	msnm	1969,00
Cota Min	msnm	619,00
Red Hídrica		
Cota Max del curso principal	msnm	945,59
Cota Min del curso principal	msnm	622,00
Longitud del curso Principal	km	14,203
Orden de la red Hídrica	und	7,00
Longitud de la Red Hídrica	km	202,10
Parámetros Generados		
Pendiente del cauce Ppal	m/m	0,0228
Tiempo de Concentración	h	2,193
Tiempo de Retardo	h	1,316
Número de Curva 2010	--	78,08
Número de Curva 2015-2019	--	75,87

Nota. Los datos aquí consignados se obtuvieron mediante el software ArcMap.

Figura 22. Caudales observados en los diferentes años de variabilidad climática.

Nota. Información adaptada de la estación PTAP Bosconia.

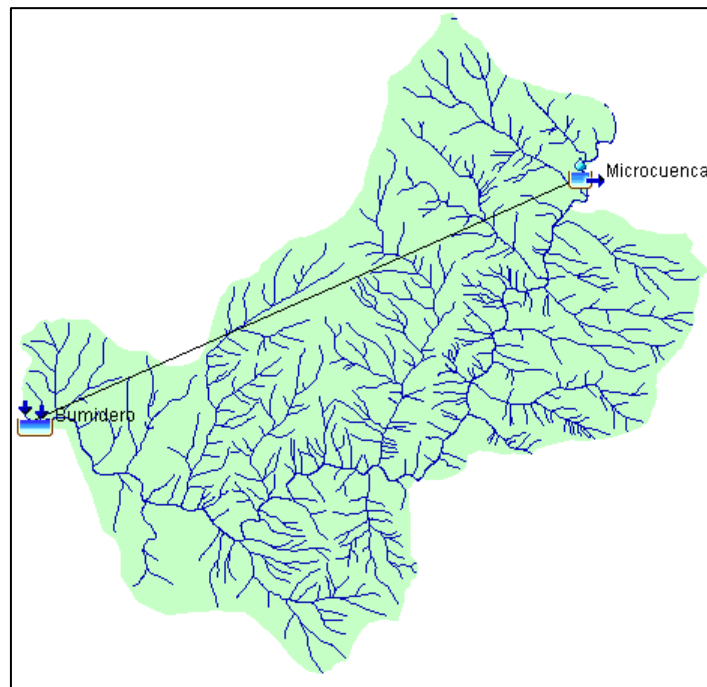
Figura 23. Precipitaciones promediadas, estaciones IDEAM y Matajira.

Nota. La gráfica representa una serie de tiempo de las precipitaciones promediadas en los años de variabilidad climática. Información adaptada de IDEAM.

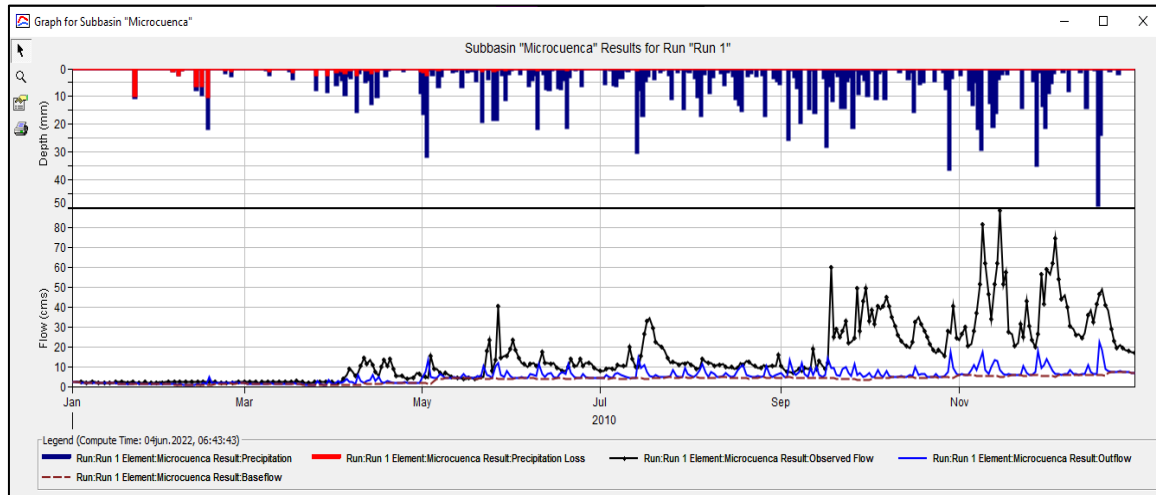
4.3.3 Resultados de la modelación

El área de estudio se encuentra en el tramo final de la microcuenca “Río Suratá bajo”, región donde concurren los caudales y/o aportes de la subcuenca “Río Suratá”. La modelación del área de estudio en HEC-HMS consta de dos puntos conectados, un punto representa la microcuenca junto con sus características físicas y meteorológicas, y el otro punto representa el lugar más bajo del área de drenaje o la salida del modelo de la cuenca. Cabe resaltar que la esquematización es la misma para los 3 años que representan la variabilidad climática, sin embargo, los componentes físicos y meteorológicos cambian para cada año modelado. En las siguientes figuras (24-27) se consignan los resultados obtenidos de la modelación hidrológica del área de estudio, para cada uno de los años (2010, 2015 y 2019).

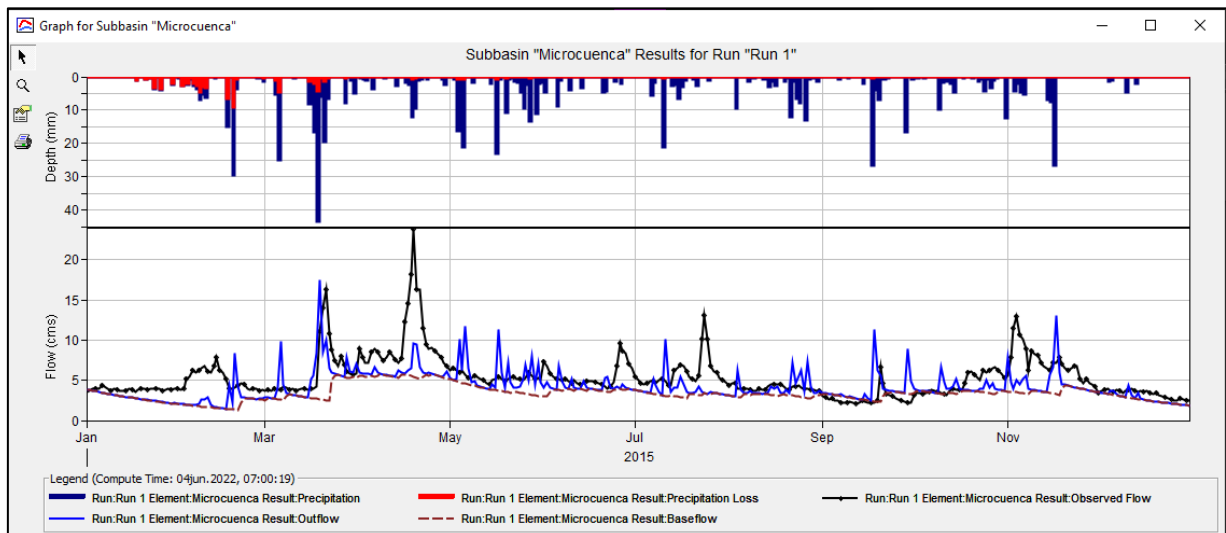
Figura 24. Esquematización del modelo del área de estudio.



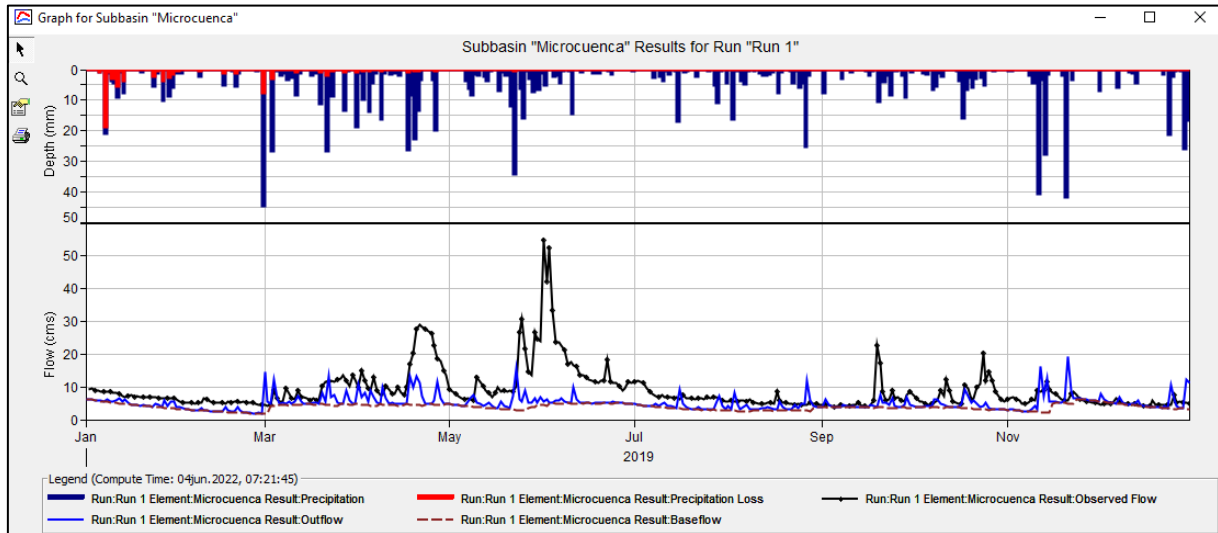
Nota. Elaborado por los autores en el software HEC-HMS.

Figura 25. Hidrograma obtenido, año 2010.

Nota. Como se observa, el caudal modelado es representado por una línea continua de color azul, mientras que, el caudal observado es representado con una línea continua de color negro. Por último, la línea roja a trazos representa el flujo base del río.

Figura 26. Hidrograma obtenido, año 2015.

Nota. Se mantienen las mismas convenciones del anterior hidrograma.

Figura 27. Hidrograma obtenido, año 2019.

Nota. Se mantienen las mismas convenciones del anterior hidrograma.

En la Tabla 16 se presenta un resumen de los datos obtenidos en la modelación de los caudales:

Tabla 16. Resumen de resultados modelación de caudales.

Caudal		Resultados	2010	2015	2019
Simulado	Caudal Pico (m ³ /s)		22,5	17,4	19,3
	Fecha de caudal pico		19/12/2010	19/03/2015	21/11/2019
	Volumen de Precipitación (mm)		1375,45	744,5	1077,75
	Pérdidas de Volumen (mm)		75,88	81,69	83,86
	Exceso de Volumen (mm)		1299,57	662,81	993,89
	Volumen de Escorrentía Directa (mm)		1299,57	662,81	979,55
	Volumen de Flujo Base (mm)		2776,48	2704,75	3093,85
	Volumen de Descarga (mm)		4076,06	3367,55	4073,4
Observado	Caudal Pico (m ³ /s)		88,9	23,7	54,7
	Fecha de caudal pico		15/11/2010	19/04/2015	1/06/2019
	Volumen (mm)		12248,18	4217,76	7028,48
	Porcentaje de Sesgo		-66,72%	-20,13%	-42,09%

Es necesario mencionar que, el modelo hidrológico no presenta una concordancia exacta con los datos observados en la estación del acueducto de Bosconia. Esto se debe a que la estación se encuentra en un punto de confluencia de la totalidad de la microcuenca río Suratá bajo, sin embargo, el área modelada corresponde al área de la microcuenca que se encuentra en Bucaramanga, que a su vez es la parte más baja de la microcuenca. Es decir, el área modelada conforma el 33% de la microcuenca río Suratá bajo.

4.4 Caudales ecológicos

A partir de los caudales diarios modelados se calcularon los promedios mensuales de los años 2010, 2015 y 2019, y se obtienen sus respectivos caudales ambientales, como se muestra en la Tabla 17.

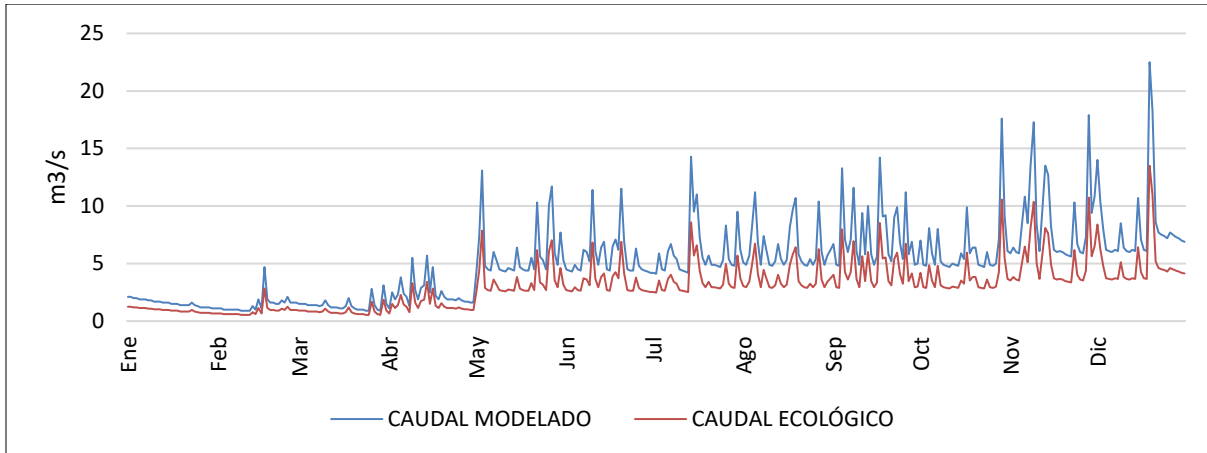
Tabla 17. *Caudales ecológicos de los promedios mensuales.*

MES	C. MODELADO (Medio Mensual, m ³ /s)			CAUDAL ECOLÓGICO (m ³ /s)		
	2010	2015	2019	2010	2015	2019
Enero	1.57	2.89	5.19	0.94	1.73	3.11
Febrero	1.44	2.61	2.73	0.86	1.56	1.64
Marzo	1.38	5.71	6.16	0.83	3.42	3.69
Abril	2.44	6.14	7.04	1.46	3.68	4.23
Mayo	5.87	5.67	5.52	3.52	3.40	3.31
Junio	5.63	4.31	5.50	3.38	2.59	3.30
Julio	6.01	3.98	4.28	3.61	2.39	2.57
Agosto	6.32	4.07	4.22	3.79	2.44	2.53
Septiembre	7.41	3.89	4.54	4.45	2.34	2.73
Octubre	6.22	4.04	4.49	3.73	2.42	2.69
Noviembre	8.57	4.75	6.00	5.14	2.85	3.60
Diciembre	8.23	2.73	5.45	4.94	1.64	3.27

Para este caso, el caudal destinado para la preservación de los ecosistemas en el área de estudio debería ser superior al 60%, el cumplimiento de este requerimiento se verificará en el análisis de

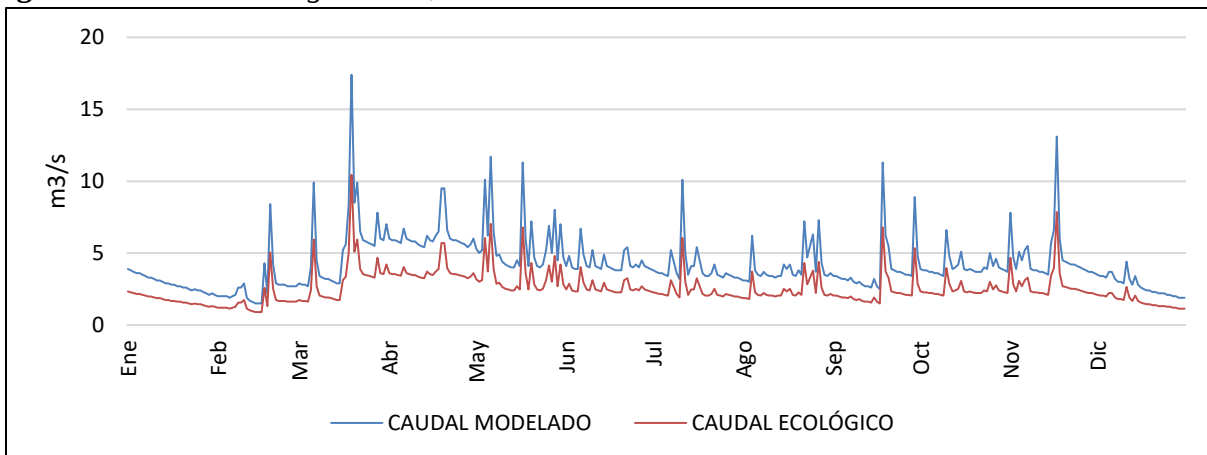
sostenibilidad ambiental. En las figuras 28, 29 y 30 se representan gráficamente los caudales ecológicos para cada uno de los años; húmedo, seco y normal, respectivamente.

Figura 28. Caudal ecológico 60%, año 2010.

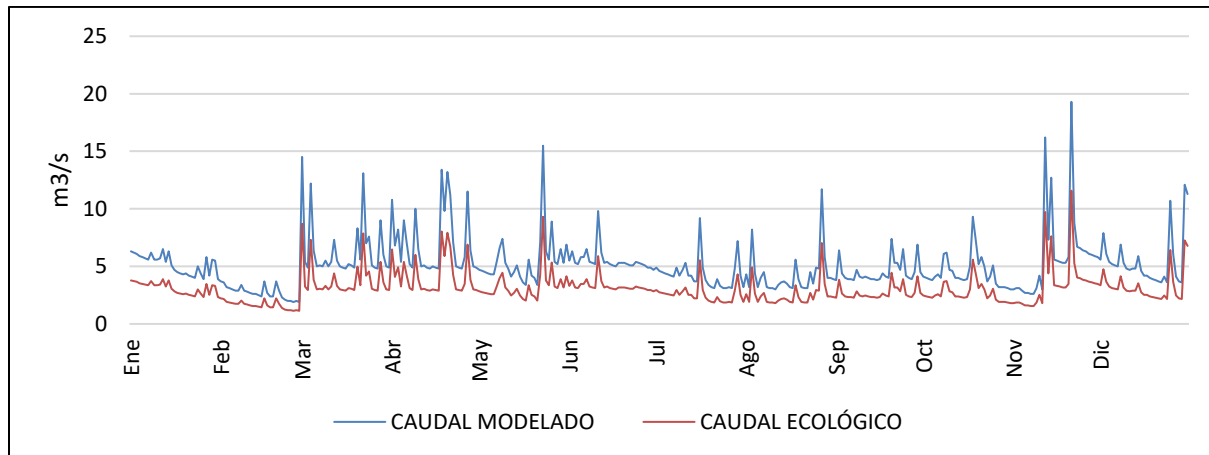


Nota. El caudal modelado está representado por una línea azul y el caudal ecológico (60%) por una línea roja.

Figura 29. Caudal ecológico 60%, año 2015.



Nota. Se mantienen las mismas convenciones del anterior gráfico.

Figura 30. Caudal ecológico 60%, año 2019.

Nota. Se mantienen las mismas convenciones del anterior gráfico.

4.5 Huella hídrica agrícola

Se calculó la HH agrícola total para cada uno de los años que representan la variabilidad climática. Para el año húmedo (2010) la HH agrícola total fue de 993.766 m³, mientras que para los años normal (2019) y seco (2015) fue de 2.381.693 m³ y 1.428.931 m³, respectivamente. Asimismo, es posible observar las HH verde, HH azul y HH gris que componen la HH agrícola total de cada uno de los años en la Tabla 18.

Tabla 18. Comparación Huella Hídrica Agrícola Total.

Huella Hídrica	Húmedo 2010		Normal 2019		Seco 2015	
	Valor (m3)	%	Valor (m3)	%	Valor (m3)	%
Verde	760174.31	76.5%	1674343.83	70.3%	661582.92	46.3%
Azul	165143.58	16.6%	574795.70	24.1%	672892.11	47.1%
Gris	68448.08	6.9%	132553.39	5.6%	94455.78	6.6%
Total	993765.97	100%	2381692.93	100%	1428930.81	100%

Respecto a los aportes a la HH agrícola de los cultivos analizados, se observa en el año húmedo (2010) que el café, la yuca, el tomate y el limón son los principales contribuyentes con porcentajes de 28.4%, 12.8%, 12.6% y 8.4%, respectivamente, es decir el 62.2% de la HH agrícola para dicho año (Ver figura 31). De forma similar, en el año normal (2019) se resaltan el café, el cacao, el plátano y la yuca con porcentajes de 18.7%, 17.3%, 15.2% y 10.2%, respectivamente, sumando el 61.4% (Ver figura 32). Igualmente, en el año seco (2015), el café, el cacao, la yuca y el limón contribuyen con el 29.9%, 23.5%, 11.4% y 10.9%, respectivamente, sumando el 75.7% de la HH agrícola (Ver figura 33). Es necesario mencionar que la predominancia de cultivos como el café y el cacao como principales aportantes en las diferentes HH agrícolas, se debe principalmente a que ocupan mayores áreas y a que poseen rendimientos bajos.

Figura 31. *Aporte por cultivo a la HH agrícola total, año húmedo (2010).*

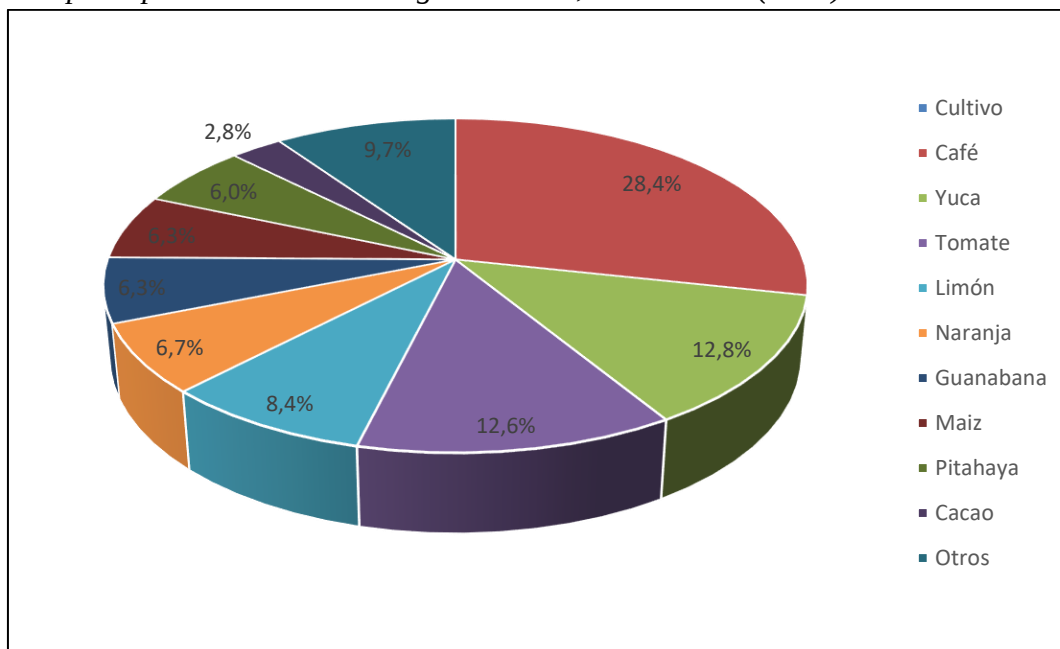
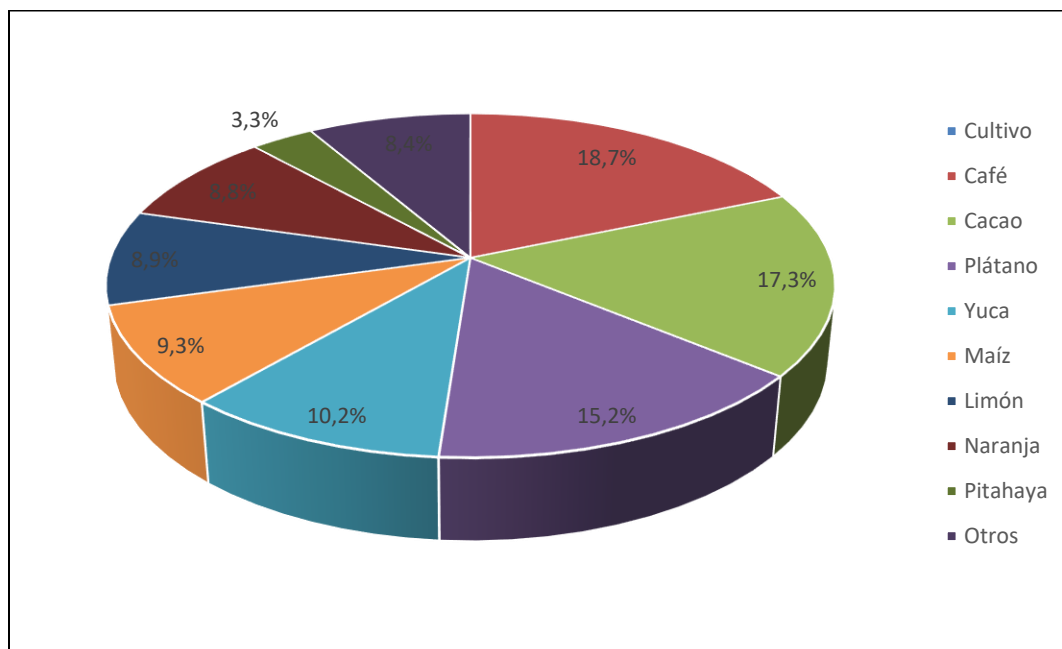
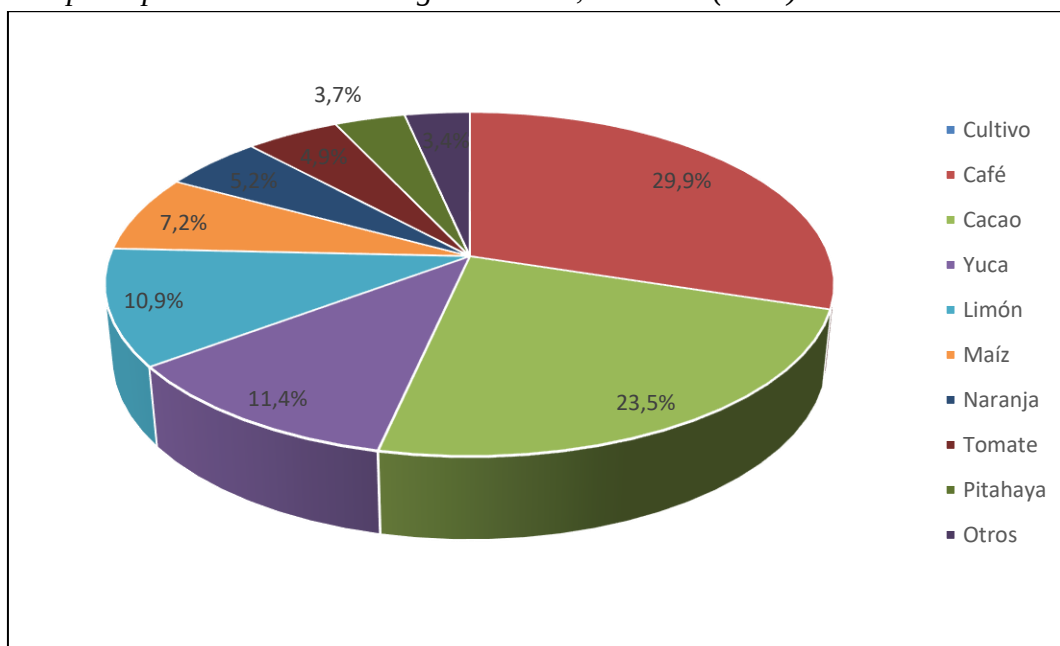


Figura 32. Aporte por cultivo a la HH agrícola total, año normal (2019).**Figura 33.** Aporte por cultivo a la HH agrícola total, año seco (2015).

En la HHV agrícola, se observa que para los años húmedo (2010) y normal (2019) es la de mayor aporte, conformando el 76.5% y el 70.3% de la HH agrícola total de cada año respectivamente. Sin embargo, en el año seco aporta el 46.3% de la HH agrícola total, esto se debe a las bajas precipitaciones ocurridas. Por otra parte, debido a que la HHV conforma la mayoría de la HH agrícola total, el comportamiento en cuanto a aportes de cada cultivo es similar al mencionado previamente. Se resaltan al café, el cacao, la yuca, el plátano y el tomate como los de mayor HHV. En cuanto a la HHA agrícola, para los años húmedo y normal se tienen porcentajes de 16.6% y 24.1% de la HH agrícola total, respectivamente. Sin embargo, en el año seco la HHA conforma la mayor parte de la HH total con un valor de 47.1%, la principal causa corresponde a la escasa precipitación durante dicho año, lo que se traduce en un mayor requerimiento de riego de los cultivos. En este caso, el café, el cacao, el plátano y el tomate son los cultivos que mayor HHA aportan.

Finalmente, la HHG agrícola corresponde al 6.9%, 5.6% y 6.6% de la HH agrícola total para los años húmedo, normal y seco respectivamente. De forma similar, el café, el cacao, la yuca y el tomate son los cultivos que mayor carga contaminante aportan al área de estudio. Es necesario mencionar que, los valores de la HH gris provienen de la cantidad de nitrógeno existente en la fertilización de cada uno de los cultivos, por lo tanto, se encuentra directamente relacionada al área plantada, y a la concentración de N de los diferentes fertilizantes. En las figuras 34, 35 y 36 se representan los componentes de la HH de los diferentes cultivos para cada uno de los años.

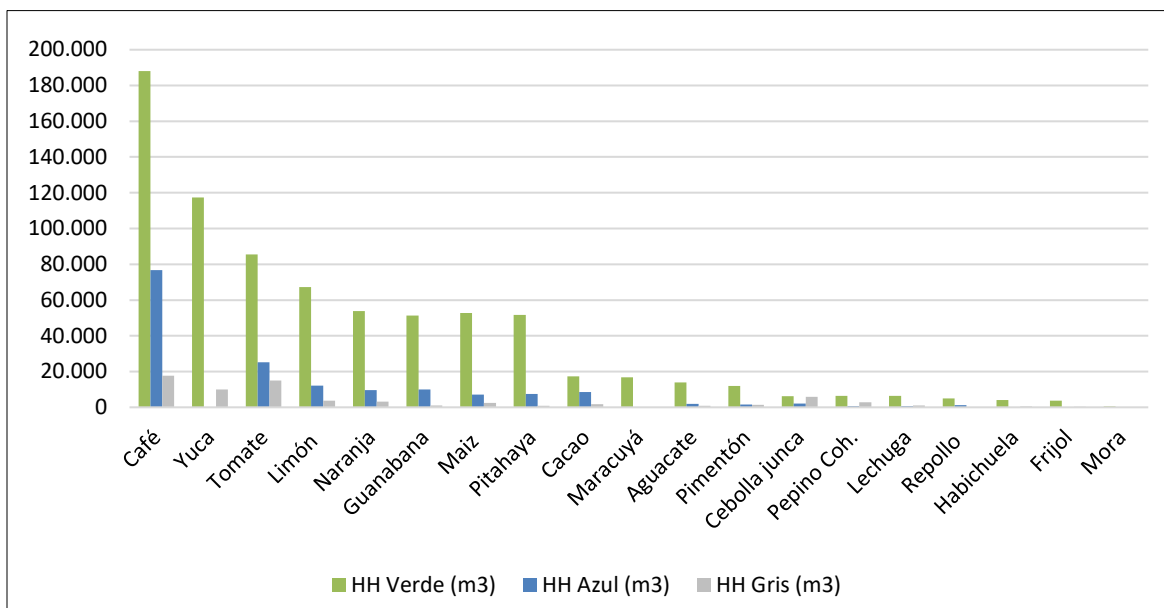
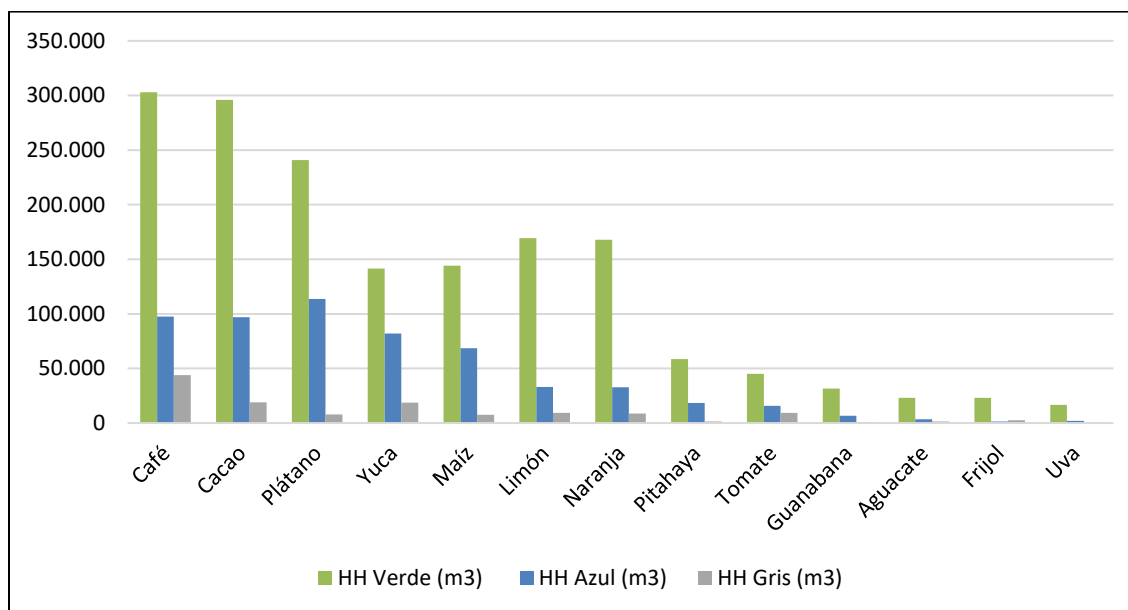
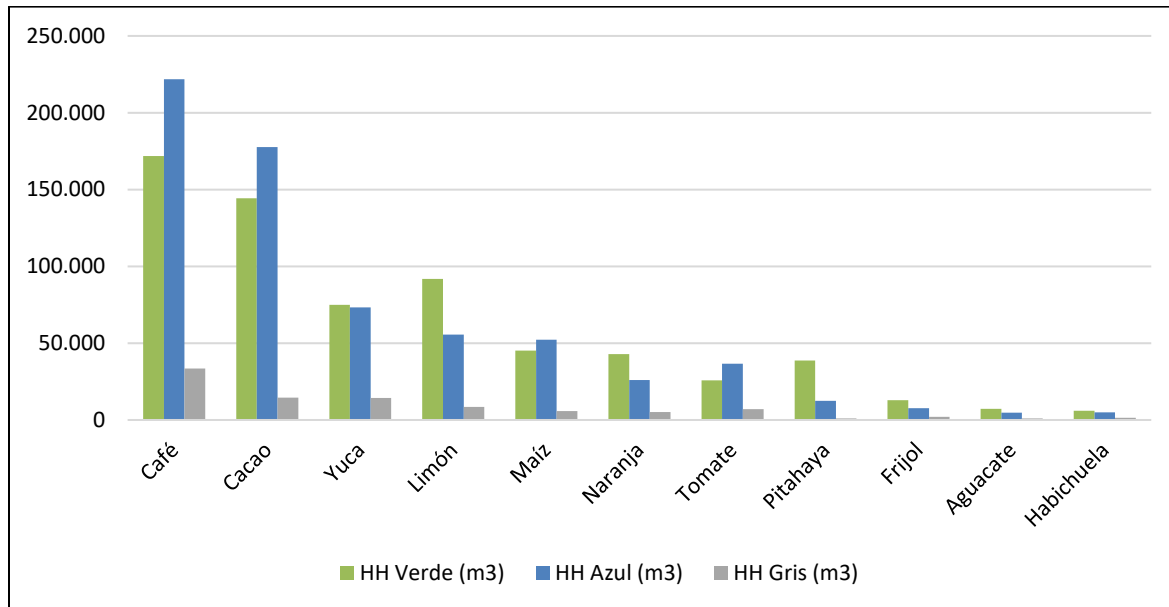
Figura 34. Huella hídrica agrícola, año húmedo (2010).**Figura 35.** Huella hídrica agrícola, año normal (2019).

Figura 36. *Huella hídrica agrícola, año seco (2015).*

4.5.1 Huella hídrica agrícola por tonelada

La HH agrícola por tonelada corresponde a la HH virtual. La HH virtual varía de acuerdo con cada cultivo, así mismo, el rendimiento de las cosechas es determinante, pues mayores rendimientos representan una HH virtual más baja. En este caso, los cultivos de cacao y café poseen una mayor HH virtual para todos los años de estudio, mientras que cultivos como la habichuela y el tomate son los de menor valor. Es necesario mencionar que condiciones climáticas de abundantes o escasas precipitaciones propician un aumento en los valores de la HH virtual de los cultivos. En las figuras 37, 38 y 39 se presentan la HH agrícola por tonelada para cada uno de los años estudiados.

Figura 37. *Huella hídrica agrícola por tonelada, año húmedo (2010).*

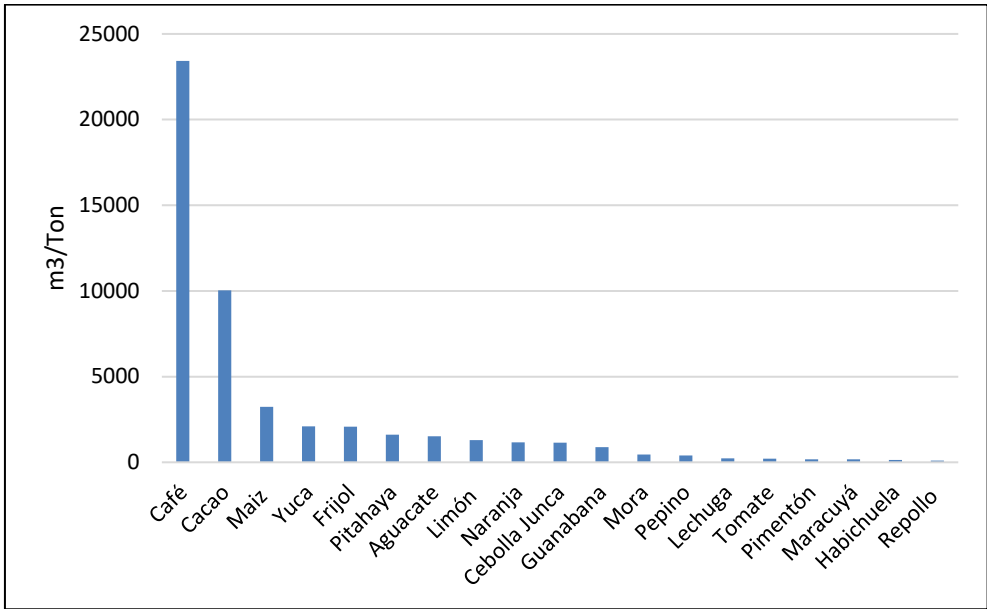


Figura 38. *Huella hídrica agrícola por tonelada, año normal (2019).*

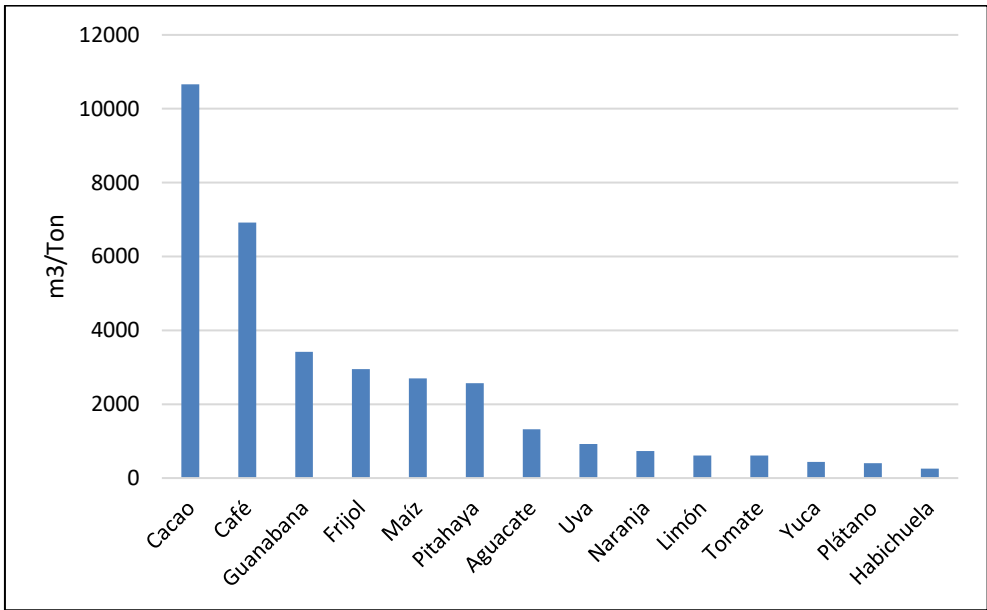
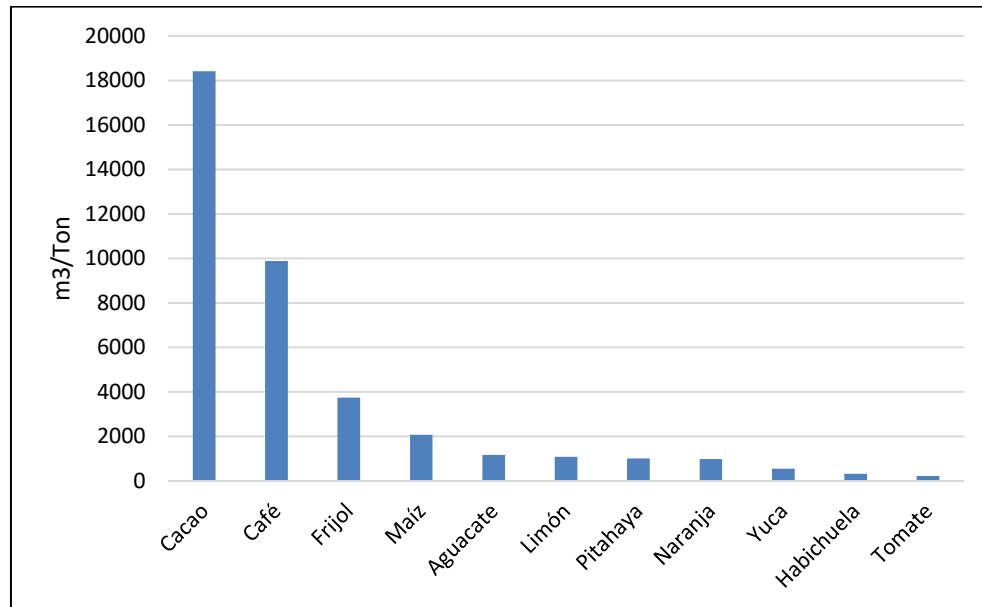
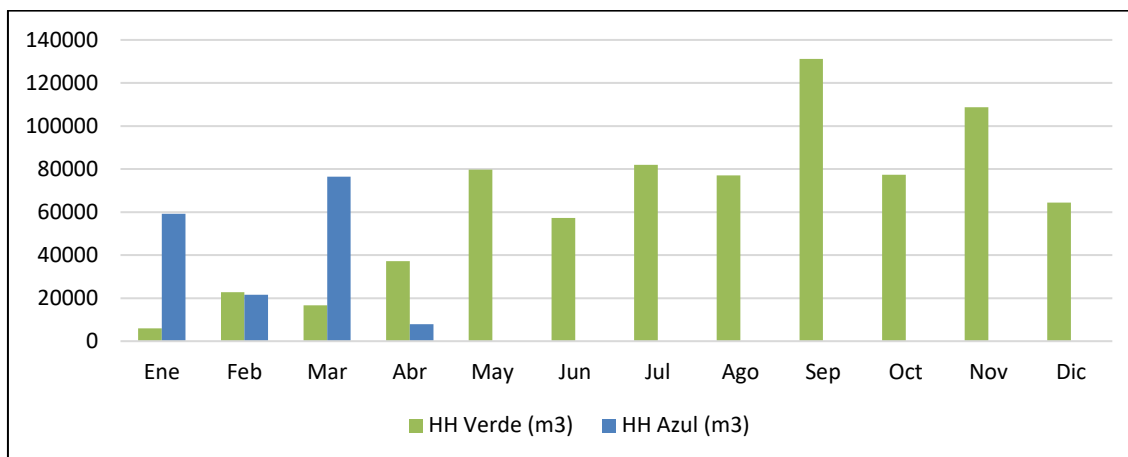


Figura 39. *Huella hídrica agrícola por tonelada, año seco (2015).*

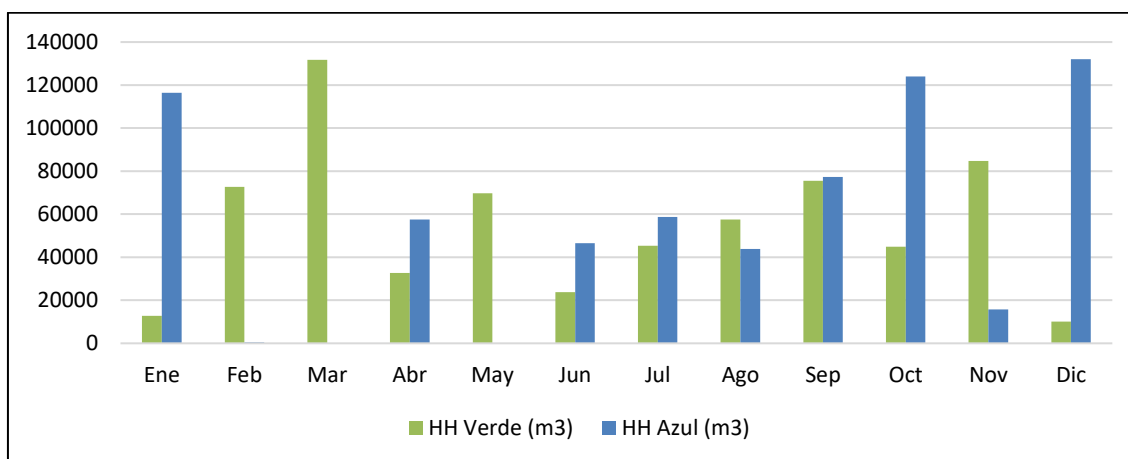
4.5.2 Huella hídrica agrícola mensual

El comportamiento de la HH agrícola a escala mensual se encuentra muy relacionado al comportamiento de las precipitaciones en la cuenca para los diferentes años de estudio, a las fechas de siembra en los cultivos transitorios y a los inicios de los ciclos fenológicos en los cultivos permanentes.

Respecto al año húmedo (2010) es posible observar que la mayor parte de la HH verde ocurre en septiembre, octubre y noviembre, correspondientes a los meses con mayor precipitación registrada para dicho año, cabe resaltar también, que desde mayo a diciembre la precipitación es tal que no es necesario el riego de los cultivos para dicho periodo. Por otra parte, enero, febrero y marzo registran menores precipitaciones reflejándose en una mayor HH azul en este periodo de tiempo. Lo mencionado anteriormente está representado en la figura 40.

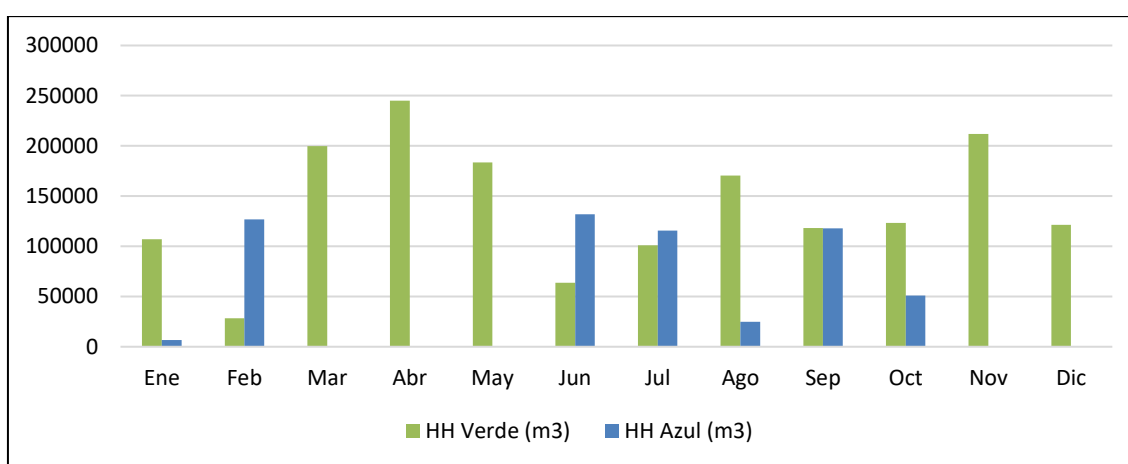
Figura 40. *Huella hídrica agrícola mensual, año húmedo (2010).*

Para el año seco (2015), la mayor HH verde y por lo tanto los mayores registros de precipitación ocurren durante los meses de febrero, marzo, mayo, septiembre y noviembre. Sin embargo, los únicos meses en los que los cultivos no requieren de riego alguno son febrero, marzo y mayo. A excepción de dichos meses, el resto del año es necesario el riego de los cultivos, siendo en mayor medida durante los meses de enero, octubre y diciembre, correspondientes a la mayor HH azul del año 2015. A continuación, se presenta gráficamente lo mencionado en la figura 41.

Figura 41. *Huella hídrica agrícola mensual, año seco (2015).*

Durante el año normal (2019), es posible observar que los meses de marzo a mayo, noviembre y diciembre corresponden a los meses en los que no es necesario el riego de los cultivos, es decir, poseen precipitaciones abundantes y por ende registran únicamente HH verde. Por el contrario, el resto del año registra HH azul, siendo superior en los meses de febrero, junio y julio. En la figura 42 se observa lo mencionado.

Figura 42. *Huella hídrica agrícola mensual, año normal (2019).*

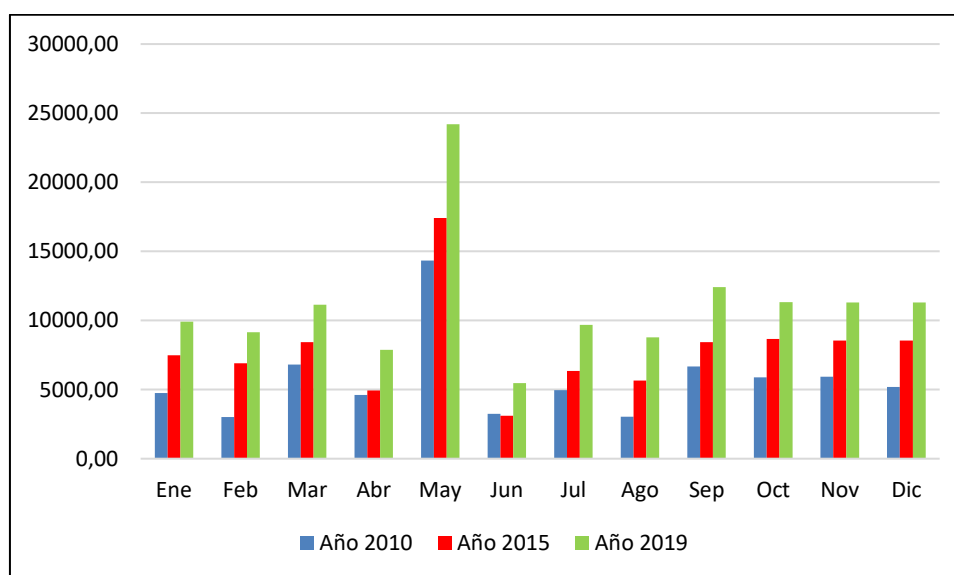


Ahora bien, la HH gris no corresponde a una HH de consumo y se encuentra relacionada a la cantidad de fertilizante aplicada a los cultivos y la cantidad de agua necesaria para que el cuerpo de agua pueda asimilar la carga contaminante después de ser lixiviada, en este caso, el nitrógeno. De acuerdo con la información que se trabajó, los fertilizantes se aplican en cantidades similares durante el periodo que dura el cultivo en el caso de los transitorios y durante el periodo que dura el ciclo fenológico en los cultivos permanentes.

Todos los años poseen un comportamiento similar en la escala mensual, la diferencia radica en los valores, pues la HH gris es directamente proporcional a las áreas de cultivos, las cuales aumentaron entre los años 2010 y 2019. Asimismo, se observan valores superiores en los meses

de marzo y septiembre, relacionados a las fechas de siembra de los cultivos transitorios y a los inicios de los ciclos fenológicos en los permanentes, por otra parte, se observa el valor máximo en el mes de mayo y esto se debe a que, al cultivo de la yuca, el cual posee un área considerable, se le aplica una gran dosis de fertilizante únicamente en su fecha de siembra. En la figura 43 se muestra una distribución comparativa de la HHG agrícola a escala mensual en cada uno de los años analizados.

Figura 43. Huella hídrica agrícola gris a escala mensual, todos los años.



4.6 Huella hídrica pecuaria

Se calculó también la HH pecuaria para los años que representan la variabilidad climática. La HH pecuaria total para el año húmedo (2010) es de 3.398.961 m³, para el año normal (2019) es de 2.363.593 m³ y para el año seco es de 2.094.504 m³. En la tabla 19 se presentan los componentes de la HH pecuaria total para los diferentes años de estudio.

Tabla 19. *Comparación Huella Hídrica Pecuaria Total.*

HH	Húmedo (2010)		Normal (2019)		Seco (2015)	
	Cantidad (m3)	%	Cantidad (m3)	%	Cantidad (m3)	%
Verde	2496510.3	73.4%	1659593.0	70.2%	1316459.0	62.9%
Azul	71240.6	2.1%	59929.0	2.5%	59389.7	2.8%
Gris	831210.5	24.5%	644071.3	27.2%	718655.6	34.3%
Total	3398961.4	100%	2363593.2	100%	2094504.3	100%

Como se mencionó previamente, se calculó la HH pecuaria para los subsectores bovino, equino, caprino, ovino, avícola y porcino. A rasgos generales, en todos los años de estudio, los bovinos son el ganado que más contribuye a la HH pecuaria, seguido por el subsector avícola y el porcino. Esto se debe principalmente a que son los subsectores con más población de animales en el área de estudio. En la Tabla 20 se muestra la comparación entre los aportes de cada subsector a la HH pecuaria total.

Tabla 20. *Comparación de los aportes de cada subsector a la Huella Hídrica Pecuaria Total.*

Subsector	Húmedo (2010)		Normal (2019)		Seco (2015)	
	Cantidad (m3)	%	Cantidad (m3)	%	Cantidad (m3)	%
Bovinos	3024560.88	88.98%	1935483.29	81.89%	1743851.60	83.26%
Caprinos	24703.27	0.73%	38811.55	1.64%	18212.70	0.87%
Equinos	28224.61	0.83%	71790.91	3.04%	16511.99	0.79%
Ovinos	24839.45	0.73%	42923.53	1.82%	19020.93	0.91%
Avícola	162413.19	4.78%	170991.37	7.23%	184846.92	8.83%
Porcinos	134219.97	3.95%	103592.60	4.38%	112060.16	5.35%
Total	3398961.37	100%	2363593.25	100%	2094504.30	100%

La HH verde pecuaria pertenece al alimento de los animales de pastoreo, en este caso bovinos, equinos, caprinos y ovinos. Los bovinos aportan el 97.5%, 97.1% y 92.7% de la HH verde pecuaria para los años húmedo, seco y normal, respectivamente. Es necesario resaltar que el área de pastos es la de mayor extensión en el área de estudio, aproximadamente 75%, 52% y 50% para los años

2010, 2015 y 2019 respectivamente, se observa también una reducción en el área de pastos y un aumento en el área de cultivos y de bosques con el paso del tiempo. En cuanto a la HH azul pecuaria, se observa en la “Tabla 19” que no supera el 3% de la HH pecuaria total en cada uno de los años, la principal causa es que el consumo directo de agua de los animales no es significativo al ser comparado con la HH verde. Los bovinos son los principales consumidores del recurso, seguido por los porcinos y las aves. Respectivamente, en el año húmedo (2010) representan el 52%, 34% y 13%; en el año normal (2019), 50%, 32% y 15%; en el año seco (2015) 48%, 34% y 17%.

La HH gris pecuaria, a diferencia de la azul si es relevante en la HH pecuaria total. Es proveniente del agua necesaria para asimilar el nitrógeno lixiviado de la fertilización de los pastos intensivos y de las heces de los animales. Los principales contaminantes son los bovinos, las aves y los porcinos. Respectivamente, en el año húmedo figuran con el 66%, 18% y 13%; en el año normal el 57%, 25% y 13%; en el año seco el 61%, 25% y 13%. Cabe resaltar que la HH gris proveniente de los pastos no se le añadió a las aves y porcinos, pues esta no es su fuente de alimento. En las Figuras 44, 45 y 46 se muestra la HH pecuaria por subsector para los años húmedo, seco y normal respectivamente.

Figura 44. Huella hídrica pecuaria por subsector, año húmedo (2010).

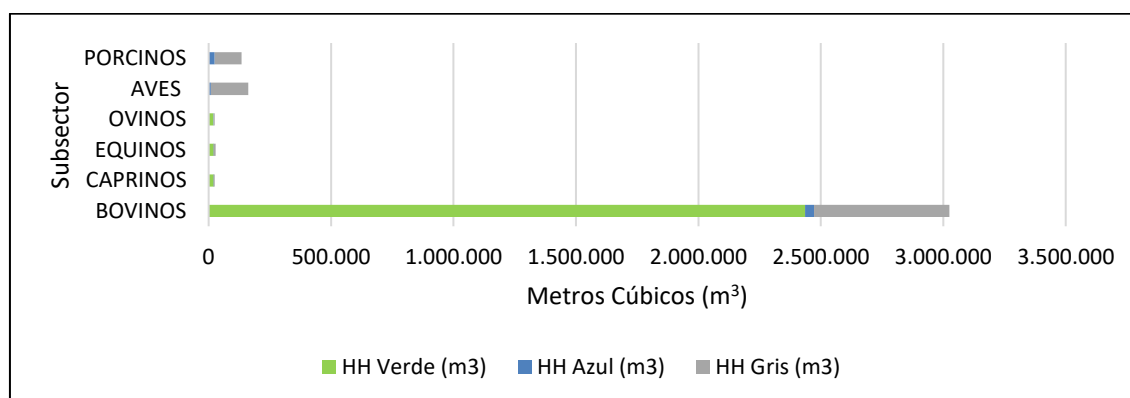
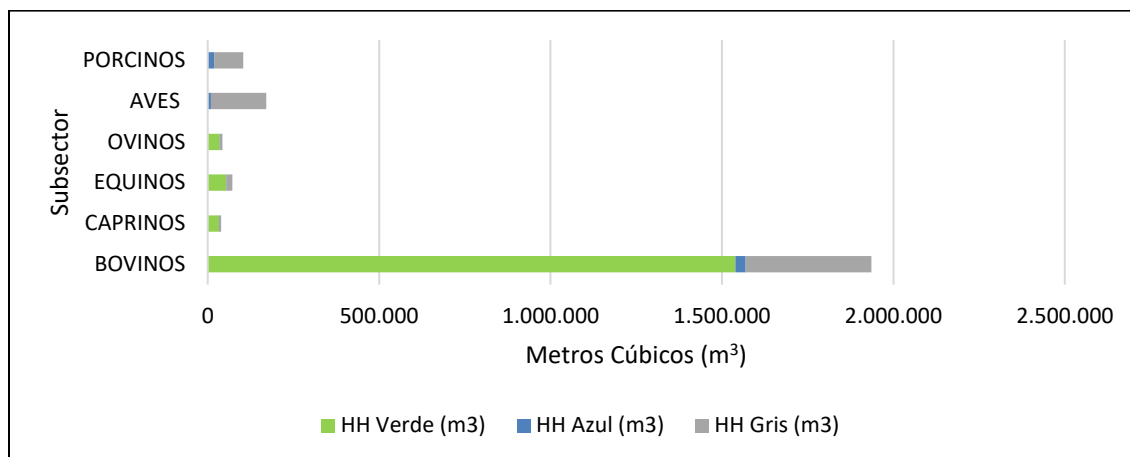
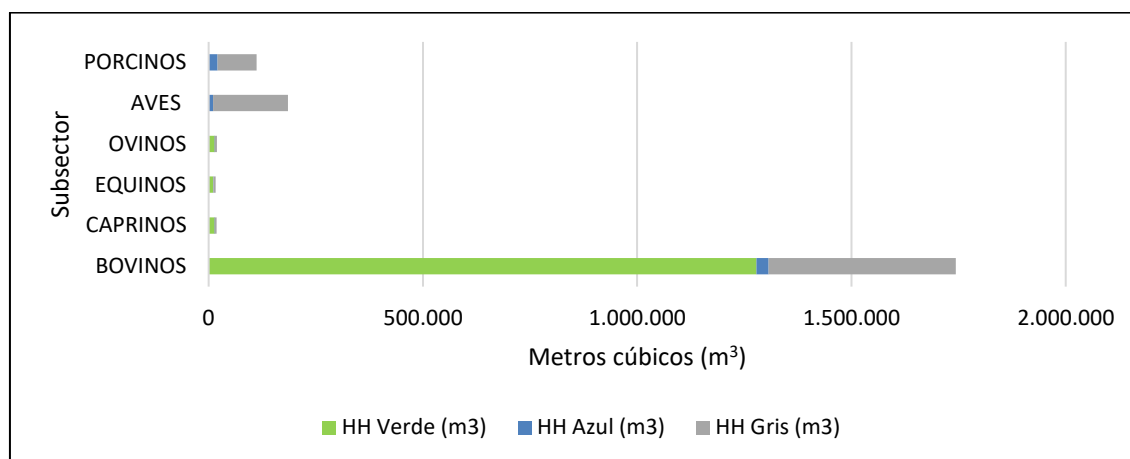


Figura 45. *Huella hídrica pecuaria por subsector, año normal (2019).***Figura 46.** *Huella hídrica pecuaria por subsector, año seco (2015).*

4.6.1 Huella hídrica pecuaria por tonelada

Se determinó la huella hídrica virtual para los diferentes subsectores en cada uno de los años de estudio. Se observó que el sector caprino, seguido de los ovinos y bovinos, son los sectores que mayor HH virtual poseen. Respecto a la HHV virtual, los caprinos y ovinos son los que poseen los valores más altos, esto se debe a que tienen un requerimiento de materia seca, como porcentaje de peso, superior a los bovinos y los equinos. En cuanto a la HHA virtual, los porcinos y los bovinos

son los que lideran la tabla, aunque los bovinos son animales de volúmenes grandes, y su consumo directo de agua también lo es, el mantenimiento de los porcinos, sumado al lavado de las porquerizas, los posicionan como los animales del área de estudio que mayor agua azul requieren. De forma similar, los porcinos, seguido de los caprinos y ovinos son las especies que poseen mayor HHG virtual, las causas radican en la cantidad relativa de nitrógeno aportado en sus heces, así mismo, se tiene en cuenta el aporte a la HHG de la fertilización de los pastos, y los caprinos y ovinos poseen un mayor requerimiento relativo de materia seca. En la Tabla 21 se muestra una comparación entre las HH virtuales pecuarias para cada uno de los años estudiados.

Tabla 21. Comparación de las huellas hídricas virtuales pecuarias.

Húmedo 2010				
GANADO	HHV Virtual (m³/t)	HHA Virtual (m³/t)	HHG Virtual (m³/t)	HH Virtual (m³/t)
CAPRINOS	6145.62	28.29	1248.28	7422.19
OVINOS	4842.75	40.27	1138.67	6021.68
BOVINOS	3309.57	50.57	750.17	4110.31
EQUINOS	1843.69	42.18	622.99	2508.85
PORCINOS	0.00	328.50	1473.11	1801.61
AVES	0.00	46.76	814.26	861.02
Seco 2015				
GANADO	HHV Virtual (m³/t)	HHA Virtual (m³/t)	HHG Virtual (m³/t)	HH Virtual (m³/t)
CAPRINOS	3683.88	28.29	1171.51	4883.68
OVINOS	2902.90	40.27	1078.17	4021.34
BOVINOS	1983.08	43.78	677.93	2704.79
PORCINOS	0.00	328.50	1473.11	1801.61
EQUINOS	1105.17	42.18	599.96	1747.30
AVES	0.00	46.76	814.26	861.02
Normal 2019				
GANADO	HHV Virtual (m³/t)	HHA Virtual (m³/t)	HHG Virtual (m³/t)	HH Virtual (m³/t)
CAPRINOS	5959.84	28.29	1128.56	7116.68
OVINOS	4696.35	40.27	1044.33	5780.95
BOVINOS	3204.78	62.57	762.75	4030.10
EQUINOS	1787.95	42.18	587.07	2417.20
PORCINOS	0.00	328.50	1473.11	1801.61
AVES	0.00	46.76	814.26	861.02

4.6.2 Huella hídrica pecuaria mensual.

Se calculó la HH pecuaria a escala mensual para cada uno de los años de estudio. Respecto a la HH azul y HH gris, es necesario mencionar que sus valores son constantes para todos los meses de los diferentes años, pues, se estableció que el consumo de agua de los animales, sus deposiciones, y la fertilización de los pastos se realizan en cantidades iguales en cada mes. Por otra parte, la HHV presenta variaciones y están directamente relacionadas a las precipitaciones registradas en el área de estudio. De acuerdo con lo anterior, se resaltan los meses de mayor consumo para cada uno de los años; en el año húmedo (2010), destacan mayo, septiembre y noviembre; en el año normal (2019), marzo, abril y mayo; en el año seco (2015), febrero, marzo y mayo. En las Figuras 47, 48 y 49 se presenta la HH pecuaria mensual distribuida en sus componentes para cada uno de los años de estudio.

Figura 47. Huella hídrica pecuaria a escala mensual, año húmedo (2010).

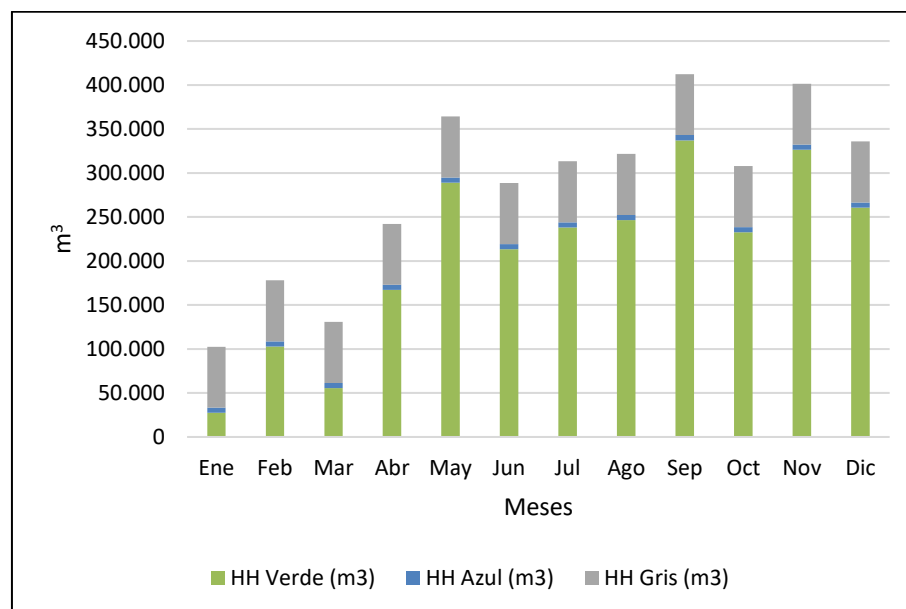
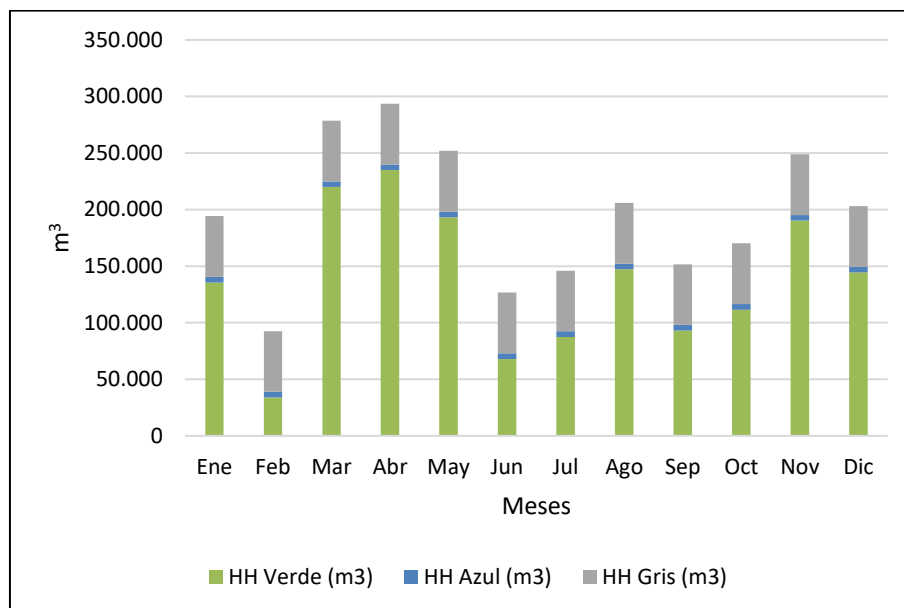
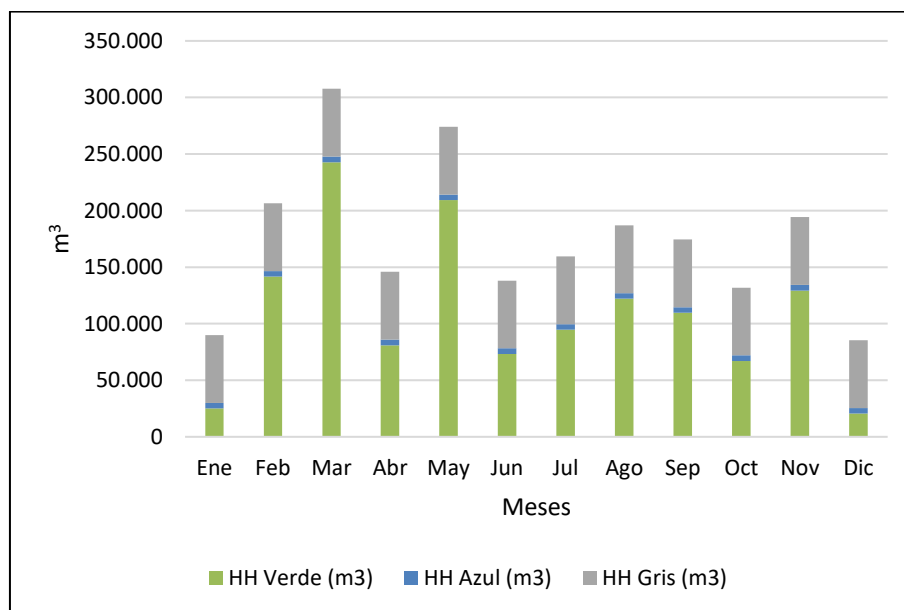


Figura 48. *Huella hídrica pecuaria a escala mensual, año normal (2019).***Figura 49.** *Huella hídrica pecuaria a escala mensual, año seco (2015).*

4.7 Análisis de sostenibilidad

Teniendo en cuenta la metodología planteada en [1], se realizó el análisis de sostenibilidad de la HH verde, azul y gris para cada uno de los años de estudio. A rasgos generales, en ninguno de los meses de los 3 años estudiados se observa que la demanda sea superior a la oferta, o que la carga de nitrógeno contaminante sea superior a la que el cuerpo de agua es capaz de asimilar. A continuación, se presenta el análisis de sostenibilidad para cada uno de los componentes de la HH total.

4.7.1 Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica verde

En primera instancia se calculó el índice de escasez de agua verde de la microcuenca río Suratá bajo ubicado en Bucaramanga para cada uno de los años de estudio. Es posible observar que, para ninguno de los años estudiados, se obtuvieron valores por encima del rango de sostenibilidad, es decir, por encima del 100%. Los valores más altos en cada uno de los años fueron los siguientes: para el 2010 (año húmedo), el porcentaje de escasez más alto corresponde al mes de septiembre y es de 15.78%. Para el 2019 (año normal), el índice de escasez llegó a un 20,42% en el mes de abril y finalmente, para el año 2015 identificado como el año seco, el porcentaje más alto de escasez fue de 15.81% en el mes de marzo. En términos de escasez de agua se puede afirmar que, la cuenca es capaz de cumplir con la demanda de agua verde generada por las actividades que en esta se llevan a cabo. En las figuras 50, 51 y 52 se muestran la comparación entre la HHV con la oferta de agua verde para cada uno de los años de estudio.

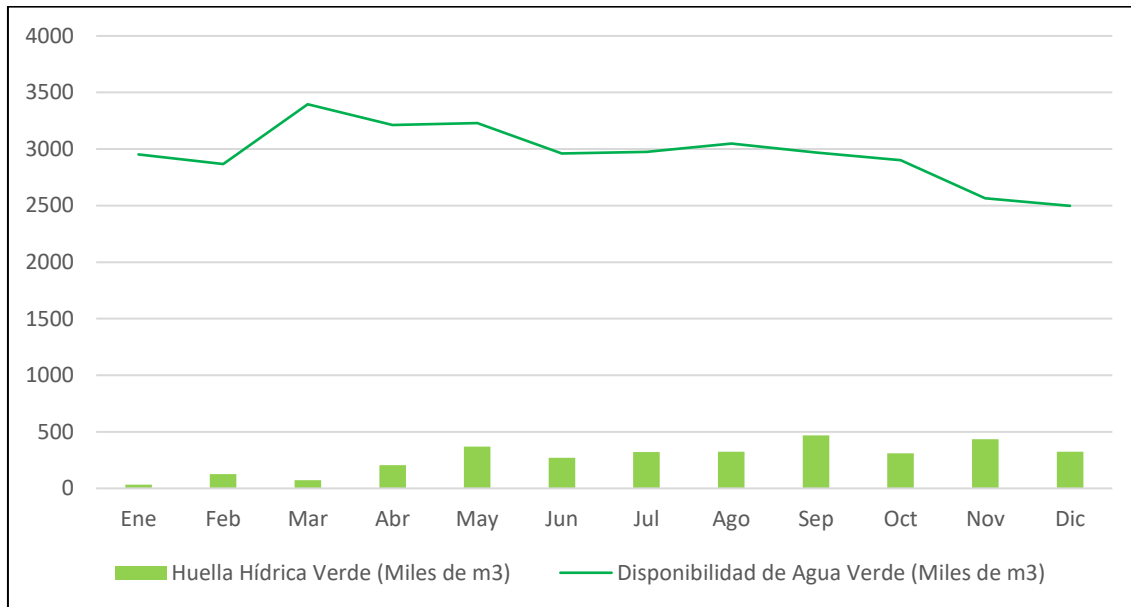
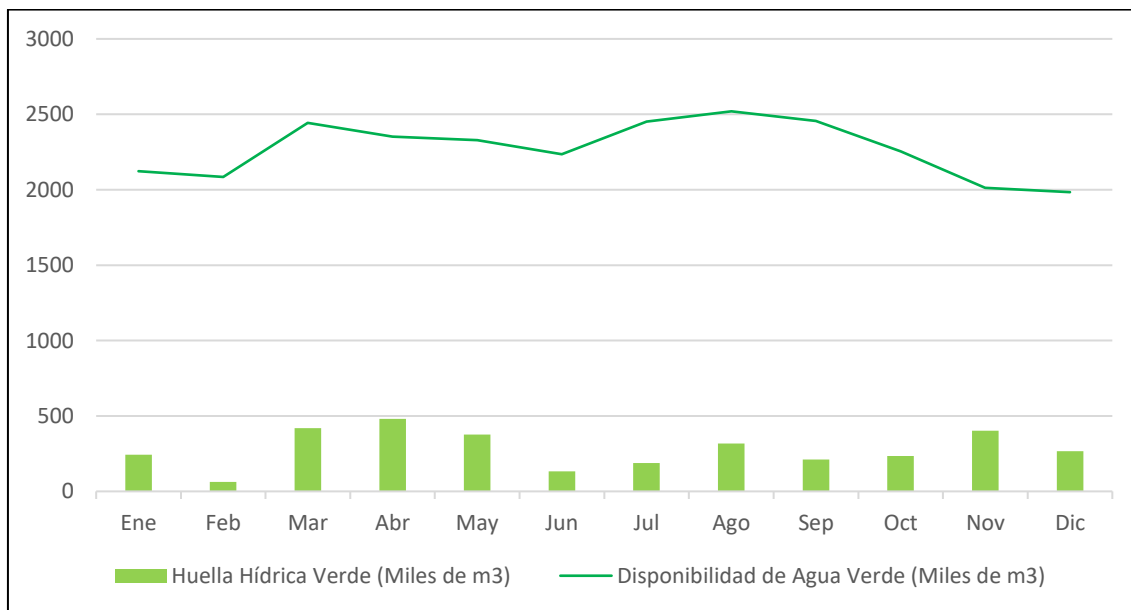
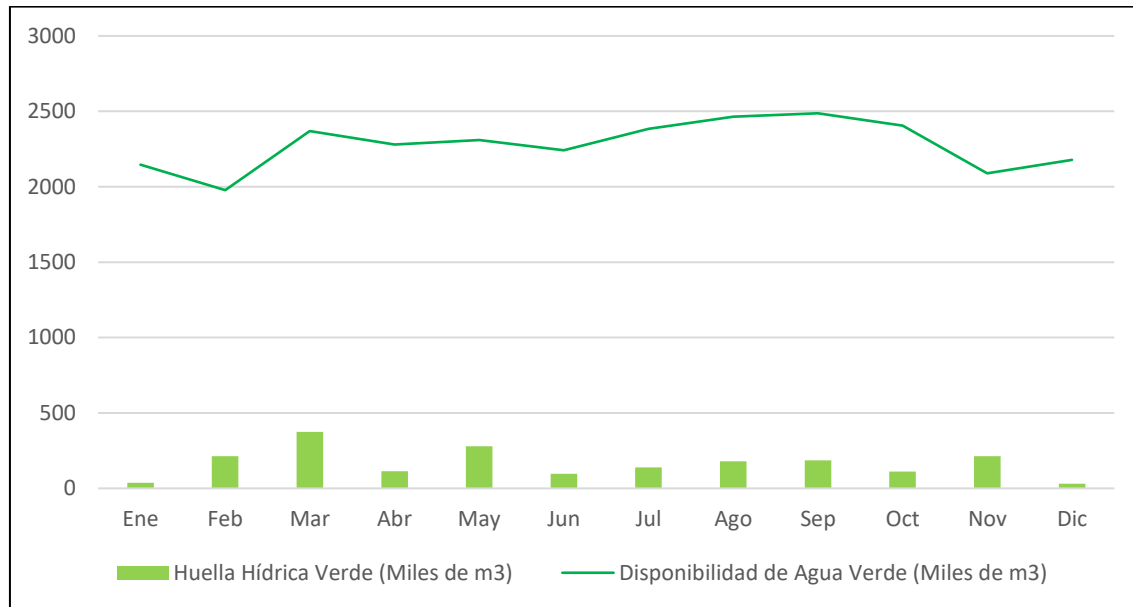
Figura 50. Huella hídrica verde vs oferta de agua verde, año húmedo (2010).**Figura 51.** Huella hídrica verde vs oferta de agua verde, año normal (2019).

Figura 52. *Huella hídrica verde vs oferta de agua verde, año seco (2015).*

4.7.2 Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica azul

Se determinó el índice de escasez de agua azul para el área de la microcuenca río Suratá bajo ubicado en Bucaramanga para cada uno de los años de estudio. Se observa en los resultados que, en ninguno de los meses evaluados, la demanda es superior a la oferta, por lo tanto, en términos de cantidad de agua, la cuenca puede suministrar el agua necesaria para llevar a cabo las actividades agropecuarias. Para el año húmedo (2010), se destaca el mes de marzo con un índice de escasez de 5.96%; para el año normal (2019) febrero con un 5%; y para el año seco (2015) diciembre con un 4.68%. En las figuras 53, 54 y 55 se muestran la comparación entre la HHA con la oferta de agua azul para cada uno de los años de estudio.

Figura 53. *Huella hídrica azul vs oferta de agua neta, año húmedo (2010).*

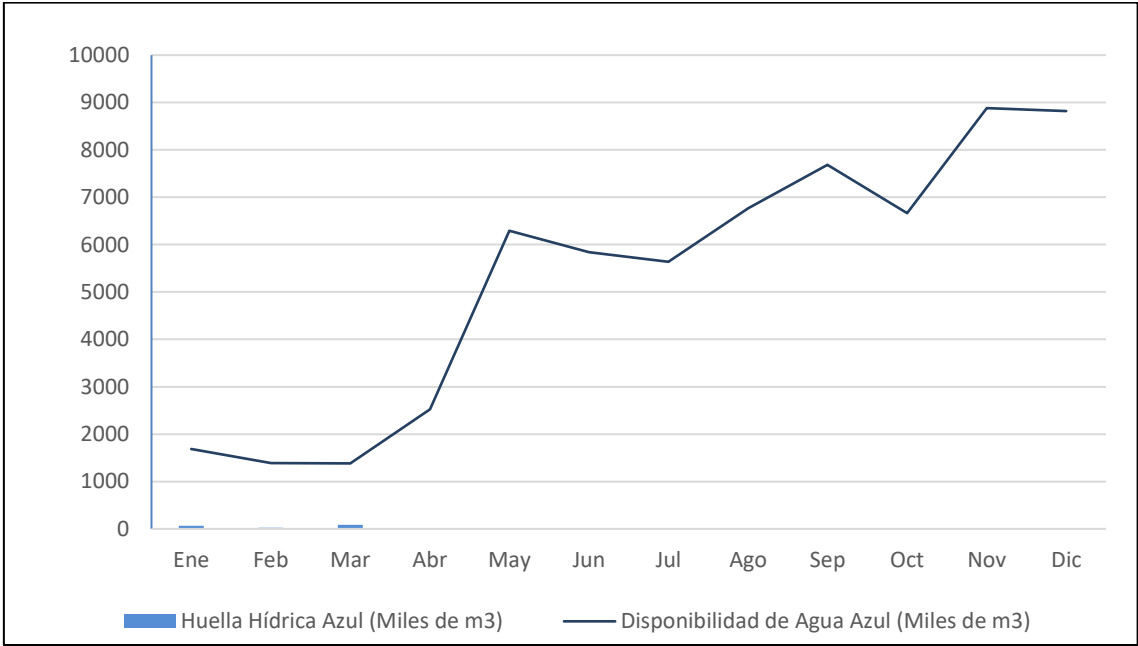


Figura 54. *Huella hídrica azul vs oferta de agua neta, año normal (2019).*

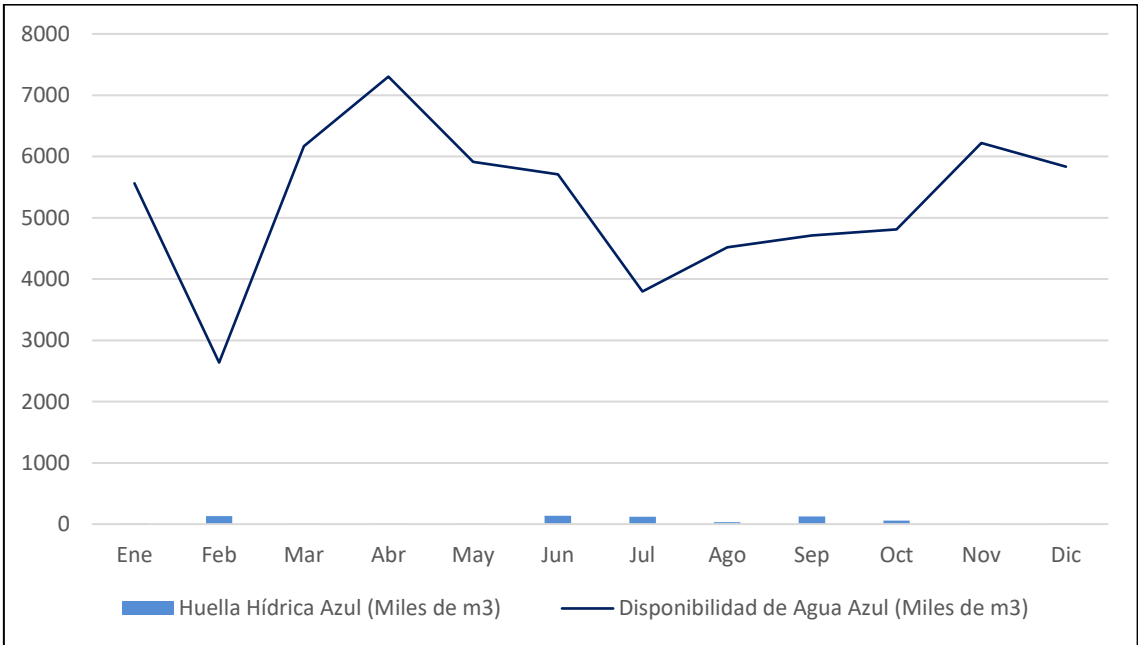
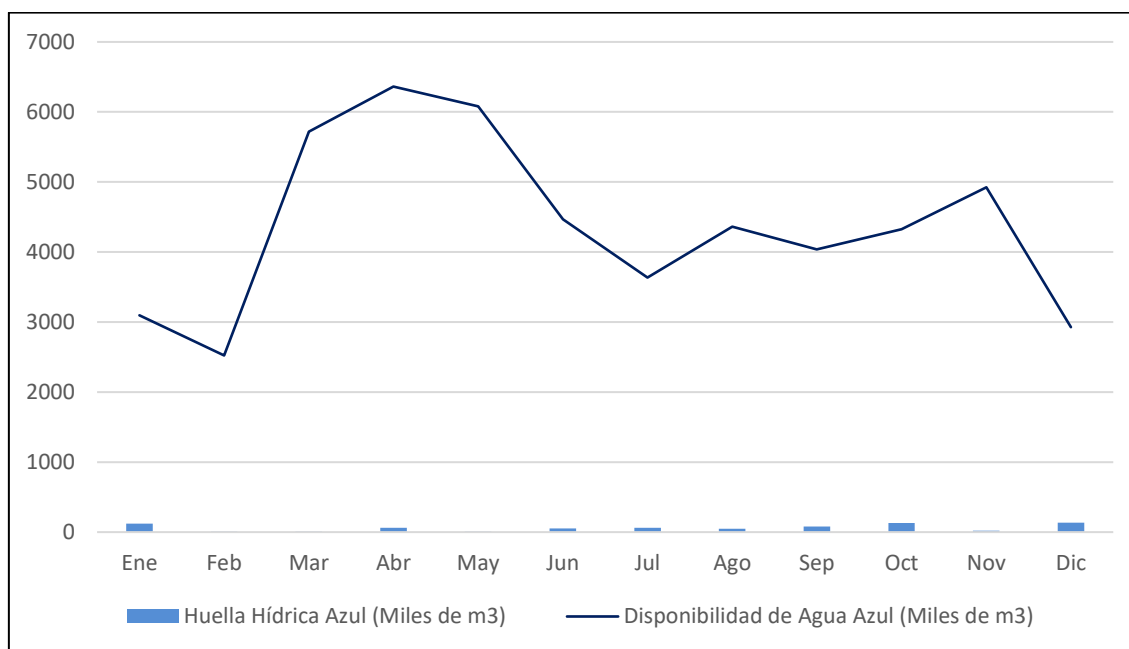


Figura 55. *Huella hídrica azul vs oferta de agua neta, año seco (2015).*

4.7.3 *Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica gris*

Se determinó también el nivel de contaminación del agua (NCA) según la metodología planteada por Hoesktra, et al. [1], y se observó en los resultados que, en términos de volumen de agua, el área de estudio tiene la capacidad de asimilar el nitrógeno aportado por las actividades agrícolas y pecuarias que allí se realizan. En cuanto a la variabilidad climática, el año húmedo (2010) registra un NCA máximo de 5.85% en el mes de marzo; el año normal (2019) presenta un NCA máximo de 2.51% en febrero; y el año seco (2015) un NCA máximo de 2.65% en febrero también. Por otra parte, estos resultados por sí solos no permiten identificar la calidad del agua en la región, pues, solo tienen en cuenta dos sectores productivos y una sola fuente de contaminación (nitrógeno) [3]. En las figuras 56, 57 y 58 se muestra la comparación entre la HHG con la oferta natural regulada para cada uno de los años.

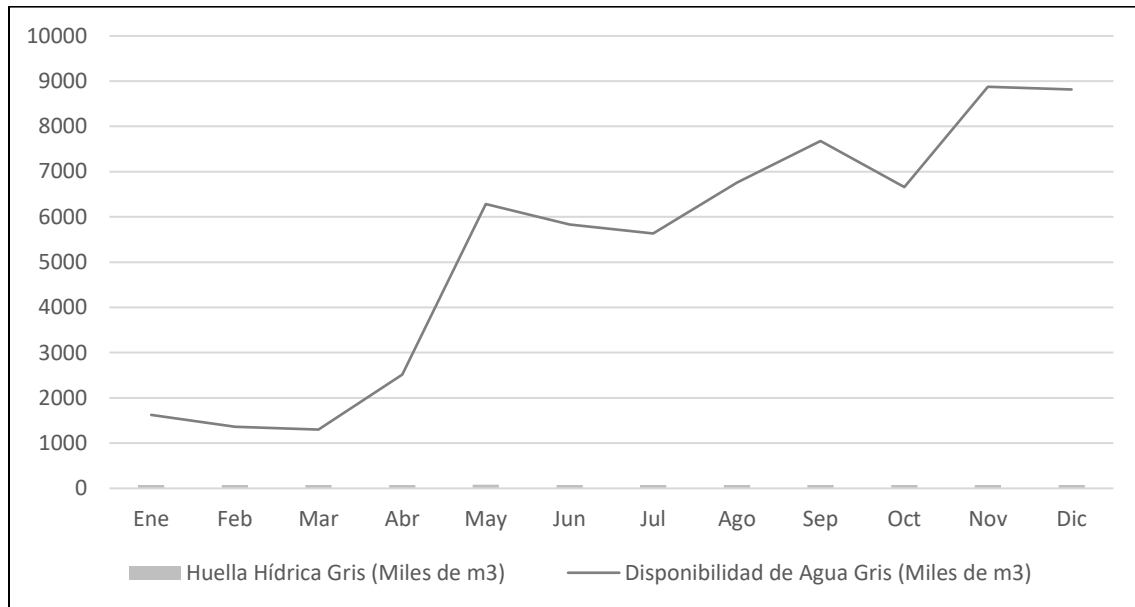
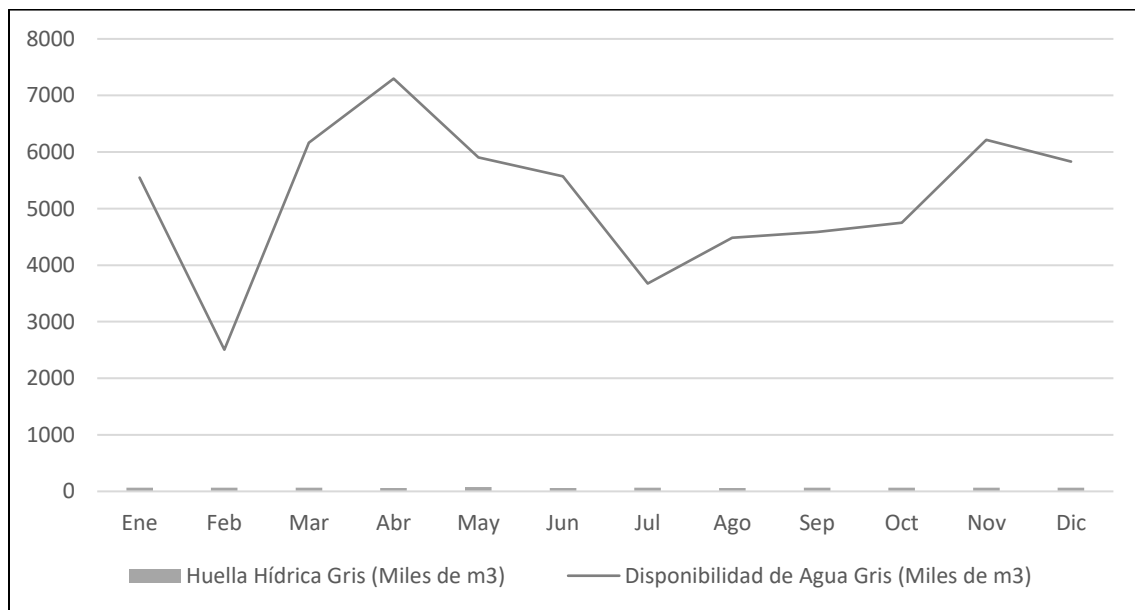
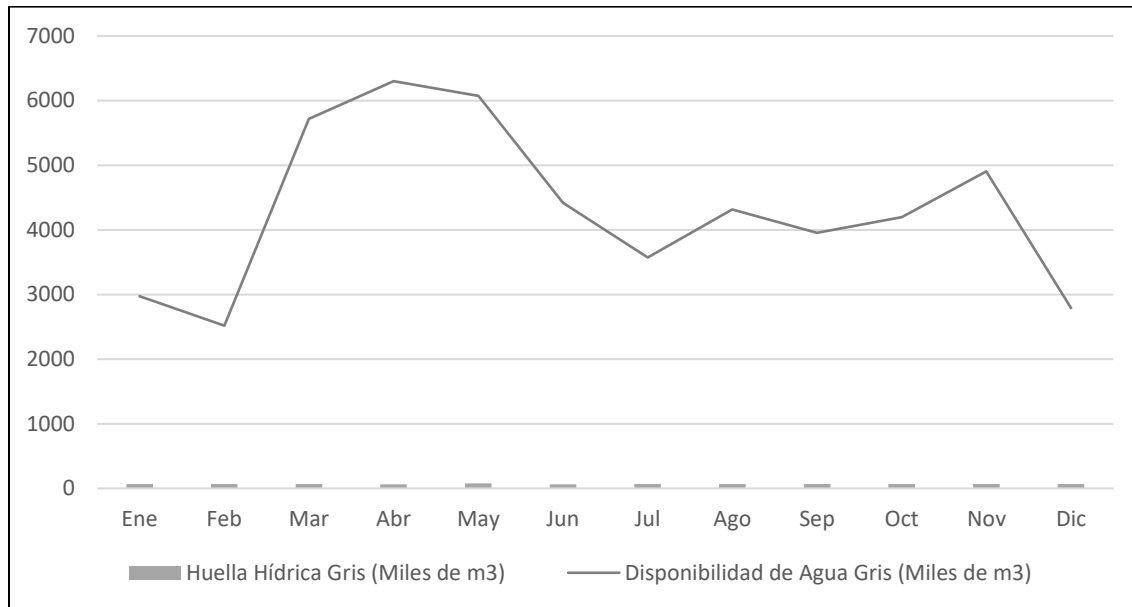
Figura 56. Huella hídrica gris vs oferta natural regulada, año húmedo (2010).**Figura 57.** Huella hídrica gris vs oferta natural regulada, año normal (2019).

Figura 58. *Huella hídrica gris vs oferta natural regulada, año seco (2015).*

5. Discusión

En términos generales, es posible afirmar que el comportamiento de la HH agropecuaria para la porción de la microcuenca Río Suratá Bajo que se encuentra dentro del municipio de Bucaramanga es similar a la HH agropecuaria nacional, puesto que en ambas el componente verde es predominante para el tema de la producción agrícola y pecuaria. En el contexto suramericano, Arévalo, D. [41] compara 4 sectores productivos y resalta que la HH agrícola (70%), es superior a la HH pecuaria (26%). Sin embargo, debido a la predominancia de pastos en las coberturas de la zona de estudio, el sector pecuario es predominante en los años 2010 y 2015; en el año 2019 se observa un aumento en las áreas de cultivos y de bosques según lo registrado por el IGAC y el ICA, motivo por el cual la HH agrícola es mayor a la pecuaria por una pequeña diferencia.

Realizando una comparación, a nivel nacional se estimó que la HH agrícola estaba distribuida en sus componentes de la siguiente manera: 88% verde, 7% azul y 5% gris [41]. Este comportamiento es similar al observado en el presente estudio para el año húmedo (2010) ya que

los porcentajes fueron 76,5%, 16,6% y 6,9% para los componentes verde, azul y gris, respectivamente. Sin embargo, si se compara esta tendencia con el año normal (2019) y el seco (2015), los valores tienden a diferir, aumentando la participación porcentual del componente azul de la siguiente manera: para el año normal se distribuyó en un 70,3% verde, 24,1% azul y 5,6% la gris y finalmente, para el año seco, se distribuyó en un 46,3% verde, 47,1% azul y 6,6% gris. Estos cambios se deben a que en épocas donde ocurre menos precipitación las zona de cultivos aumentan sus requerimientos de agua azul. Igualmente, si se compara con cifras a nivel departamental, se puede observar que este comportamiento se mantiene [41]

A nivel de HH total por producto agrícola, en [41] se estima que para el año 2012 el café (22%), el maíz (13%) y el arroz (12%) son los tres productos que más HH aportan. Comparando esto con el presente estudio, se evidencia que el café es el producto que más aporta a la HH total agrícola, esto se debe a que este es el principal cultivo nacional en cuanto a superficie sembrada y exportación, también se puede apreciar que en términos de HHG el comportamiento es similar puesto que la mayor parte de esta huella se encuentra asociada al beneficio del café. Es importante señalar que el segundo producto con mayor participación en cuanto a HH total agrícola fue el cacao, el cual a nivel mundial está por encima del café en cuanto a aporte de HH total.

En cuanto a HH virtual, Builes [3] presenta en su estudio que cultivos como el cacao, el café y el fique son los que más contenido de agua virtual aportan en la cuenca del Río Porce. Mientras que, a nivel nacional, productos como el café, la palma africana, el banano y las flores son los que mayor implicación relativa tienen en cuanto al flujo de agua virtual [41]. A nivel mundial, Mekonnen y Hoesktra [42], señalan que, los productos que mayor implicación de flujo de agua virtual tienen son, el cacao seguido del café y el algodón. Se compararon también los valores de la HH virtual agrícola para algunos cultivos del área de estudio en los diferentes años de

variabilidad climática, con los valores obtenidos por autores como Builes [3], en la microcuenca del río Porce y con Mekonnen y Hoekstra [42], para el departamento de Santander, obtenidos de la herramienta WaterStat. En las Tablas 22, 23 y 24 se realiza la comparación entre los resultados de la HH virtual calculada en la zona de estudio para los diferentes cultivos, con los resultados obtenidos por Builes en la cuenca del Porce y con los resultados de Mekonnen y Hoekstra para el departamento de Santander.

Tabla 22. Comparación huella hídrica virtual, año húmedo (2010).

Cultivo	Zona de estudio, año húmedo (2010)			Builes (Porce, Antioquia)			Mekonnen y Hoekstra (Santander)		
	Verde	Azul	Gris	Verde	Azul	Gris	Verde	Azul	Gris
Café	15597.6	6363.8	1464.0	7460.0	0.0	0.0	11504.0	0.0	1327.0
Cacao	6293.0	3085.0	657.4	19428.0	0.0	346.0	22720	0	732
Maíz	5513.2	763.3	126.1	5696.0	0.0	141.0	2277.0	1.0	187.0
Frijol	3610.5	191.5	172.1	4269.0	0.0	187.0	2508.0	0.0	31.0
Yuca	1930.5	0.0	163.2	-	-	-	577.0	0.0	3.0
Cebolla junca	1017.8	322.3	471.3	402.0	431.0	13.0	-	-	-
Pitahaya	1384.6	201.8	20.6	-	-	-	-	-	-
Aguacate	1271.9	181.0	71.3	-	-	-	905.0	0.0	1.0
Limón	1046.9	187.5	56.7	-	-	-	514.0	0.0	1.0
Naranja	937.5	167.9	56.8	-	-	-	666.0	1.0	1.0
Guanábana	732.9	142.4	14.7	-	-	-	-	-	-
Pepino Coh.	546.8	43.9	112.1	-	-	-	265.0	1.0	75.0
Mora	428.5	2.3	29.6	-	-	-	-	-	-
Lechuga	344.5	64.7	28.9	-	-	-	188.0	2.0	52.0
Tomate	290.7	84.8	25.4	-	-	-	197.0	0.0	37.0
Pimentón	266.7	49.8	16.6	-	-	-	264.0	12.0	64.0
Habichuela	245.7	0.0	14.0	-	-	-	-	-	-
Repollo	145.2	35.9	1.8	-	-	-	119.0	1.0	21.0
Maracuyá	168.6	0.0	2.1	-	-	-	-	-	-
Promedio	2198.6	625.7	184.5	7451.0	86.2	137.4	3284.9	1.4	194.8

Tabla 23. Comparación huella hídrica virtual, año seco (2015).

Cultivo	Zona de estudio, año seco (2015)			Builes (Porce, Antioquia)			Mekkonnen y Hoekstra (Santander)		
	Verde	Azul	Gris	Verde	Azul	Gris	Verde	Azul	Gris
Cacao	7896.0	9720.0	799.2	19428.0	0.0	346.0	22720	0	732
Café	3975.9	5132.6	776.9	7460.0	0.0	0.0	11504.0	0.0	1327.0
Frijol	4617.1	2487.9	337.5	4269.0	0.0	187.0	2508.0	0.0	31.0
Maíz	1914.7	2148.2	116.6	5696.0	0.0	141.0	2277.0	1.0	187.0
Aguacate	653.1	422.3	90.6	-	-	-	905.0	0.0	1.0
Limón	638.6	386.8	59.7	-	-	-	514.0	0.0	1.0
Pitahaya	748.0	242.3	19.3	-	-	-	-	-	-
Naranja	571.7	346.3	68.7	-	-	-	666.0	1.0	1.0
Habichuela	309.0	253.3	35.1	-	-	-	-	-	-
Yuca	255.5	249.5	48.7	-	-	-	577.0	0.0	3.0
Tomate	163.1	231.5	22.2	-	-	-	197.0	0.0	37.0
Promedio	1976.6	1965.5	215.9	9213.3	0.0	168.5	4652.0	0.2	257.8

Tabla 24. Comparación huella hídrica virtual, año normal (2019).

Cultivo	Zona de estudio, año normal (2019)			Builes (Antioquia, Colombia)			Mekkonnen y Hoekstra (Santander)		
	Verde	Azul	Gris	Verde	Azul	Gris	Verde	Azul	Gris
Cacao	7665.0	2506.3	494.7	19428.0	0.0	346.0	22720	0	732
Café	4716.4	2524.8	683.6	7460.0	0.0	0.0	11504.0	0.0	1327.0
Frijol	4985.9	310.6	289.0	4269.0	0.0	187.0	2508.0	0.0	31.0
Maíz	3535.6	1678.3	92.9	5696.0	0.0	141.0	2277.0	1.0	187.0
Guanábana	2748.3	592.3	74.3	-	-	-	-	-	-
Pitahaya	1923.0	606.0	43.1	-	-	-	-	-	-
Aguacate	1089.3	169.6	63.0	-	-	-	905.0	0.0	1.0
Tomate	785.8	274.2	80.1	-	-	-	197.0	0.0	37.0
Uva	806.1	101.5	14.5	-	-	-	-	-	-
Naranja	588.6	115.1	30.5	-	-	-	666.0	1.0	1.0
Limón	490.5	95.9	26.9	-	-	-	514.0	0.0	1.0
Habichuela	402.0	60.8	26.0	-	-	-	-	-	-
Yuca	256.2	148.8	33.9	-	-	-	577.0	0.0	3.0
Plátano	269.9	127.5	8.7	2051.0	0.0	39.0	1662.0	5.0	2.0
Promedio	2161.6	665.1	140.1	7780.8	0.0	142.6	4353.0	0.7	232.2

En las Figuras 59, 60 y 61 se comparan gráficamente los resultados de la HH virtual de los cultivos en la zona de estudio con los resultados obtenidos por Builes, así como los resultados

obtenidos por Mekonnen y Hoekstra. Es necesario mencionar que la comparación se realizó únicamente a los cultivos en común, lo que permitió obtener los coeficientes de determinación.

Figura 59. Comparación gráfica de los resultados de HH agrícola virtual, con Builes (2013) y Mekonnen y Hoekstra (2011), año húmedo (2010).

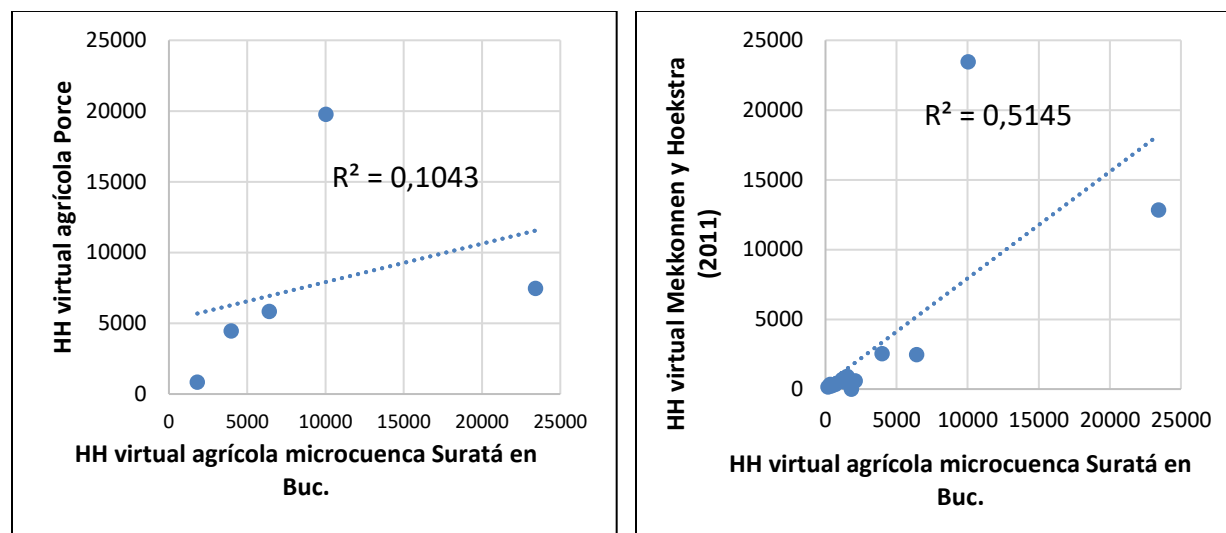


Figura 60. Comparación gráfica de los resultados de HH agrícola virtual, con Builes (2013) y Mekonnen y Hoekstra (2011), año seco (2015).

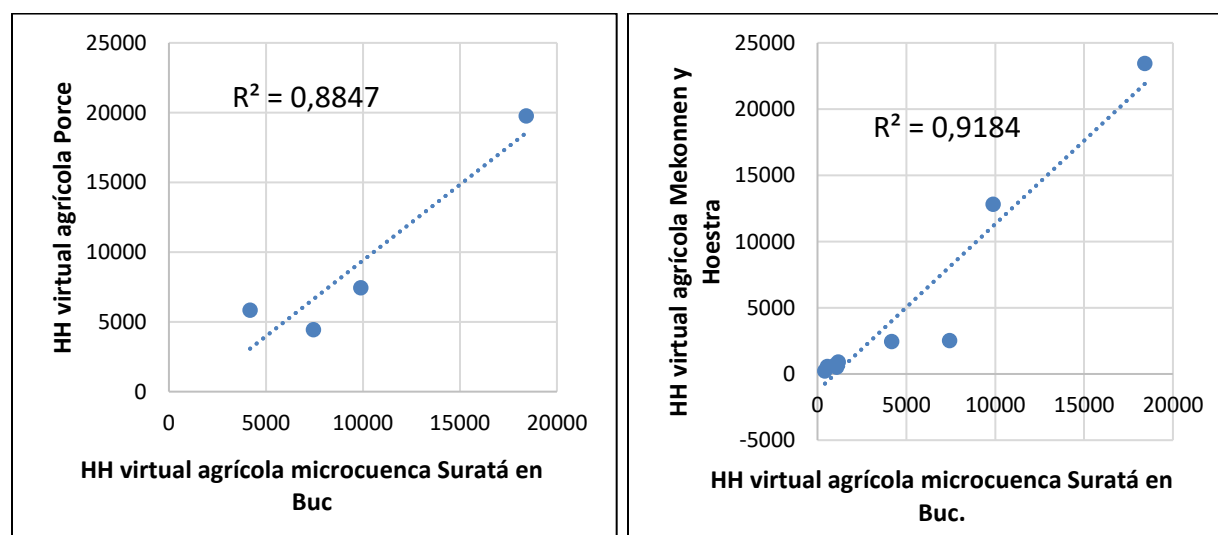
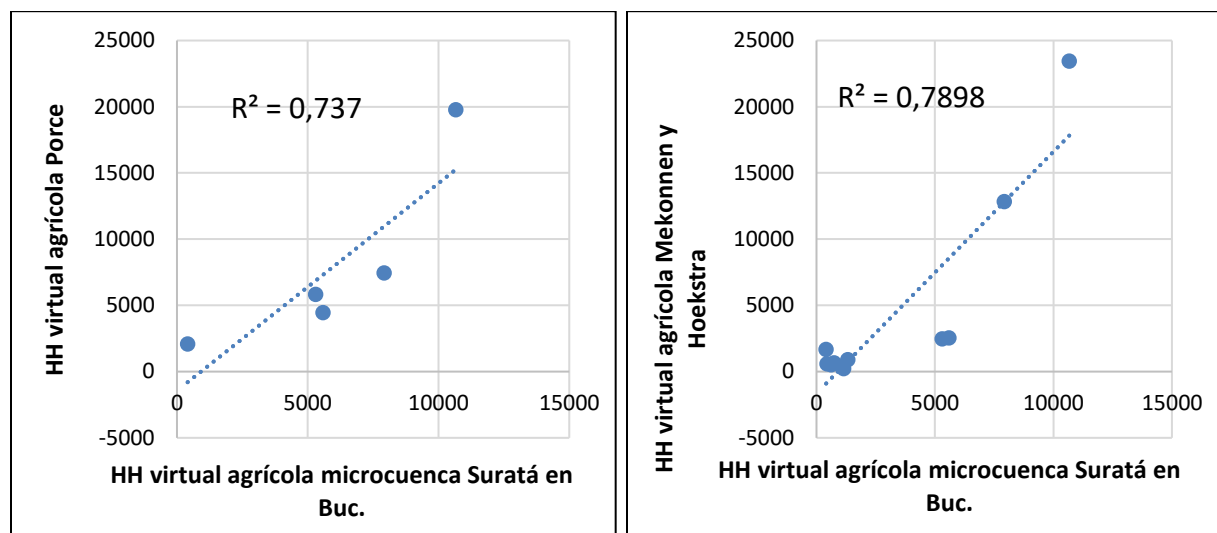


Figura 61. Comparación gráfica de los resultados de HH agrícola virtual, con Builes (2013) y Mekonnen y Hoekstra (2011), año normal (2019).



Al relacionar los cultivos en común, de los resultados obtenidos en este estudio con los resultados de la microcuenca del río Porce se obtuvieron valores de r^2 de 0.104, 0.885 y 0.737 para los años húmedo, seco y normal, respectivamente; resaltando que para el año húmedo la concordancia es mínima. Por otra parte, cuando se compara con los resultados de Mekonnen y Hoekstra [42], para el departamento de Santander se obtienen valores de r^2 de 0.514, 0.918 y 0.79. Es necesario mencionar que, aunque ambos son contextos colombianos, la comparación con Mekonnen y Hoekstra es más acertada, ya que el área de estudio se ubica en Santander, asimismo, en contextos de precipitaciones altas los resultados tienden a diferir más de lo encontrado por dichos autores.

En cuanto al comportamiento de la HH pecuaria calculada, se observa una distribución porcentual de la HH verde, HH azul y HH gris, de la siguiente manera respectivamente; para el año húmedo, 73.4%, 2.1% y 24.5%; para el año normal, 70.2%, 2.5% y 27.2%; y para el año seco, 62.9%, 2.8% y 34.3%. Posee similitudes con los resultados de Builes [3], con un 66% verde, 2% azul y 33% gris, para el sector pecuario de la cuenca del río Porce. Por otra parte, el ENA 2018

estima para el sector pecuario a nivel nacional que alrededor del 97.7% es HH verde y el 2.3% es HH azul, no tuvieron en cuenta la HH gris [4]. A nivel mundial, Mekonnen y Hoekstra [43] determinaron la HH de los productos de animales de granja para el periodo 1996-2005, donde el 87.2% fue HH verde, 6.2% HH azul y 6.6% HH gris. Cabe destacar que, en el contexto nacional y mundial, la HH verde es la de mayor relevancia en el sector pecuario.

En temas de sostenibilidad ambiental, la microcuenca Río Suratá bajo se encuentra muy por debajo del umbral de desabastecimiento, esto se puede apreciar en la tabla 23. A partir de esta, es posible afirmar que la porción de microcuenca analizada tiene la capacidad de satisfacer los requerimientos de agua verde, azul y gris para las actividades tanto agrícolas como pecuarias. Estos valores fueron validados con los valores de oferta y disponibilidad en los planes de ordenamiento y manejo de cuencas existentes dentro de la cuenca Río Suratá. Se puede apreciar que la cuenca tiene la capacidad de asimilar la carga contaminante de las actividades agropecuarias en gran medida, sin embargo, no se puede dejar de lado el hecho que, en este estudio solo se analizó el Nitrógeno como contaminante, por lo cual los valores acá expuestos podrían incrementarse ya que existen más tipos de contaminantes como el fosforo o los pesticidas. Es importante señalar que también existen otras actividades que resulta pertinente analizar desde el punto de vista de la HH y la sostenibilidad ambiental puesto que, pueden llegar a tener consumos de agua y aportes de cargas contaminantes más elevados como lo es el caso de la minería, las actividades domésticas, industriales, entre otras.

En la Tabla 25 se muestra el porcentaje de escasez máximo presentado para cada año. Este porcentaje sirve para realizar comparaciones con los planes de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca.

Tabla 25. *Porcentaje de escasez máximo presentado para cada año.*

Tipo de huella	% De escasez (valor más alto registrado en el año)		
	Año húmedo (2010)	Año normal (2019)	Año seco (2015)
HH verde	15,78%	20,42	15,81
HH azul	5,96%	5%	4,68%
HH gris (NCA)	5,85%	2,51%	2,65%

Nota. Los valores corresponden al valor máximo mensual registrado para cada año seleccionado.

Al comparar los valores de escasez presentados en este estudio con los presentados en el POMCA Río Surata bajo, se puede apreciar que los valores se aproximan bastante. En el POMCA [20], se plantea un índice de escasez de 28.2% para la microcuenca y en el presente estudio se tienen valores de (Hhverde + Hhazul): 21.74%, 25.42% y 20.49% para los años húmedo, normal y seco respectivamente, sin embargo, es necesario tener en cuenta que los resultados planteados en el POMCA se encuentran desactualizados y tienen en cuenta demandas hídricas por concesiones de agua y usos domésticos, razones por las cuales estos valores hoy podrían tener variaciones significativas.

La innovación es un aspecto fundamental en la investigación ya que permite la exploración de nuevas ideas y enfoques para resolver problemas existentes. Por eso es importante señalar el aporte que realiza [44], pues este estudio presenta un enfoque integral entre el uso de la teledetección y la modelación de simulaciones de cultivos para la cuantificación de la huella hídrica de un cultivo de trigo en la cuenca del río Indo, en Pakistán. Este estudio destaca la importancia de utilizar enfoques integrados de teledetección y modelos de simulación de cultivos para cuantificar la huella hídrica en áreas agrícolas y proporciona información valiosa sobre los patrones de uso del agua en la cuenca del Indo.

6. Conclusiones

El presente estudio, en el que se estimó la huella hídrica agropecuaria para el área de la microcuenca Río Surata bajo que se encuentra en el municipio de Bucaramanga, evidencia que para los años 2010, 2019 y 2015 (años húmedo, normal y seco respectivamente) la huella agrícola es 993.766 m³, 2'381.692 m³ y 1'428.930 m³, respectivamente. En cuanto a la huella hídrica pecuaria para los mismos años, el resultado fue: 3'398.961 m³, 2'363.593 m³ y 2'094.504 m³, respectivamente. Para los años húmedo y seco (2010 y 2015), la huella hídrica pecuaria total fue superior a la huella hídrica agrícola total, mientras que para el año normal (2019) ocurre lo contrario. Esta situación se relaciona con el aumento de las áreas de cultivos, así como la disminución del área de pastos con el paso del tiempo.

Al revisar los componentes de las huellas tanto agrícola como pecuaria, es posible observar que la mayor parte de la proporción fue dada por la HH verde, esto confirma la importancia que tiene el agua verde en la producción de alimentos y de pastos para ganadería dentro de la cuenca, a su vez el cultivo que más contribuyó con la HH verde agrícola fue el café y en temas pecuarios, el ganado que más HH verde aportó fue el Bovino.

Con relación a la HHA agrícola, en los años húmedo y normal (16,6% - 24,1%) es posible observar que la proporción es menor a la HHV (76,5% - 70,3%), esto debido a que las precipitaciones cubren la mayor parte de la demanda de agua de los cultivos, a diferencia del año seco, donde se registró mayor HHA (47,1%) con respecto a la HHV de ese mismo año (46,3%) pues la precipitación no es suficiente para cubrir los requerimientos de riego. En temas específicos de productos agrícolas, los productos que más aportaron a la HHA fueron el café y el cacao para los años normal y seco; y el café y el tomate para el año húmedo. Ahora bien, en cuanto a la HHA

pecuaria, el ganado que más aporta a este componente es el bovino, debido a que en la zona este es el tipo de ganado que predomina.

Finalmente, en cuanto a la HH gris tanto agrícola como pecuaria se puede observar que posee valores bajos en comparación con los demás componentes, esto se debe a que este se estimó de manera conservadora teniendo en cuenta solamente el volumen de agua necesario para la asimilación de nitrógeno lixiviado de los fertilizantes y de las heces de los animales, dejando de lado otros contaminantes importantes como el fósforo o los pesticidas.

Respecto al contenido de agua virtual de las actividades agrícolas se resaltan el café y el cacao como los cultivos que mayor cantidad de agua requieren por tonelada de producto, con valores promedio de 13745.2 m³/ton y 13038.8 m³/ton, respectivamente. Con relación a las actividades pecuarias, la ganadería de caprinos, ovinos y bovinos presentan la mayor huella virtual con un promedio de 6474.2 m³/ton, 5274.7 m³/ton y 3615.1 m³/ton respectivamente. Sin embargo, la ganadería bovina representa un mayor impacto en el área de estudio por su gran extensión.

La variabilidad climática permitió comparar la distribución de los componentes de la huella hídrica, resaltando que para el año lluvioso se observa un aumento en el componente verde, mientras que para el año seco aumenta el componente azul. Por otra parte, es posible observar un aumento en la huella hídrica virtual de las actividades agrícolas en ambos extremos de la variabilidad climática, es decir, en el año húmedo y en el año seco.

En términos generales, es posible afirmar que el área de estudio cuenta con la disponibilidad del recurso para suplir las necesidades de las actividades tanto agrícolas como pecuarias que allí se desarrollan. Los resultados en este estudio muestran que a pesar de tener porcentajes de escasez cercanos al 20% como lo es el caso de la HHV en el año húmedo, que si bien, no son nada despreciables, se encuentran dentro del rango de sostenibilidad hídrica, pues los índices de escasez

estimados no superaron el 100% (ver Tabla 23). Sin embargo, es necesario aclarar que este estudio está centrado solo en el área de la microcuenca Río Surata bajo ubicada en Bucaramanga (33% de la microcuenca) y que se desconoce cuál es el estado de la totalidad de la microcuenca y de la cuenca Río Suratá. A pesar de esto, esta investigación puede ser usado como herramienta para brindar información de interés en la planeación de políticas para el manejo del recurso hídrico.

Referencias

- [1] A. Hoekstra, A. Chapagain, M. Aldaya, y M. Mekonnen, *The water footprint assessment manual*. London: Earthscan, 2011. [En línea]. Available: www.earthscan.co.uk
- [2] A. Y. Hoekstra, “Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis”, *Ecological Economics*, vol. 68, núm. 7, pp. 1963–1974, may 2009, doi: 10.1016/j.ecolecon.2008.06.021.
- [3] E. Builes, “Cuantificación y análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica agrícola y pecuaria de la cuenca del río Porce”, Magíster, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2013. [En línea]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/20267/1017142094.2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [4] IDEAM, *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá, Colombia, 2019. [En línea]. Available: https://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf
- [5] R. BIBO y el Espectador, “Un llamado para proteger el agua de Bucaramanga”, jun. 26, 2019. [En línea]. Available: <https://www.elespectador.com/ambiente/un-llamado-para-proteger-el-agua-de-bucaramanga-article-867924/>

- [6] Redacción Vanguardia, “Alerta por bajo caudal de cinco ríos en Santander”, Bucaramanga, oct. 14, 2015. [En línea]. Available: <https://www.vanguardia.com/santander/region/alerta-por-bajo-caudal-de-cinco-rios-en-santander-FBVL331765>
- [7] C. Polanco, “Indicadores ambientales y modelos internacionales para toma de decisiones”, *Gestión y Ambiente*, vol. 9, pp. 22–41, 2006, [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169420986007.pdf>
- [8] J. Arango, “Determinación de la huella hídrica del sector doméstico en la cuenca del río Porce”, Pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2013. [En línea]. Available: <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1396/1.%20TRABAJO%20DE%20GRADO%20-%20Determinaci%3bn%20de%20la%20huella%20h%C3%addrica%20del%20sector%20dom%3%a9stico%20en%20la%20cuenca%20del%20r%C3%ad.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [9] N. Tovar, J. Trujillo, S. Muñoz, M. Torres, y E. Zárate, “Evaluación de la sostenibilidad de los cultivos de arroz y palma de aceite en la cuenca del río Guayuriba (Meta, Colombia), a través de la evaluación de huella hídrica”, 2017.
- [10] V. Novoa, “Huella hídrica de la cuenca del río Cachapoal para la evaluación de la sostenibilidad ambiental”, Tesis doctoral, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 2016.
- [11] G. Salmoral, A. Dumont, M. Aldaya, A. Garrido, R. Rodríguez, y M. Llamas, “Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir”, 2011. [En línea]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/237045729>

- [12] M. García, A. Piñeros, F. Bernal, y E. Ardila, “Variabilidad climática, cambio climático y recurso hídrico en Colombia”, *Revista de Ingeniería*, vol. 36, pp. 60–64, 2012, [En línea]. Available: <https://revistas.uniandes.edu.co/doi/epdf/10.16924/revinge.36.11>
- [13] L. Reyes y E. Ramírez, “Cultura del agua y la protección del recurso hídrico en Colombia”.
- [14] G. Poveda, “La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna”, *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, vol. 28, pp. 201–222, 2004, [En línea]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/284691636>
- [15] IDEAM, “Clasificación de los Climas”, [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/clima-text.pdf>
- [16] IDEAM, “Atlas Interactivo IDEAM”, 2014. <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/>
- [17] CDMB, *Plan de ordenamiento y manejo ambiental subcuenca río Suratá*. 2006. [En línea]. Available: <https://economia.uniandes.edu.co/sites/default/files/webproyectos/santurban/POMCA-DOCUMENTO-UNIFICADO-SUBCUENCA-SURATA.pdf>
- [18] CDMB, “Gestión del recurso hídrico, en la jurisdicción de la CDMB”, 2014. [En línea]. Available: <https://www.cueesantander.com/media/97a8c2712248bdf3704be2cc1d45eb21.pdf>
- [19] IGAC, *Estudio general de suelos del departamento de Santander*. 2002. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/283557716/Suelos-de-Colombia>
- [20] CDMB, *Actualización POMCA río Alto Lebrija*. 2014.
- [21] A. Hoekstra, “Virtual water trade, proceedings of the international expert meeting on virtual water trade.”, Países Bajos, 2003.

- [22] IDEAM, “Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos”.
<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- [23] TuTiempo.net, “Clima Bucaramanga / Palonegro”. <https://www.tutiempo.net/clima/ws-800940.html>
- [24] maplogs.com, “Horas de salida y puesta de sol de Bucaramanga, Santander, Colombia”.
https://sunrise.maplogs.com/es/bucaramanga_santander_department_colombia.103135.html
- [25] Instituto Geológico y Minero de España (IGME), “Climatología, Tablas de Daimiel”.
https://www.igme.es/zonas_humedas/daimiel/medio_fisico/clima.htm
- [26] Ó. Valiente, “Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación”, *Investigaciones Geográficas*, vol. 26, pp. 59–80, 2001, [En línea]. Available:
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/363/1/Marcos%20Valiente-Sequia.pdf>
- [27] IDEAM, “Modelación Hidrológica”. <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica#:~:text=Un%20modelo%20hidrol%C3%B3gico%20es%20pues,bajo%20forma%20f%C3%ADsica%20o%20matem%C3%A1tica.&text=En%20un%20modelo%20hidrol%C3%B3gico%2C%20el,los%20componentes%20del%20ciclo%20hidrol%C3%B3gico>
- [28] B. L. Cardona, “Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas”, 2016.
- [29] E. Amaya, “Estimación de caudales medios para la subcuenca del río Teusacá mediante el software HEC-HMS”, Pregrado, Universidad Santo Tomás, Bogotá, D.C., 2018. [En línea]. Available:
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/15342/2019erikaamaya.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- [30] P. Villegas, “Método del Número de Curva del SCS”, *aguaysig.com*, ene. 09, 2017.
<https://aguaysig.com/metodo-del-numero-de-curva-del-scs/>

- [31] P. Villegas, “Calcular numero de curva con Arcgis”, *aguaysig.com*, ene. 22, 2017.
<https://aguaysig.com/calcular-numero-de-curva-con-arcgis/>
- [32] J. Sánchez, “Calculo de la precipitación neta mediante el método del S.C.S.” [En línea].
Available: https://hidrologia.usal.es/practicas/Pneta_SCS/Pneta_SCS_fundam.pdf
- [33] S. Gómez-Isidro y V. L. Gómez-Ríos, “Análisis de flujo base usando curvas maestras de recesión y algoritmos numéricos en cuencas de montaña: Cuenca del río Suratá y cuenca del Río de Oro (Santander, Colombia)”, *DYNA (Colombia)*, vol. 83, núm. 196, pp. 213–222, abr. 2016, doi: 10.15446/dyna.v83n196.53222.
- [34] Flumen Institute, “Manual de utilización del programa HEC-HMS”, [En línea]. Available:
https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250336/2012/40_ManualHMS.pdf
- [35] S. Salinas, “Guía rápida para la determinación de caudales ecológicos”, 2011. [En línea].
Available: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/GUIA.pdf>
- [36] IDEAM, *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá, Colombia, 2015. [En línea]. Available:
https://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2014.pdf
- [37] L. Dickson, R. D’Aubeterre, Á. Reverón, A. Baldizán, O. García, y M. García, “Manual de producción caprinos y ovinos”, Caracas, Venezuela, 2017.
- [38] M. Vaccaro, E. Dillon, y A. Fernández, “El agua en la producción equina”, *SNS*, vol. 5, 2014, [En línea]. Available: https://www.produccion-animal.com.ar/agua_bebida/229-equinos.pdf
- [39] O. Romero y S. Bravo, “Alimentación y nutrición en los ovinos”, en *Fundamentos de la producción ovina en la Región de La Araucanía*, 2012, pp. 23–40. [En línea]. Available:
https://puntoganadero.cl/imagenes/upload/_5cc20a53763cf.pdf

- [40] L. Iglesias, “El estiércol y las prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente.”, Madrid, 1995. [En línea]. Available:
https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1994_01.pdf
- [41] D. Arévalo, “Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica, Reporte Colombia 2012”, 2012. [En línea]. Available:
https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/hh_colombia_6b.pdf
- [42] M. M. Mekonnen y A. Y. Hoekstra, “The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products”, *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 15, núm. 5, pp. 1577–1600, 2011, doi: 10.5194/hess-15-1577-2011.
- [43] M. M. Mekonnen y A. Y. Hoekstra, “A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products”, *Ecosystems*, vol. 15, núm. 3, pp. 401–415, abr. 2012, doi: 10.1007/s10021-011-9517-8.
- [44] M. Zia, S. S. Yaseen, S. Ali y J. A. Tariq, "Estimation of crop water footprint for wheat in the Indus Basin using remote sensing and crop simulation model," *Journal of Arid Environments*, vol. 189, p. 104495, may. 2021