



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Gestión del uso eficiente del recurso
hídrico en campus universitario
mediante la estimación de la huella
hídrica: Campus Robledo
Universidad Nacional de Colombia
sede Medellín**

Nicole Elheyn Forero Sacristan

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2023

Gestión del uso eficiente del recurso hídrico en campus universitario mediante la estimación de la huella hídrica: Campus Robledo Universidad Nacional de Colombia sede Medellín

Nicole Elheyn Forero Sacristan

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Medio Ambiente y Desarrollo

Directora:

Ph.D. Natalia Andrea Cano Londoño

Codirector:

Ph.D. Carlos Alberto Zárate Yepes

Asesor:

Santiago Alonso Cardona Gallo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia

2023

Dios es nuestro guía en el camino para alcanzar nuestros sueños. Por eso nunca dejes de creer porque no hay límites para quien se esfuerza por alcanzarlos, recordando siempre que hay algo más que aprender, vivir y soñar en cada momento.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional por toda la formación académica, investigativa, laboral y personal que me ha brindado durante todos estos años y las múltiples oportunidades que me han permitido culminar este proceso de manera satisfactoria.

A mi directora Natalia Andrea Cano Londoño por todo el acompañamiento en cada etapa de este proceso de investigación y aprendizaje. Por compartir sus conocimientos conmigo los cuales me permitieron el crecimiento académico, investigativo, laboral y personal que concluyeron en el desarrollo satisfactorio de esta tesis de maestría.

A mi codirector Carlos Alberto Zarate Yepes por compartir sus conocimientos y todo el apoyo académico brindado.

Al profesor Santiago Cardona Gallo por compartir conmigo su vasta experiencia como director de tesis, investigador y profesional que me asesoró y guió en la fase final del proceso de investigación realizado.

A la Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (Cornare) por trabajar con nosotros a través del convenio 540-2020 con la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín Facultad de Minas, por medio del cual me fue posible ejecutar este proyecto.

A Juan Esteban Mira que me acompañó en el proceso técnico del desarrollo y compartió todos sus conocimientos conmigo.

A mis compañeros de maestría que me apoyaron de manera incondicional aportando su conocimiento y experiencia, en múltiples fases del proceso de investigación.

A mis padres por su apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida y en cada uno de los pasos que doy.

Principalmente agradezco a Dios que mi camino guía, bendice e ilumina en todo momento. Y por todos los retos que se presentaron en el proceso de los cuales aprendí enormemente y me permitieron obtener un mejor resultado en el proceso desarrollado.

Resumen

Gestión del uso eficiente del recurso hídrico en campus universitario mediante la estimación de la huella hídrica: Campus Robledo Universidad Nacional de Colombia sede Medellín

La Metodología de la Evaluación de la Huella Hídrica (WFA) de la Water Footprint Network (WFN) permite calcular el volumen de agua consumido y degradado por una empresa, un proceso productivo, una región, etc. El cálculo de la huella hídrica por medio de la WFA es principalmente adaptado y aplicado en el sector agropecuario. Sin embargo, no se ha desarrollado una adaptación de esta metodología para ser aplicada en campus universitario, ya que este sector es poco estudiado. El objetivo de este estudio se centra en adaptar la metodología WFA de manera específica para aplicarla en campus universitario y establecer estrategias para la gestión hídrica. De esta manera, en la primera fase del estudio se realiza una revisión bibliográfica, la cual permite, junto con el balance de masa, establecer la adaptación metodológica. Luego de establecer la adaptación metodológica, se compara la metodología WFA con su versión adaptada en un caso de estudio para el Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Los resultados del caso de estudio evidencian que la huella hídrica gris representa el 74% de la huella hídrica directa y que esta representa el 94% de la huella hídrica total. También, el cálculo de la huella hídrica azul y verde no presentan variaciones entre las metodologías; sin embargo, la huella hídrica gris calculada con la WFA presenta una subestimación. La huella hídrica obtenida para el Campus Robledo no puede ser directamente comparada con los resultados para otras universidades debido a que los cálculos no contemplaron los mismos parámetros.

Palabras clave: Huella hídrica, Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica, adaptación metodológica, campus universitario.

Abstract

Management of the efficient use of water resources on a university campus through water footprint estimation: Robledo Campus National University of Colombia, Medellín

The Water Footprint Assessment (WFA) Methodology by the Water Footprint Network (WFN) enables the calculation of water consumption and degradation by a company, production process, region, etc. The calculation of the water footprint through WFA is primarily adapted and applied in the agricultural sector. However, no adaptation of this methodology has been developed for application on university campuses, given the limited research conducted in this sector. The objective of this study focuses on specifically adapting the WFA methodology for application on university campuses and establishing strategies for water management. To achieve this, the first phase of the study involves a bibliographic review, which, along with the mass balance, helps establish the methodological adaptation. Following the establishment of the methodological adaptation, a comparison is made between the WFA methodology and its adapted version in a case study conducted at the Robledo Campus of the National University of Colombia, Medellín. The results of the case study show that the gray water footprint represents 74% of the direct water footprint, and it accounts for 94% of the total water footprint. Additionally, the calculation of the blue and green water footprints shows no variation between the methodologies. However, the gray water footprint calculated using WFA presents an underestimation. It is essential to note that the water footprint obtained for the Robledo Campus cannot be directly compared with results from other universities due to the consideration of different parameters in the calculations.

Keywords: Water footprint, Environmental sustainability of water footprint, methodological adaptation, university campus.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Abstract	VIII
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XIV
Introducción	1
1. Planteamiento del problema de investigación	5
1.1 Preguntas de investigación	7
1.2 Objetivo general	7
1.3 Objetivos específicos	8
1.4 Hipótesis	8
1.5 Alcance	8
1.6 Justificación.....	10
2. Marco teórico	12
2.1 Huella hídrica directa.....	17
2.1.1 Huella hídrica azul	17
2.1.2 Huella hídrica verde.....	20
2.1.3 Huella hídrica gris.....	22
2.2 Huella hídrica indirecta.....	25
2.3 Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica.....	27
2.3.1 Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica verde.....	29
2.3.2 Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul	29
2.3.3 Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica gris.....	30
3. Estudio bibliográfico	31
3.1 Estrategia de búsqueda de literatura	32
3.2 Selección de literatura	33
3.3 Recopilación de datos	35
3.4 Análisis de la literatura	35
3.4.1 Huella hídrica en diferentes sectores económicos	36
3.4.2 Huella hídrica en campus universitario	45
4. Adaptación de la metodología WFA para campus universitario	52
4.1 Adaptaciones a la huella hídrica directa	52

4.1.1	Adaptación de la huella hídrica azul	53
4.1.2	Adaptación de la huella hídrica verde.....	56
4.1.3	Adaptación de la huella hídrica gris	59
4.2	Adaptaciones de la huella hídrica indirecta	61
4.2.1	Huella hídrica indirecta de energía	61
4.2.2	Huella hídrica indirecta de papel	62
4.3	Adaptaciones a la sostenibilidad ambiental de la huella hídrica	63
5.	Metodología.....	65
5.1	Zona de estudio	65
5.2	Metodología adaptada de la WFA.....	67
5.3	Recolección de información	68
5.3.1	Huella hídrica azul.....	68
5.3.2	Huella hídrica verde	69
5.3.3	Huella hídrica gris.....	70
5.3.4	Huella hídrica indirecta por energía eléctrica.....	72
5.3.5	Huella hídrica indirecta por papel	72
5.3.6	Análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica.....	73
6.	Resultados y discusiones	79
6.1	Contabilidad y comparación de la huella hídrica	79
6.1.1	Huella hídrica azul.....	79
6.1.2	Huella hídrica verde	81
6.1.3	Huella hídrica gris.....	83
6.1.4	Huella hídrica directa.....	87
6.1.5	Huella hídrica total.....	89
6.2	Análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica	90
6.2.1	Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul.....	91
6.2.2	Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica gris	95
6.3	Huella hídrica de otras universidades	98
6.4	Estrategias de gestión hídrica	104
7.	Conclusiones y recomendaciones	107
7.1	Conclusiones	107
7.2	Recomendaciones	112
	Bibliografía	115
	Anexos.....	129
A.	ISO 14046:2014.....	129
B.	Comparación de las metodologías	134
C.	Artículos del estudio bibliográfico	137
D.	Software Cropwat	147
E.	Modelo lluvia escorrentía	155
F.	Calibración del modelo lluvia escorrentía.....	165
G.	Oferta hídrica total	171

H. Caudal ecológico.....	175
I. Disponibilidad real	181
J. Resultados detallados huella hídrica gris	184

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Fases para el desarrollo del proyecto de investigación.	9
Figura 2-1: Fases de la evaluación de la huella hídrica.	13
Figura 2-2: Diagrama de cálculo de la huella hídrica.	14
Figura 2-3: Balance hídrico de agua azul.	18
Figura 2-4: Balance hídrico de agua verde.	20
Figura 2-5: Balance de masa en la fuente hídrica receptora.	23
Figura 2-6: Ejemplo huella hídrica indirecta.	26
Figura 3-1: Procedimiento metodológico para la revisión bibliográfica.	32
Figura 3-2: Publicaciones por base de datos de artículos científicos y sectores económicos.	36
Figura 3-3: Publicaciones por año y base de datos para múltiples sectores económicos.	37
Figura 3-4: Análisis espacio sectorial de las publicaciones.	39
Figura 3-5: Análisis sectorial del cálculo de la huella hídrica.	42
Figura 3-6: Publicaciones por año y base de datos para campus universitario.	46
Figura 3-7: Análisis espacial de las publicaciones en campus universitarios.	47
Figura 3-8: Análisis de la huella hídrica calculada para campus universitario.	49
Figura 5-1: Campus Robledo Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.	66
Figura 5-2: Evidencia fotográfica de la toma de muestras.	71
Figura 5-3: Distribución de usos del agua por sector.	74
Figura 5-4: Red de drenaje y cuencas trazadas.	76
Figura 5-5: Estaciones meteorológicas en las cuencas trazadas.	78
Figura 6-1: Comparación gráfica de la huella hídrica azul.	81
Figura 6-2: Huella hídrica azul por áreas.	81
Figura 6-3: Comparación gráfica de la huella hídrica verde.	82
Figura 6-4: Comparación de la huella hídrica gris.	84
Figura 6-5: Análisis de sensibilidad porcentual de la huella hídrica gris WFA.	86
Figura 6-6: Análisis de sensibilidad comparativa de la huella hídrica gris.	86
Figura 6-7: Análisis de sensibilidad de diferencia porcentual de la huella hídrica gris. ...	86
Figura 6-8: Comparación gráfica de la huella hídrica directa.	88
Figura 6-9: Comparación gráfica de huella hídrica indirecta.	89
Figura 6-10: Comparación gráfica de la huella hídrica total.	90
Figura 6-11: Escasez de agua azul escenario Embalse Río Grande.	91
Figura 6-12: Escasez de agua azul escenario circuito de abastecimiento.	92

Figura 6-13: Escasez de agua azul escenario sector educativo.	93
Figura 6-14: Escasez de agua azul escenario Quebrada la Iguaná.	95
Figura 6-15: Comparación del NCA para la metodología WFA y su adaptación.	97
Figura 6-16: Energía eléctrica mensual.	105
Figura 7-1: Fases de la evaluación de la huella de agua.	130
Figura 7-2: Procedimiento para el análisis del inventario de la huella de agua.	131
Figura 7-3: Balance de materia y energía de CRPWAT.	148
Figura 7-4: Datos de entrada para el cálculo de la ETo.	149
Figura 7-5: Datos de entrada para el cálculo de la precipitación.	150
Figura 7-6: Datos de entrada para el cálculo de los cultivos.	151
Figura 7-7: Requerimiento de datos de propiedades del suelo.	152
Figura 7-8: Requerimiento de agua de cultivo (RAC).	153
Figura 7-9: Esquemmatización modelo de tanques.	156
Figura 7-10: Calibración quebrada Doña Maria.	168
Figura 7-11: Calibración río Aburrá- Copacabana.	169
Figura 7-12: Curva de duración de caudales quebrada Iguaná.	170
Figura 7-13: Curva de duración de caudales Río Aburrá.	170
Figura 7-14: Oferta total para diferentes condiciones hidrológicas de la Quebrada Iguaná.	171
Figura 7-15: Oferta total promedio de la Quebrada la Iguaná.	172
Figura 7-16: Ofertas totales Río Aburrá-PTAR.	172
Figura 7-17: Comparación oferta total promedio vs oferta total 2022. Río Aburrá PTAR.	173
Figura 7-18: Oferta hídrica total para el embalse Río Grande.	173
Figura 7-19: Comparación oferta total promedio vs oferta total 2022. Embalse Río Grande.	174
Figura 7-20: Resultados gráficos metodología 3. Quebrada Iguaná.	179
Figura 7-21: Resultados gráficos metodología 3. Río Aburrá PTAR.	179
Figura 7-22: Resultados gráficos metodología 3. Río Grande.	179
Figura 7-23: Resultados gráficos metodología 3. Río Chico.	179
Figura 7-24: Comparación ofertas 2022 Quebrada Iguaná.	182
Figura 7-25: Comparación ofertas 2022 Río Aburrá PTAR.	182
Figura 7-26: Comparación ofertas 2022 – Embalse Río Grande.	183

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Alcances y resultados esperados del proyecto.	9
Tabla 2-1: Ecuaciones para calcular la huella hídrica de otras categorías.	15
Tabla 2-2: Ecuaciones para calcular la huella hídrica azul.	18
Tabla 2-3: Ecuaciones para calcular la huella hídrica verde.	21
Tabla 2-4: Ecuaciones para calcular la huella hídrica gris.	23
Tabla 2-5: Consideraciones especiales para la huella hídrica gris.	25
Tabla 4-1: Ecuaciones adaptadas para el cálculo de la huella hídrica azul.	53
Tabla 4-2: Ecuaciones para el cálculo del efluente.	54
Tabla 4-3: Ecuaciones para el cálculo de la ETP.	57
Tabla 5-1: Información general Campus Robledo.	66
Tabla 5-2: Adaptaciones a la metodología WFA para campus universitario.	67
Tabla 5-3: Factores de huella hídrica energética.	72
Tabla 5-4: Huella hídrica de algunos derivados de la madera.	73
Tabla 5-5: Disponibilidad de agua del sistema de acueducto.	75
Tabla 5-6: Estaciones meteorológicas.	77
Tabla 6-1: Huella hídrica azul.	80
Tabla 6-2: Huella hídrica verde.	82
Tabla 6-3: Huella hídrica gris mediante la WFA y la adaptación a campus universitarios.	84
Tabla 6-4: Huella hídrica directa.	88
Tabla 6-5: Huella hídrica indirecta.	89
Tabla 6-6: Escasez de agua azul para el escenario Embalse Río Grande.	91
Tabla 6-7: Escasez de agua azul escenario circuito de abastecimiento.	92
Tabla 6-8: Escasez de agua azul escenario sector educativo.	93
Tabla 6-9: Escasez de agua azul escenario Quebrada la Igua.	94
Tabla 6-10: NCA escenario Río Medellín para la metodología WFA y su adaptación.	95
Tabla 6-11: NCA Quebrada la Igua para la metodología WFA y su adaptación.	96
Tabla 6-12: Comparación de la huella hídrica calculada en campus universitario.	101
Tabla 7-1: Comparación de las metodologías WFA e ISO 14046.	134
Tabla 7-2: Publicaciones de aplicación de la huella hídrica en diferentes sectores.	137
Tabla 7-3: Ecuaciones de huella hídrica utilizadas en diferentes sectores.	140
Tabla 7-4: Publicaciones de aplicación de la huella hídrica en campus universitario.	146
Tabla 7-5: Valores sugeridos para los parámetros hidráulicos del modelo de tanques.	163

Tabla 7-6: Valores sugeridos para otros parámetros del modelo de tanques.....	164
Tabla 7-7: Parámetros resultado del modelo de la quebrada Doña María.....	168
Tabla 7-8: Parámetros resultado del modelo del Río Aburrá a la altura de Copacabana.	169
Tabla 7-9: Oferta total de las cuencas de interés.	174
Tabla 7-10: Resultados metodología 1.....	176
Tabla 7-11: Resultados metodología 2.....	177
Tabla 7-12: Resultados metodología 3.....	178
Tabla 7-13: Resumen resultados ofertas de la quebrada La Iguaná.	181
Tabla 7-14: Resumen ofertas Río Aburrá PTAR.	182
Tabla 7-15: Resumen ofertas – Embalse Río Grande.....	183
Tabla 7-16: Huella hídrica gris detallada.	184

Introducción

En el contexto actual, marcado por una creciente interconexión global y cambios rápidos en lo socioeconómico y ambiental, la sostenibilidad se ha vuelto esencial para asegurar un futuro viable para la humanidad y la preservación del planeta (UN, 2016). En un mundo donde los recursos naturales escasean y las crisis ambientales se intensifican, es imperativo replantear nuestras acciones y decisiones hacia una visión más equitativa, responsable y respetuosa con los límites del sistema terrestre (UN, 2016).

La sostenibilidad implica satisfacer las necesidades presentes sin comprometer las de las futuras generaciones (Weiland et al., 2021). Esta visión busca un equilibrio entre la prosperidad humana, el bienestar social y la conservación del medio ambiente y la diversidad biológica (UN, 2016; Weiland et al., 2021). Nos llama a buscar una armonía duradera entre los seres humanos y la naturaleza, reconociendo el impacto que nuestras acciones tienen en el mundo que compartimos.

Para lograr este objetivo, es fundamental reconocer y respetar los límites planetarios establecidos por la comunidad científica (Fernández & Malwé, 2019; Rockström et al., 2009). Estos límites marcan los umbrales críticos que no deben ser sobrepasados para garantizar la estabilidad del sistema terrestre (Fernández & Malwé, 2019; Hurley & Tittensor, 2020; Rockström et al., 2009). Entre ellos, el agua se destaca como un recurso esencial cuyo uso sostenible se ha vuelto crucial para la supervivencia y el desarrollo humano.

El agua es fuente de vida y bienestar, fundamental para todas las formas de vida en la Tierra. Su uso se extiende desde la agricultura hasta la industria y el consumo humano, y afecta diversos aspectos de la vida cotidiana y la economía global. Sin embargo, a pesar de su importancia vital, el agua dulce es un recurso finito y vulnerable, amenazado por

factores como la sobreexplotación, la contaminación y el cambio climático (Lal, 2015; Oliver & Morecroft, 2014; Zucchinelli, Sporchia, et al., 2021).

En este contexto, los intereses internacionales de combatir los efectos generados por el cambio climático desde diferentes enfoques nace la agenda 2030, donde por medio de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y diferentes metas e indicadores socioambientales (UN, 2016; Weiland et al., 2021), se busca priorizar el desarrollo a través del cuidado del medio ambiente y los recursos ambientales, la integridad social y el crecimiento empresarial, rompiendo así los viejos paradigmas extractivistas a nuevos ámbitos de crecimiento multilateral (Gjorgievski et al., 2021; UN, 2016; Weiland et al., 2021). De esta manera, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se convierten en una guía para avanzar hacia un mundo más sostenible y justo. El ODS 6, en particular, se enfoca en garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, reconociendo su papel crítico en el desarrollo humano y en un futuro próspero y sostenible (DNP, 2018; Herrero et al., 2018)

Colombia es un país reconocido por la abundancia de sus recursos naturales, sin embargo los efectos del cambio climático también han generado afectaciones notables principalmente asociados a la frecuencia e intensidad en la presencia de las precipitaciones evidenciando su efecto en la variabilidad intraestacional e interanual, junto al aumento de la temperatura del aire y a los factores extremos asociadas a dichas variables (IDEAM & UNAL, 2018). De esta manera, Colombia en concordancia con los intereses internacionales, en busca de mitigar los efectos del cambio climático en el país y alcanzar la sostenibilidad, adopta los ODS por medio del CONPES 3918 “Estrategias para la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en Colombia” (DNP, 2018).

Asimismo, los campus universitarios o instituciones de educación superior albergan a una gran cantidad de personas diariamente, y sus actividades son diversas gracias a los múltiples servicios que prestan tales como la educación, la investigación, actividades de extensión, alquiler de espacios, entre otras muchas. Debido a esto, ha surgido un gran interés en que estos establecimientos educativos al igual que otros sectores, aporten de manera positiva a la mitigación de los efectos del cambio climático y logren que sus

instalaciones sean sostenibles, tal y como lo ha estado realizando la sede Medellín de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL Medellín, 2021).

En conformidad con los ODS, las tendencias globales, nacionales y los intereses de la Universidad Nacional de Colombia en su sede en Medellín, toma gran relevancia realizar el cálculo de la huella hídrica, gracias a que se busca por medio de su aplicación reducir, controlar y gestionar el consumo del recurso hídrico en los diferentes sectores económicos y así mismo combatir el cambio climático y sus efectos (Hoekstra et al., 2011).

La huella hídrica es entonces, un tema de mucho interés en la actualidad. Calcular la huella hídrica es muy útil debido a su rigurosidad y objetividad. Esto es gracias a que sus datos provienen de balances de masa, rigurosas mediciones y análisis matemáticos aislados de la subjetividad (Hoekstra et al., 2011). Es así como el cálculo y análisis de la huella hídrica se vuelven una herramienta poderosa para evaluar y gestionar eficientemente el uso del recurso hídrico. De esta manera, la huella hídrica representa el volumen total de agua utilizada, consumida y contaminada en la producción y consumo de bienes y servicios, brindando una visión integral de cómo las diferentes acciones afectan los recursos hídricos locales y globales (Hoekstra et al., 2011; International Organization for Standardization, 2015).

En este contexto existen diferentes metodologías que permiten el cálculo del consumo y la contaminación del recurso hídrico, una de las más conocidas es la Evaluación de la Huella Hídrica (WFA) desarrollada por la Water Footprint Network (WFN). Sin embargo, aunque la WFA ha sido ampliamente aplicada en diversos sectores económicos, aún no se ha profundizado en su aplicación al sector académico universitario. En concordancia, para Colombia solo se ha realizado un estudio bajo la metodología WFA de manera parcial, calculando la huella hídrica per cápita de la comunidad universitaria, el cual se realizó a partir de encuestas de consumo de energía, papel y alimentos dentro del campus universitario ((Arboleda Tabares et al., 2022).

De esta manera, el presente estudio tiene como objetivo principal implementar estrategias de gestión para el uso eficiente del recurso hídrico, adaptando la metodología WFA para el cálculo de la huella hídrica en campus universitarios, y realizar su aplicación en el Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Para ello, en el

primer capítulo de esta investigación se realiza el planteamiento del problema donde se detalla la problemática de escasez y contaminación del recurso hídrico y cómo el cálculo de la huella hídrica es una herramienta de gestión del agua. Así mismo, se establece el objetivo general, los objetivos específicos y los alcances de este estudio. En el siguiente capítulo, se encuentra el marco teórico donde se explica ampliamente la metodología WFA.

El tercer capítulo desarrolla un estudio bibliográfico de la aplicación de la huella hídrica calculada por medio de la metodología WFA en diferentes sectores económicos y de manera específica para campus universitarios. A partir de esta búsqueda bibliográfica y teniendo en consideración el balance de masa, se adapta la metodología WFA para ser aplicada en campus universitario en el capítulo cuarto.

El capítulo cinco establece la metodología empleada incluyendo la descripción de la zona de estudio, los cálculos a considerar y la información recolectada. Luego, el capítulo seis se centra en la discusión de los resultados obtenidos y las diferencias existentes en la aplicación de la metodología de la WFA y la adaptación realizada para calcular la huella hídrica y la sostenibilidad de la huella hídrica en un campus universitario, que para este estudio fue el Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Finalmente, el séptimo y último capítulo se enfoca en las conclusiones y recomendaciones que fueron producto del estudio realizado.

1. Planteamiento del problema de investigación

En la actualidad el agotamiento de los recursos naturales es uno de los mayores retos ambientales que se presentan en el mundo. La escasez y la contaminación del recurso hídrico afecta a todas las poblaciones, causando problemas de salud pública y daños ecosistémicos en todos los flujos hídricos (Petpongpan et al., 2020; Xia et al., 2017), y se pronostica que aproximadamente el 50% de la población mundial para el 2040 podría tener grandes problemas por escasez de agua dulce (Clavijo, 2021).

La problemática asociada al recurso hídrico no solo está relacionada a los efectos generados en los seres humanos, sino también a problemas y alteraciones ecosistémicas (Cantonati et al., 2020; Petpongpan et al., 2020; Xia et al., 2017). Esto ocurre para las especies acuáticas y las especies terrestres cercanas a fuentes hídricas donde se presenta reducción sustancial del caudal y/o problemas de contaminación, generando alteraciones en las dinámicas, cambios fisiológicos graves, afectando procesos reproductivos en especies animales y problemas productivos en especies vegetales (Cantonati et al., 2020; Petpongpan et al., 2020; van der Wiel & Bintanja, 2021; Xia et al., 2017).

Afectar las dinámicas ecosistemas altera el desarrollo de las actividades humanas en la pesca, en las actividades de siembra, aprovechamiento de la cosecha y en las actividades recreativas necesarias para el desarrollo humano (Harley et al., 2012; Petpongpan et al., 2020; van der Wiel & Bintanja, 2021).

Colombia es uno de los países más biodiversos y con gran cantidad de recursos naturales, como el agua. Sin embargo, este recurso no está distribuido de manera homogénea en el país, por esta razón las problemáticas asociadas a escasez del recurso se presentan en algunas zonas muy específicas del territorio nacional. Por otra parte, la realidad es más tangible en las poblaciones urbanas debido a problemáticas asociadas a estrés hídrico y/o

contaminación de las aguas superficiales y subterráneas (IDEAM, 2018). Esto afecta a aproximadamente un tercio de la población en el país, lo cual irá en aumento con el paso del tiempo, y tomará gran relevancia no solo por las condiciones ambientales sino también por las diferentes situaciones sociales que se presentan en la realidad colombiana (IDEAM, 2018).

Adicionalmente, la escasez y la contaminación hídrica van en contravía de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), ya que para alcanzar la sostenibilidad se debe cumplir con todos, esto incluye el ODS “6” que busca garantizar la disponibilidad de agua, su ordenación sostenible y el saneamiento para todos (DNP, 2018; Herrero et al., 2018).

Gracias al notorio compromiso de Colombia con alcanzar la sostenibilidad y buscar el cumplimiento nacional de los ODS (DNP, 2018; Herrero et al., 2018), aplicar y adaptar una metodología para el cálculo de la huella hídrica en diferentes sectores, incluyendo el académico, es de gran relevancia. Esto se debe a que, por medio de su aplicación se busca reducir, controlar y gestionar el consumo del recurso hídrico, lo cual permite una ordenación sostenible del mismo, y de esta manera combatir el cambio climático y los problemas asociados al consumo del recurso hídrico.

Existen diferentes metodologías que permiten calcular el consumo y la contaminación hídrica, tal como la Evaluación de la Huella Hídrica que por sus siglas en inglés se reconoce como WFA desarrollada por la Water Footprint Network (WFN) (Hoekstra et al., 2011), y la metodología desarrollada por la Organización Internacional de Normalización la ISO-14046:2014 Gestión ambiental — Huella de agua — Principios, requisitos y directrices (International Organization for Standardization, 2015). La metodología desarrollada por la WFN es más madura, debido a que lleva más tiempo desde su desarrollo. Gracias a esto ha sido ampliamente adaptada y aplicada en diferentes sectores económicos, pero en el sector académico, específicamente de campus universitarios no ha sido estudiada con profundidad. Aún no se ha propuesto una metodología específica que permita el cálculo de la huella hídrica para el campus universitario.

Es importante generar este desarrollo, ya que los campus universitarios tienen comportamientos del sector empresarial, industrial y doméstico debido a sus actividades académicas, administrativas, de investigación y extensión, lo cual se puede percibir como

una pequeña ciudad o una empresa prestadora de servicios de aprendizaje con diferentes dinámicas y actores. De esta manera, generar desarrollos metodológicos para los campus universitarios sirve como una herramienta comparativa y escalable que permite observar el comportamiento de una empresa prestadora de servicios o una pequeña municipalidad, lo cual ha futuro y con un mayor desarrollo investigativo puede permitir que este tipo de entidad desarrollen mejores estrategias para la gestión del recurso hídrico.

1.1 Preguntas de investigación

La problemática que se afronta por medio del presente desarrollo investigativo se basa en la inexistencia de una adaptación metodológica específica para el cálculo de la huella hídrica en campus universitarios a partir de la metodología WFA, de esta manera se establecen las siguientes interrogantes:

- ¿Cuáles deben ser las consideraciones a tener en cuenta para establecer la adaptación metodológica del cálculo de huella hídrica para campus universitario a partir de la metodología WFA?
- ¿Qué diferencias existen entre la metodología WFA y su adaptación para campus universitario?
- ¿Se puede comparar la huella hídrica obtenida por medio de la metodología adaptada con los resultados de otros campus universitarios?
- ¿Cuáles son las estrategias de gestión hídrica más adecuadas para el caso de estudio a partir de los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología adaptada?

1.2 Objetivo general

Establecer estrategias de gestión para el uso eficiente del recurso hídrico adaptando la metodología WFA de cálculo de la huella hídrica a campus universitarios: Caso de estudio Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

1.3 Objetivos específicos

- Identificar los vacíos metodológicos de la WFN para la adaptación de la metodología, teniendo en cuenta las ecuaciones y los límites del sistema de cálculo de la huella hídrica en campus universitarios.
- Implementar la metodología de la WFN adaptada al cálculo de la huella hídrica en campus universitario estableciendo la relevancia de las ecuaciones reestructuradas y los límites del sistema de cálculo.
- Estimar el índice de sostenibilidad establecido en la metodología de la WFN teniendo en cuenta las variaciones espacio temporales para un campus universitario.
- Proponer estrategias que permitan el uso eficiente del recurso hídrico en campus universitarios.

1.4 Hipótesis

El cálculo de la huella hídrica y el análisis de la sostenibilidad por medio de la adaptación de la metodología WFA para campus universitario, establece resultados fiables que permiten generar estrategias de gestión hídrica adecuadas.

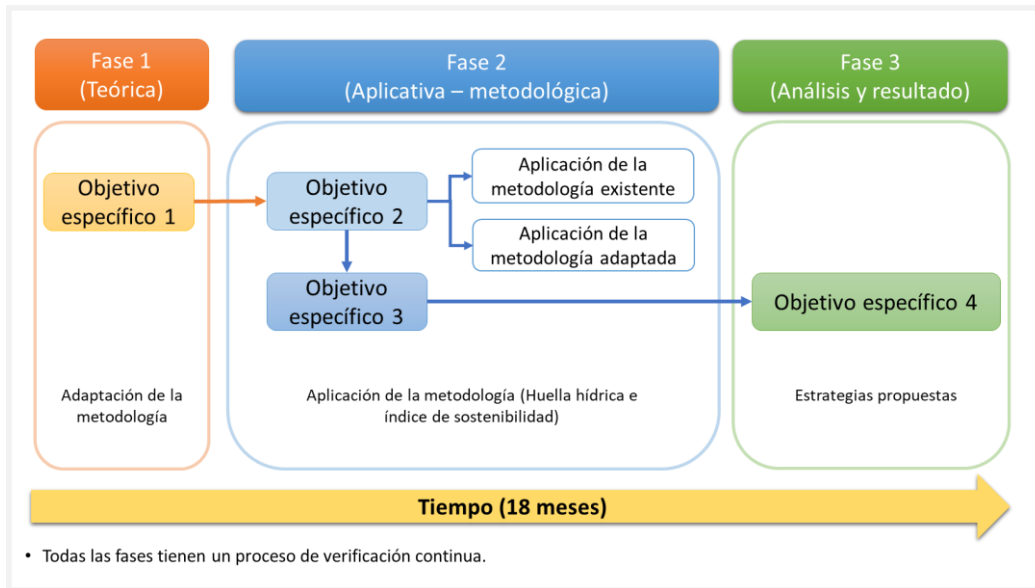
1.5 Alcance

El alcance de este proyecto de investigación va enfocado a la adaptación de la metodología WFA, donde se busca establecer nuevos límites en el sistema estudiado y modificar las ecuaciones según sea pertinente. Esto permite cerrar las brechas existentes entre los resultados de los cálculos de la huella hídrica y los análisis espacio temporales de la sostenibilidad de la huella hídrica, lo cual se realiza por medio del cumplimiento de los objetivos de investigación establecidos.

Para alcanzar los objetivos propuestos en este proyecto de investigación, se decide desarrollar tres fases (**Figura 1-1**). La primera fase pretende llevar a cabo una búsqueda bibliográfica que permita establecer las aplicaciones de la huella hídrica en la actualidad y así realizar una adaptación metodológica de la WFA para ser aplicada en campus universitarios dando cumplimiento al primer objetivo. En la fase dos se aplica la metodología actual de WFA y la metodología adaptada, lo que incluye realizar los cálculos para las huellas hídricas directas y los índices de sostenibilidad, dando cumplimientos a

los objetivos de investigación dos y tres. Finalmente, en la fase tres se desarrollan estrategias de gestión para usar el recurso hídrico de manera eficiente, dando cumplimiento así al cuarto y último objetivo de investigación.

Figura 1-1: Fases para el desarrollo del proyecto de investigación.



Es importante aclarar que en el desarrollo del presente estudio la fase tres es incluida en el Capítulo 6, en el Sección 6.4. Estrategias de gestión hídrica.

Los resultados de este proyecto de investigación asociados a cada uno de los objetivos se pueden observar en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1: Alcances y resultados esperados del proyecto.

Objetivo	Resultado
Identificar los vacíos metodológicos de la WFN para la adaptación de la metodología, teniendo en cuenta las ecuaciones y los límites del sistema de cálculo de la huella hídrica en campus universitarios.	Se obtiene una metodología adaptada para el cálculo de la huella hídrica en campus universitario.
Implementar la metodología de la WFN adaptada al cálculo de la huella hídrica en campus universitario estableciendo la relevancia de las ecuaciones restructuradas y los límites del sistema de cálculo	Se calcula y compara la huella hídrica adaptada para campus universitarios con la metodología existente (WFA).

Objetivo	Resultado
Estimar el índice de sostenibilidad establecido en la metodología de la WFN teniendo en cuenta las variaciones espacio temporales para un campus universitario.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se realiza la comparación del índice de sostenibilidad y los puntos críticos en los diferentes escenarios espacio temporales. 2. Se determina el límite adecuado para la aplicación del índice de sostenibilidad para un campus universitario.
Proponer estrategias que permitan el uso eficiente del recurso hídrico en campus universitarios.	Se plantean estrategias a corto, mediano y largo plazo que permitan el uso eficiente del recurso hídrico como respuesta a los resultados obtenidos de la huella hídrica en campus universitario.

1.6 Justificación

La problemática de escasez, contaminación del recurso hídrico y uso excesivo del recurso se debe afrontar desde múltiples planes de acción y teniendo en cuenta las metodologías existentes en la actualidad. Estas metodologías, parámetros o métodos de cuantificación se desarrollan de manera especializada por cada tema de acción como eutrofización, acidificación, escasez, huellas ambientales asociadas, entre otros.

A diferencia de algunas huellas ambientales, la huella hídrica no es comúnmente aplicada debido a que tiene una mayor rigurosidad científica y metodológica en la aplicación de la misma, requiere una gran cantidad de datos en la aplicación inicial y un tiempo considerable de desarrollo de aproximadamente un año, para obtener resultados de alto impacto para la generación de estrategias de acción y mejora tanto espacial como temporalmente (Hoekstra et al., 2011)

Sin embargo, esta misma rigurosidad es lo que hace de esta metodología algo tan importante, ya que permite hacer una comparación junto con un seguimiento riguroso y detallado de los impactos realmente generados en un recurso primordial para la vida como lo es el agua dulce y el impacto en las cuencas hidrográficas, el impacto real por consumo del recurso y por la contaminación del mismo (Hoekstra et al., 2011; Skouteris et al., 2018).

La WFA realiza el cálculo del consumo y la contaminación hídrica, los resultados obtenidos de estos cálculos son analizados por medio de la sostenibilidad de la huella hídrica así permite analizar el impacto al medio hídrico (Hoekstra et al., 2011). Sin embargo, la

metodología a pesar de su rigurosidad tiene falencias debido a la generalidad de las ecuaciones para el cálculo y los amplios límites para el análisis de la sostenibilidad. Esto lleva a que la metodología carezca de un proceso adecuado de adaptación que permita comparar el uso del recurso hídrico y la sostenibilidad ambiental del mismo y así propiciar la toma de decisiones e implementación de acciones correctivas adecuadas en los diferentes factores de cálculo.

La metodología ha tenido adaptaciones principalmente para el sector industrial y para el sector agrícola, pero en el sector académico universitario no ha presentado avances. Por lo que el presente desarrollo busca realizar la adaptación de la metodología de la WFN al sector de campus universitario por medio de la modificación de ecuaciones y límites del sistema de cálculo tanto temporal como espacialmente. Esto permitirá obtener resultados robustos, comparables y convirtiendo la metodología en una herramienta adecuada para la toma de decisiones enfocadas en la gestión del uso eficiente del recurso hídrico. Adicionalmente esto se convierte en un inicio para establecer la metodología a escalas superiores como las municipales.

Este estudio es de gran importancia ya que el sector universitario se comporta como una ciudad dadas sus actividades de investigación asociadas al sector industrial y las actividades académicas y administrativas comparables con actividades domésticas en los hogares. De esta manera, la fase aplicativa de la metodología se realizará en el campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, teniendo en cuenta que es un espacio controlado y dado su tamaño y actividades realizadas internamente. Esto permite desarrollar el cálculo de la huella hídrica para este sector y así alcanzar aproximaciones a un sistema de mayor escala.

2. Marco teórico

La huella hídrica o huella de agua es, de acuerdo con la WFN, “un indicador multidimensional que muestra los volúmenes de consumo por origen y los volúmenes de contaminación por tipo de contaminación; todos los componentes del agua dulce total están geográfica y temporalmente especificados” (Hoekstra et al., 2011). Por otro lado, la ISO define la huella hídrica como una “métrica o métricas con las que se cuantifican los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua” (International Organization for Standardization, 2015). De esta manera se puede asumir la huella hídrica como un balance de masa del volumen de agua que se consume o se contamina.

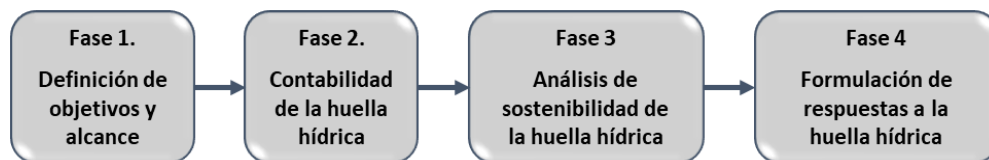
La huella hídrica se contabiliza por medio de balances hídricos de entrada y salida del sistema, junto con la información de los análisis fisicoquímicos de los efluentes. A partir de esta información se puede establecer que la huella hídrica en su forma más genérica puede ser contabilizada de múltiples formas. Sin embargo, la WFN y la ISO establecieron metodologías para evaluar la huella hídrica, dentro de lo cual se establece el cálculo de este indicador o métrica; es así como nace en 2011 el “Manual de evaluación de la huella hídrica. Establecimiento del estándar mundial” y en el año 2014 la “ISO-14046:2014, Gestión ambiental – Huella hídrica – Principios, requisitos y directrices”. Es por esta razón que la presente sección se realizará un análisis de las metodologías, sus diferencias y su aplicabilidad.

Es importante resaltar que el presente estudio se centra en la metodología desarrollada por la WFN. Sin embargo, es posible que dentro de la sección de Estudio bibliográfico, se encuentre la aplicación de las dos metodologías en un mismo desarrollo investigativo. Por consiguiente, en la presente sección se realiza la descripción de la metodología desarrollada por la WFN y en el **Anexo A** se detalla la metodología de la ISO 14046. Así mismo en el **Anexo B** se profundiza en las diferencias de ambas metodologías.

Es así que la huella hídrica de acuerdo con la WFN, es un indicador que permite conocer el uso o apropiación del agua dulce, es decir permite conocer el volumen total de agua consumida y contaminada en un proceso productivo, por un empresa, un consumidor o en una zona regional específica, de forma directa e indirecta (Hoekstra et al., 2011). A partir de esto la *Evaluación de la huella hídrica* o WFA (por sus siglas en inglés) es un conjunto de actividades que permite realizar un análisis completo de consumo y contaminación del agua dulce en un contexto espacio temporal por medio de la aplicación de cuatro fases.

Las fases de aplicación de la WFA (ver **Figura 2-1**) son: **1) la definición de objetivos y alcance**, esta etapa dependerá del estudio que se desea realizar, la zona donde se desarrolla el estudio, el nivel de detalle al que se quiera llegar y el límite espacio temporal a evaluar. Esto teniendo en cuenta que los objetivos pueden ser para un empresa o sector empresarial, para un producto o proceso productivo, para un consumidor o grupo de consumidores (individuo, nación, municipio país o humanidad en su conjunto), o de un área geográficamente delimitada. **2) Contabilidad de la huella hídrica**, en esta fase se realiza la recolección de datos y los cálculos acorde a la selección de objetivos y el alcance establecido para el estudio en cuestión. **3) Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica**, en esta fase se evalúa la huella hídrica desde el enfoque ambiental, social y económico, estableciendo la existencia o no de puntos críticos de la huella hídrica teniendo en cuenta la referencia espacio temporal de los límites del sistema. **4) Formulación de respuestas a la huella hídrica**, esta es la fase final donde se hacen propuestas para reducir la huella hídrica y sus impactos asociados.

Figura 2-1: Fases de la evaluación de la huella hídrica.



Fuente: Adaptado de (Hoekstra et al., 2011)

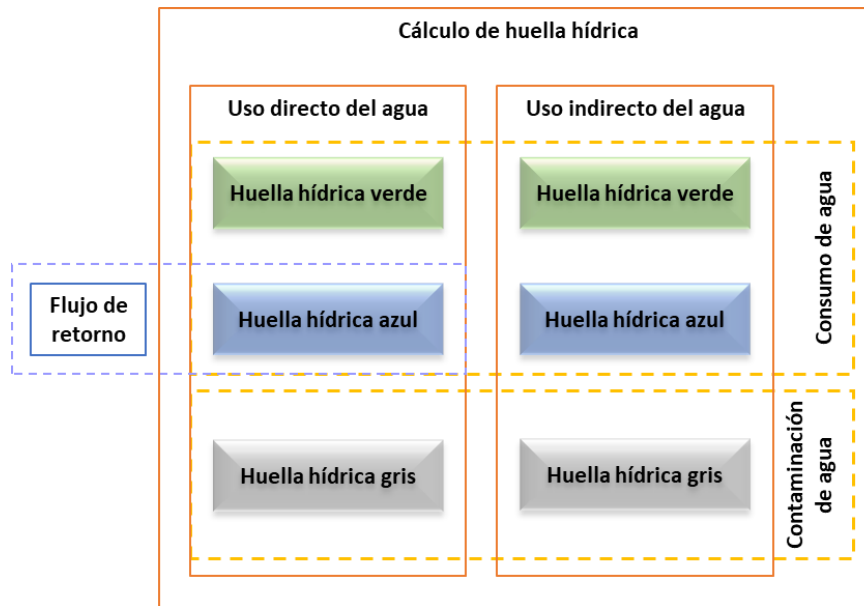
Teniendo en cuenta que el presente estudio busca realizar una adaptación metodológica para ser aplicado en campus universitarios, las fases que pueden tener variaciones importantes y que van a ser analizadas en esta sección son la fase 2 de contabilidad de la huella hídrica y la fase 3 de análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica. Dentro de la

metodología de la WFA la contabilidad de la huella hídrica, como se mencionó anteriormente, tiene una apropiación del recurso hídrico de forma directa e indirecta, es decir, es la suma entre la huella hídrica directa (HH_{dir}) y la huella hídrica indirecta (HH_{ind}) lo cual se puede observar en la ecuación (2-1).

$$HH_{total} = HH_{dir} + HH_{indir} [m^3] \quad (2-1)$$

Así mismo, la huella hídrica tanto directa como indirecta está conformada por tres componentes, los cuales son la huella hídrica azul, la huella hídrica verde, y la huella hídrica gris (ver **Figura 2-2**).

Figura 2-2: Diagrama de cálculo de la huella hídrica.



Fuente: Adaptado de (Hoekstra et al., 2011)

Es importante aclarar que las ecuaciones establecidas para las huellas hídricas azul, verde y gris dentro de la metodología WFA son calculadas únicamente en la huella hídrica directa, ya que es el uso del recurso hídrico bajo el cual se tiene control y conocimientos dentro de la zona de estudio.

Por otra parte, la huella hídrica indirecta al ser el recurso hídrico asociado a los recursos o insumos que son utilizados tiene las componentes azul, verde y gris de la huella hídrica de

manera intrínseca en el agua virtual de cada uno. Ejemplo de algunos recursos que pueden ser calculados por la huella hídrica indirecta son la energía, papel, plástico, materias primas, entre otros. Estos son consumos indirectos, ya que al desconocer el proceso de fabricación o producción no se puede calcular a detalle cada una de las componentes, solo se conoce el uso hídrico total por medio de su contenido de agua virtual o agua incorporada.

El contenido de agua virtual es “el volumen de agua consumida o contaminada para la elaboración de un producto o servicio, medido a lo largo de la cadena de producción o generación” esto de acuerdo con lo establecido por la WFN (Hoekstra et al., 2011). Si bien el concepto de huella hídrica y contenido de agua virtual pueden ser muy similares, tienen una diferencia importante y es que la huella hídrica da un contexto espacio temporal del cálculo realizado junto con una especificidad en el tipo de huella hídrica calculada (azul, verde y gris), que dan claridad de qué tipo de consumo o contaminación se efectuó. A diferencia del contenido de agua virtual que da información neta del agua incorporada en el recurso o insumo en cuestión, sin especificar, el cuándo, el dónde y el tipo de uso del recurso hídrico. Sin embargo, debido a que el agua virtual engloba el consumo hídrico de procesos completos en la fabricación de un producto, es muy usada para calcular la huella hídrica a nivel regional.

Es importante aclarar que la división entre la huella hídrica directa e indirecta se da de manera definida y clara para el cálculo de huella hídrica de un consumidor, grupo de consumidores o de un productor que sería el caso de un campus universitario que se puede definir como un grupo de consumidores. Sin embargo, hay otras categorías que tienen diferentes ecuaciones para el cálculo de la huella hídrica, estas ecuaciones son un poco diferentes y se presentan en la siguiente **Tabla 2-1**.

Tabla 2-1: Ecuaciones para calcular la huella hídrica de otras categorías.

Tipo de huella	Ecuación	Variables	Numeración
Huella hídrica de un producto	$HH_{prod}[p] = \frac{\sum_{s=1}^k HH_{proc}[S]}{P [p]} \left[\frac{volumen}{masa} \right]$	HH _{proc} [S] = huella hídrica de la etapa S del proceso. P [p] = cantidad producida del producto p. HH _{proc} [p] = huella hídrica del producto final p. HH _{prod} [i] = huella hídrica del producto de entrada i.	(2-2)

Tipo de huella	Ecuación	Variables	Numeración
	$HH_{prod}[p] = (HH_{proc}[p] + \sum_{i=1}^y \frac{HH_{prod}[i]}{f_p[p,i]}) \times f_v[p] \left[\frac{volumen}{masa} \right]$	$f_p[p,i]$ = fracción de producto. $f_v[p]$ = fracción de valor.	
Huella hídrica de un área geográficamente delimitada	$HH_{\acute{a}rea} = \sum_q HH_{proc}[q] \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$	$HH_{\acute{a}rea}$ = huella hídrica dentro de un área geográficamente delimitada. HH_{proc} = huella hídrica de un proceso q dentro de un área geográficamente delimitada.	(2-3)
Balance de agua virtual de un área geográficamente delimitada	$V_{i,net} = V_i - V_e \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$	$V_{i,net}$ = importaciones netas de agua virtual. V_i = importación bruta de agua virtual. V_e = exportación bruta de agua virtual.	(2-4)
Huella hídrica nacional	$HH_{cons,nac} = HH_{cons,nac,int} + HH_{cons,nac,Ext} \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$ $HH_{cons,nac,int} = HH_{\acute{a}rea,nac} + V_{e,d} \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$ $HH_{cons,nac,ext} = V_i - V_{e,r} \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$ $V_e = V_{e,d} - V_{e,r} \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$	$HH_{cons,nac}$ = huella hídrica de los consumidores de una nación. $HH_{cons,nac,int}$ = huella hídrica interna del consumo nacional. $HH_{cons,nac,ext}$ = huella hídrica externa del consumo nacional. $HH_{\acute{a}rea,nac}$ = huella hídrica dentro de una nación $V_{e,d}$ = exportación de productos producidos con recursos hídricos de uso doméstico. V_i = importación de agua virtual de la nación. $V_{e,r}$ = agua reexportada de origen extranjero. V_e = exportación de agua virtual.	(2-5)
Huella hídrica dentro de una nación	$HH_{\acute{a}rea} = \sum_q HH_{proc}[q] \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$	$HH_{\acute{a}rea}$ = huella hídrica dentro de una nación. HH_{proc} = huella hídrica de un proceso q dentro de una nación.	(2-6)
Huella hídrica del consumo nacional (enfoque de arriba hacia abajo)	$HH_{cons,nac} = HH_{\acute{a}rea,nac} + V_i - V_e \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$ $V_i = \sum_{ne} \sum_p (T_i[n_e,p] \times HH_{prod} \left[\frac{volumen}{tiempo} \right])$ $V_e = \sum_p T_c[p] \times HH_{prod}[p] \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$	$HH_{cons,nac}$ = huella hídrica de consumo nacional. $HH_{\acute{a}rea,nac}$ = huella hídrica dentro de una nación V_i = importación de agua virtual. V_e = exportación de agua virtual.	(2-7)

Tipo de huella	Ecuación	Variables	Numeración
Huella hídrica del consumo nacional (enfoque de abajo hacia arriba)	$HH_{cons,nac}$ $= HH_{cons,nac,dir}$ $+ HH_{cons,nac,indir} \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$ $HH_{cons,nac,indir}$ $= \sum_p C[p] \times HH_{prod}[p] \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$	$HH_{cons,nac}$ = huella hídrica de los consumidores de una nación. $HH_{cons,nac,dir}$ = huella hídrica directa de consumo nacional. $HH_{cons,nac,indir}$ = huella hídrica indirecta de consumo nacional.	(2-8)
Huella hídrica externa del consumo nacional	$HH_{cons,nac,ext} = \frac{HH_{cons,nac}}{HH_{\acute{a}rea,nac} + V_i}$ $\times V_i \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$	$HH_{cons,nac}$ = huella hídrica de consumo nacional. $HH_{\acute{a}rea,nac}$ = huella hídrica dentro de una nación V_i = importación de agua virtual.	(2-9)

Fuente: Adaptado de (Hoekstra et al., 2011)

2.1 Huella hídrica directa

La huella hídrica directa es el consumo de agua dulce relacionado con las actividades principales (directas) del proceso o la población específica que se esté evaluando (Hoekstra et al., 2011). De esta manera, en la huella hídrica directa, acorde a la metodología WFA, se evalúa de manera cuantitativa el uso y consumo del agua azul (huella hídrica azul), agua verde (huella hídrica verde) y agua gris (huella hídrica gris).

La ecuación que permite calcular la huella hídrica directa y representa la relación entre la huella hídrica azul (HH_{azul}), verde (HH_{verde}) y gris (HH_{gris}) para un proceso o una población (consumidores o grupo de consumidores) es la ecuación (2-10):

$$HH_{directa} = HH_{azul} + HH_{verde} + HH_{gris} [m^3] \tag{2-10}$$

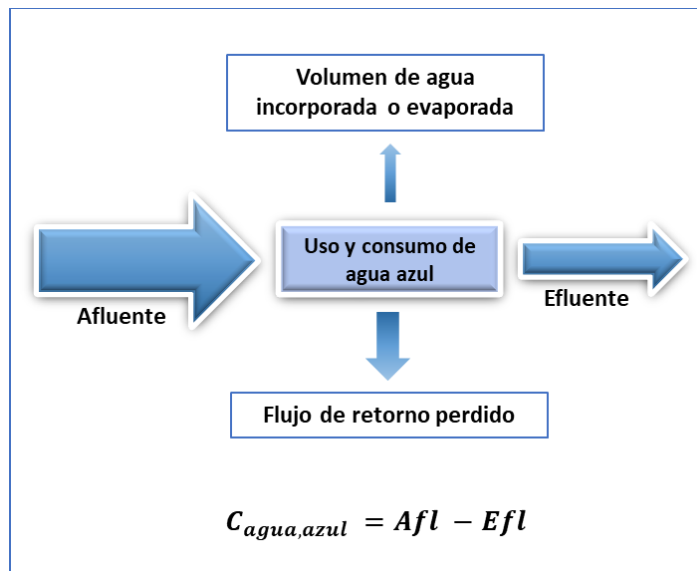
2.1.1 Huella hídrica azul

La huella hídrica azul es el consumo del agua dulce o agua azul provenientes de fuentes hídricas superficiales o subterráneas que no regresan a su cuenca hidrográfica de procedencia. Esto ocurre cuando el agua es incorporada en un producto, tiene un proceso de evaporación, es trasladada a otra zona diferente a su cuenca hidrográfica de origen o

llega al mar, estos últimos hacen referencia al flujo de retorno perdido (FRP). (Hoekstra et al., 2011)

La ecuación general para realizar el cálculo de la huella hídrica azul sale a partir de un balance de masa que se realiza para cada caso donde de manera general se da un flujo de entrada que es el afluente (Afl) y un flujo de salida que es el efluente (Efl) de agua que regresa a la cuenca hidrográfica de origen. En la **Figura 2-3**, se puede observar de manera esquemática y general dicho balance para la huella hídrica azul, sin embargo, las variables de uso y consumo de agua azul ($C_{agua, azul}$) pueden variar.

Figura 2-3: Balance hídrico de agua azul.



Fuente: Adaptado de (Hoekstra et al., 2011)

Por otra parte, en la **Tabla 2-2**, se puede observar las ecuaciones que se pueden utilizar para calcular la huella hídrica azul acorde al enfoque sectorial establecido dentro de los objetivos y el alcance de cada estudio a realizar.

Tabla 2-2: Ecuaciones para calcular la huella hídrica azul.

Tipo de huella	Ecuación	VARIABLES	Numeración
Huella hídrica azul de un proceso	$HH_{proc, azul} = E_{azul} + I + FRP [volumen / tiempo]$	E_{azul} = Evaporación de agua azul. I_{azul} = Incorporación de agua azul. FRP = Flujo de retorno perdido.	(2-11)

Tipo de huella	Ecuación	Variables	Numeración
Huella hídrica azul de un cultivo	$HH_{proc,azul} = \frac{UAC_{azul}}{R} \left[\frac{Volumen}{masa} \right]$	UAC _{azul} = Uso de agua azul del cultivo. R = rendimiento el cultivo.	(2-12)

Fuente: Adaptado de (Hoekstra et al., 2011)

La UAC_{azul} es el agua de riego evaporada que se define como la evapotranspiración de agua azul (ET_{azul}), durante todo el periodo de tiempo que dura el crecimiento del cultivo (PCC) o una cobertura vegetal, como se puede observar en la **ecuación (2-13)** (Hoekstra et al., 2011). Si se realiza un cálculo de huella hídrica verde y un cálculo de huella hídrica azul en un mismo estudio es importante recordar que el agua de riego proviene de una fuente hídrica superficial o subterránea (agua azul) y se contabiliza dentro del agua consumida o incorporada en el proceso, es decir hace parte del afluente. Por consiguiente y para evitar una doble contabilización, se debe restar la huella hídrica azul de una zona vegetal (ecuación **(2-12)**) del cálculo total de la huella hídrica verde.

$$UAC_{azul} = 10 \times \sum_1^{PCC} ET_{azul} \quad [m^3] \quad (2-13)$$

La ET_{azul} es el volumen de agua que requiere la cobertura vegetal que no ha sido satisfecha por la precipitación efectiva (Pe), siendo esta el valor de la precipitación que realmente es aprovechado por la cobertura vegetal, tal como se expresa en la ecuación **(2-14)** (Hoekstra et al., 2011). En caso de que la precipitación efectiva sea mayor que el requerimiento hídrico de la cobertura vegetal expresado como la evapotranspiración del cultivo (ET_c) no habrá limitaciones de agua para el cultivo, por lo cual no habrá requerimiento de riego (ecuación **(2-15)**) (Hoekstra et al., 2011).

$$ET_{azul} = ET_c - Pe \quad SI \quad ET_c > Pe \quad [longitud/tiempo] \quad (2-14)$$

$$ET_{azul} = 0 \quad SI \quad ET_c \leq Pe \quad [[longitud/tiempo]] \quad (2-15)$$

La precipitación efectiva (Pe) se calcula de acuerdo con el volumen de lluvia total que se haya generado durante el tiempo estudiado, es decir la precipitación total (Pt). Para hallar el valor correspondiente a la Pe, se deben hacer correcciones al valor de Pt por medio de

factores de consumo real de la vegetación presente. De esta manera, se presenta la ecuación de la USDA SCS (ecuaciones (2-16) y (2-17)).

$$Pe = Pt \left(\frac{125 - 0,2Pt}{125} \right) \quad SI \quad Pt < 250 \text{ mm} \quad [\text{longitud/tiempo}] \quad (2-16)$$

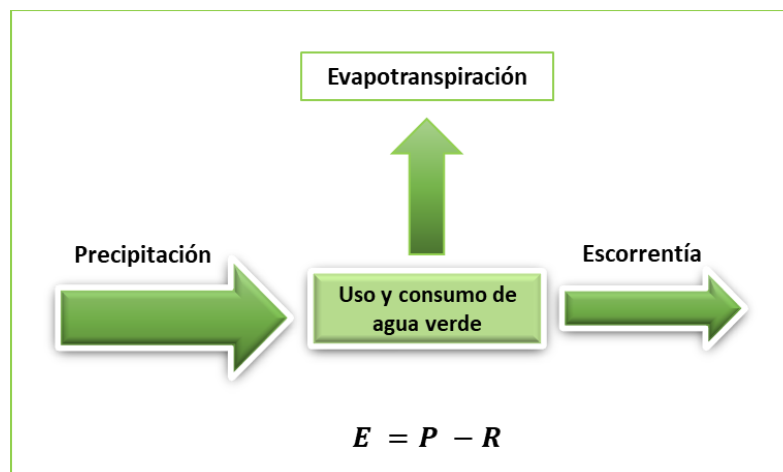
$$Pe = 125 + 0,1Pt \quad SI \quad Pt > 250 \text{ mm} \quad [\text{longitud/tiempo}] \quad (2-17)$$

2.1.2 Huella hídrica verde

La huella hídrica verde es el volumen de agua proveniente de la precipitación que no tiene un proceso de escorrentía, debido a que es integrada en los cultivos o productos de estos en un área determinada. Esto se debe a que el recurso hídrico verde queda incorporado en el producto agrícola o en las plantas de interés. (Hoekstra et al., 2011)

La ecuación general para realizar el cálculo de la huella hídrica verde se puede calcular a partir de la ecuación de balance hídrico a largo plazo de una cuenca hidrográfica (Poveda et al., 2007). Tal y como ocurre con la huella hídrica azul, existe un flujo de entrada que en este caso es la precipitación promedio (P), tiene un flujo de salida que hace referencia a la escorrentía en el terreno (R), y de esta forma el consumo de agua será la evapotranspiración (E). Para ejemplificar esto, se muestra gráficamente el balance hídrico acompañado de la expresión matemática en la **Figura 2-4**.

Figura 2-4: Balance hídrico de agua verde.



Fuente: Adaptado de (Hoekstra et al., 2011)

Por otra parte, en la **Tabla 2-3**, se observan las ecuaciones que se pueden utilizar para calcular la huella hídrica verde acorde al enfoque sectorial establecido dentro de los objetivos y el alcance de cada estudio a realizar.

Tabla 2-3: Ecuaciones para calcular la huella hídrica verde.

Tipo de huella	Ecuación	Variables	Numeración
Huella hídrica verde de un proceso	$HH_{proc,verde} = E_{verde} + I_{verde} [volumen/tiempo]$	E_{verde} = Evaporación de agua verde. I_{verde} = Incorporación de agua verde.	(2-18)
Huella hídrica verde de un cultivo	$HH_{proc,verde} = \frac{UAC_{verde}}{R} [\frac{Volumen}{masa}]$	UAC_{verde} = Uso de agua verde del cultivo. R = rendimiento el cultivo	(2-19)

Fuente: Adaptado de (Hoekstra et al., 2011)

La UAC_{verde} es el balance hídrico de la cobertura vegetal en la zona de estudio, donde este se representa con la evapotranspiración del agua verde, tal y como se observa en la ecuación **(2-20)** (Hoekstra et al., 2011).

$$UAC_{verde} = 10 \times \sum_1^{PCC} ET_{verde} \quad [m^3] \quad \text{(2-20)}$$

La ET_{verde} es la evapotranspiración del agua verde de la cobertura vegetal que depende de la evapotranspiración total del cultivo (ET_c) y la precipitación efectiva (P_e) De esta manera ET_{verde} tomará el menor valor entre estas dos variables (ecuaciones **(2-21)** y **(2-22)**) (Hoekstra et al., 2011).

$$ET_{verde} = ET_c \quad SI \quad ET_c < P_e \quad [longitud/tiempo] \quad \text{(2-21)}$$

$$ET_{verde} = P_e \quad SI \quad ET_c > P_e \quad [longitud/tiempo] \quad \text{(2-22)}$$

La ET_c es la evapotranspiración de un cultivo y se define como el producto entre el coeficiente de un cultivo (K_c) que permite establecer condiciones propias del suelo donde se encuentra el cultivo y la evapotranspiración de referencia (ET_o) que es la

evapotranspiración de un cultivo conocido en condiciones óptimas y por ende sin estrés hídrico (ecuación **(2-23)**) (Hoekstra et al., 2011).

$$ET_c = K_c * ET_o \quad [mm] \quad (2-23)$$

El cálculo de ET_o puede llegar a tener una alto complejidad en su cálculo ya que la ecuación más integral para este cálculo es el método FAO Penman Monteith (ecuación**(2-24)**). En esta ecuación se debe considerar múltiples factores tales la radiación neta (R_n), el flujo de calor en el suelo (G), como la densidad del aire (ρ_a), el calor específico del aire (C_p), el déficit de presión de vapor del aire ($e_s - e_a$), la resistencia aerodinámica de la superficie para el vapor de agua (r_a), la pendiente de la curva de presión de saturación (r_s), la pendiente de la curva de presión de saturación (Δ) y la constante psicrométrica (λ). (Clarke et al., 2000; Hoekstra et al., 2011).

$$\lambda ET_o = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho_a C_p (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \lambda \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad [mm] \quad (2-24)$$

Como se puede observar en la ecuación **(2-24)**, calcular la ET_o por medio del método de la FAO Penman Monteith es muy complejo. Sin embargo, existe CROPWAT el cual es un software libre que desarrolla la ecuación **(2-24)** solicitando el ingreso de datos de la zona que se pueden obtener a partir de estaciones hidrometeorológicas, datos de las características del suelo y del cultivo o cobertura vegetal (**anexo D**).

2.1.3 Huella hídrica gris

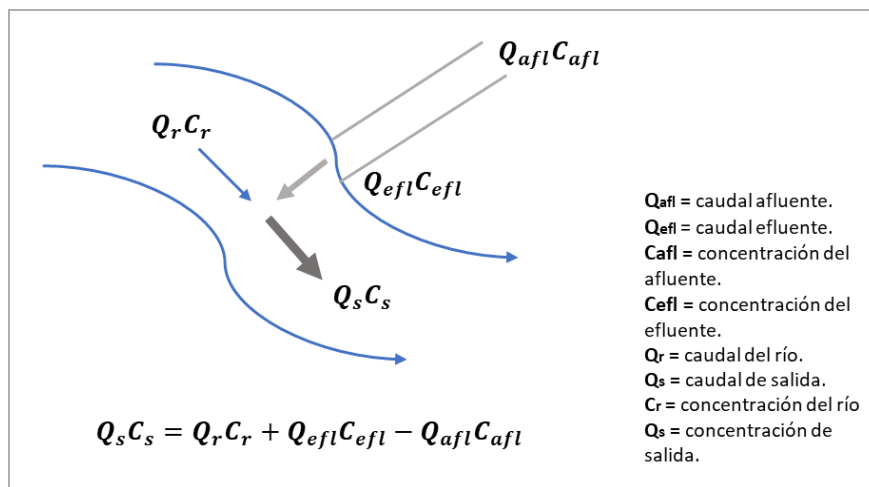
La huella hídrica gris se relaciona con la contaminación de agua dulce por el vertimiento de aguas grises provenientes del tipo de consumo hídrico que se está analizando. Es decir, es el volumen de agua dulce requerido para reducir la concentración del vertimiento a valores normativos teniendo en cuenta la concentración natural presente en la fuente de agua. (Hoekstra et al., 2011)

En un vertimiento existen múltiples parámetros contaminantes, y se realiza el cálculo de la huella hídrica gris para aquellos que se encuentren dentro de la normatividad vigente para

vertimiento de aguas residuales según sea el tipo y lugar de vertimiento; luego de realizar el cálculo para cada uno de los parámetros, se selecciona como huella hídrica gris aquella que haya generado el mayor valor respecto a los demás, es decir si la huella hídrica gris generada por el parámetro de DBO fue superior a la calculada por los demás parámetros, esta huella hídrica generada representará todo el sistema evaluado.

La ecuación general para el cálculo de la huella hídrica gris parte de un balance de masa donde se considera la calidad del agua en la fuente hídrica receptora, asegurando que las concentraciones del vertimiento no superen los valores máximos permitidos por la normatividad. Esto se puede observar de manera gráfica y bajo la expresión matemática más general en la **Figura 2-5**.

Figura 2-5: Balance de masa en la fuente hídrica receptora.



Fuente: Elaboración propia.

Luego de realizar las operaciones matemáticas pertinentes a la ecuación presentada en la **Figura 2-5**. A partir de ello, se presentan las ecuaciones resultantes en la **Tabla 2-4** específicas para cada caso.

Tabla 2-4: Ecuaciones para calcular la huella hídrica gris.

Tipo de huella	Ecuación	VARIABLES	Numeración
Huella hídrica gris de un proceso	$HH_{proc,gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$	L = carga contaminante. C _{max} = concentración máxima permitida.	(2-25)

Tipo de huella	Ecuación	Variables	Numeración
		C_{nat} = concentración natural en la masa de agua receptora.	
Huella hídrica gris para un vertimiento puntual	$HH_{proc,gris} = \frac{(Efl \times C_{efl}) - (Extr \times C_{real})}{C_{max} - C_{nat}} \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$	Efl = volumen del efluente C_{efl} = concentración de contaminante del efluente. $Extr$ = extracción del agua. C_{real} = concentración real del agua extraída. C_{max} = concentración máxima permitida. C_{nat} = concentración natural en la masa de agua receptora.	(2-26)
Huella hídrica gris cuando el efluente sea igual a la extracción (afluente)	$HH_{proc,gris} = \frac{C_{efl} - C_{real}}{C_{max} - C_{nat}} \times Efl \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$	Efl = volumen del efluente C_{efl} = concentración de contaminante del efluente. C_{real} = concentración real del agua extraída. C_{max} = concentración máxima permitida. C_{nat} = concentración natural en la masa de agua receptora.	(2-27)
Huella hídrica gris por contaminación térmica	$HH_{proc,gris} = \frac{T_{efl} - T_{real}}{T_{max} - T_{nat}} \times Efl \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$	T_{efl} = temperatura del efluente. T_{real} = temperatura real del agua extraída. T_{max} = temperatura máxima permitida. T_{nat} = temperatura natural en la masa de agua receptora.	(2-28)
Huella hídrica gris para una contaminación difusa	$HH_{proc,gris} = \frac{\alpha \times Apl}{C_{max} - C_{nat}} \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$	α = lixiviación de escorrentía superficial. Apl = aplicación de sustancias químicas por hectárea. C_{max} = concentración máxima permitida. C_{nat} = concentración natural en la masa de agua receptora.	(2-29)
Huella hídrica gris para un cultivo	$HH_{proc,gris} = \frac{(\alpha - Apl) / (C_{max} - C_{nat})}{R} \left[\frac{volumen}{masa} \right]$	α = lixiviación de escorrentía superficial. Apl = aplicación de sustancias químicas por hectárea C_{max} = concentración máxima permitida. C_{nat} = concentración natural en la masa de agua receptora. R = rendimiento el cultivo	(2-30)

Fuente: Adaptado de (Hoekstra et al., 2011)

La huella hídrica gris al ser una ecuación bastante compleja tiene algunas consideraciones específicas para los procesos de contaminación puntual, es decir un vertimiento puntual. Estas consideraciones se encuentran establecidas en la **Tabla 2-5**.

Tabla 2-5: Consideraciones especiales para la huella hídrica gris

Ecuación	Numeración	Consideración
$C_{ef} = C_{real}$	(2-31)	“La huella hídrica gris asociada es nula”.
$C_{ef} = C_{maxl}$ $\text{Y } C_{real} = C_{natt}$	(2-32)	- “La huella hídrica gris es igual a una fracción del efluente”. - “La huella hídrica es exactamente igual al efluente”.
$C_{ef} < C_{real}$	(2-33)	La huella hídrica gris será negativa, siendo el efluente más limpio que el afluente. Si el afluente es la misma zona de vertimiento, entonces se mejoraron, se “limpió” la zona de captación. Si esto ocurre, se excluye el resultado del cálculo.
$C_{max} = 0$	(2-34)	“Cualquier efluente con una concentración mayor a cero creará una huella hídrica gris infinitamente grande”.
$C_{max} = C_{nat}$	(2-35)	“Alcanzará valores infinitamente grandes”. Poco probable que ocurra debido a que no es probable que el valor máximo de vertimiento sea igual a la concentración natural de la zona de vertimiento.
$Extr = 0$	(2-36)	Esta afirmación se cumple cuando la zona de vertimiento es diferente a la zona de extracción del recurso hídrico.
N/A	N/A	Si bien la huella hídrica gris se puede medir con diferentes parámetros de caracterización de aguas residuales, solo se tendrá en cuenta el parámetro más crítico que haya generado la huella hídrica más grande.

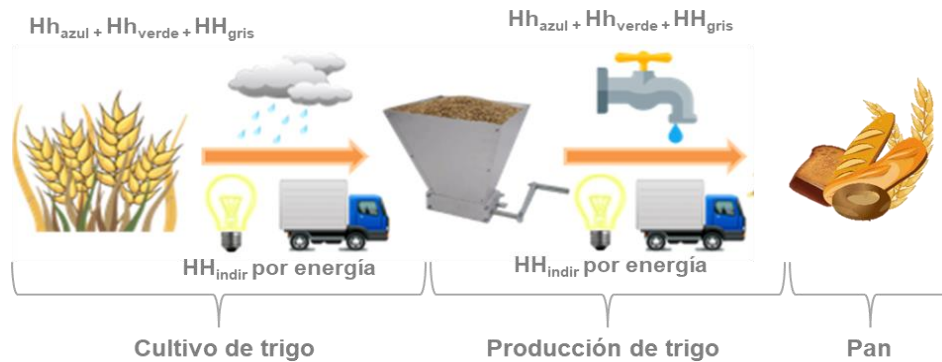
Fuente: Adaptado de (Hoekstra et al., 2011)

2.2 Huella hídrica indirecta

La huella hídrica indirecta, como se mencionó anteriormente, es el consumo hídrico causado por las materias primas o los elementos que son usados para la fabricación de un producto en el caso de una industria, o el consumo de bienes y servicios de una persona o una población (Hoekstra et al., 2011). Este consumo es indirecto ya que se desconoce el proceso exacto y los consumos hídricos específicos en la fabricación y producción de esos bienes y servicios.

Para comprender este concepto, se presenta un ejemplo en la **Figura 2-6**. Allí se puede evidenciar la huella hídrica directa e indirecta en cada fase. Si se tiene en cuenta la fase de cultivo de trigo, la huella hídrica directa sería el consumo de agua por riego, la huella hídrica verde sería el consumo de agua lluvia, la huella hídrica gris sería la contaminación de fuentes hídricas por la aplicación de fertilizantes, y la huella hídrica indirecta se da por el consumo de energía eléctrica para los aspersores y el combustible consumido en los tractores y otros vehículos. Por otro lado, si el proceso a analizar es el procesamiento del trigo para venderlo de manera industrial, la huella hídrica directa es el consumo de agua para el mantenimiento en las instalaciones de la empresa, la huella hídrica gris correspondería al vertimiento del consumo hídrico realizado, y la huella hídrica indirecta sería principalmente por el consumo de energía eléctrica al interior de las instalaciones. Finalmente, si una persona consume un pan que en la panadería más cercana, la huella hídrica directa de ese proceso es cero, porque para consumir el pan no requiere de agua, pero si tiene una huella hídrica indirecta asociada a la suma de la huella hídrica generada en todos los procesos anteriores.

Figura 2-6:Ejemplo huella hídrica indirecta.



Fuente: Elaboración propia.

La ecuación **(2-37)** describe el cálculo de la huella hídrica indirecta (HH_{indir}), la cual es calculada por medio de la sumatoria de la huella hídrica de todos los productos (insumos o elementos) consumidos ($HH_{prod}[P]$) por el consumo de estos mismos productos ($C[P]$).

$$HH_{ind} = \sum_P (C[P] \times HH_{prod}[P]) \quad [volumen/tiempo] \quad (2-37)$$

Esta ecuación va a tener variaciones de acuerdo con tipo de consumo realizado, es decir, si el consumo es de energía entonces el producto P será la energía, si el consumo es de gasolina entonces el producto P será la gasolina, y así ocurre con cualquier otro consumo.

2.3 Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica

El análisis de sostenibilidad de la huella hídrica es un indicador que compara los recursos hídricos disponibles con las huellas hídricas calculadas (azul, verde y gris) (Hoekstra et al., 2011). La razón por la cual se realiza este análisis se debe a la necesidad de hacer un acercamiento al significado de las huellas hídricas calculadas y dimensionar su impacto. Adicionalmente, este análisis tiene tres dimensiones que son la ambiental, la social y la económica, y para garantizar que la huella hídrica si es sostenible se deben cumplir las tres dimensiones (Hoekstra et al., 2011).

La sostenibilidad de la huella hídrica desde la dimensión social hace referencia al volumen hídrico requerido por las comunidades que se encuentran dentro del área de influencia directa, a las cuales se les debe garantizar el suministro mínimo para satisfacer sus necesidades básicas tales como beber, cocinar, lavar, entre otras (Hoekstra et al., 2011). Así mismo desde la dimensión económica, se debe analizar si los beneficios resultantes por el uso de la huella hídrica son mayores a los costos asociados a su generación (Hoekstra et al., 2011). Sin embargo, el desarrollo presente se centrará en el análisis de la sostenibilidad ambiental de la huella hídrica el cual busca garantizar que la calidad del agua permanezca acorde a los requerimientos normativos de la zona de estudio, de esta manera se debe garantizar el desarrollo ecosistémico y ecológico de las zonas de captación y vertimiento (Hoekstra et al., 2011).

Por otra parte, el análisis de sostenibilidad de la huella hídrica no solo se analiza teniendo en cuenta sus tres dimensiones, también se debe desarrollar según el sector en el que se esté ejecutando la WFA. Es decir, el cálculo puede ser para un área geográfica específica, para un proceso productivo, para un producto, para una empresa o para un consumidor (Hoekstra et al., 2011).

Para cada caso de análisis se tienen consideraciones diferentes, pero todas dependen unas de otras, el cálculo de la sostenibilidad de la huella hídrica para un consumidor

depende del análisis realizado para los productos que el consumió y también de la huella hídrica per cápita de la región donde esté ubicado (Hoekstra et al., 2011). La sostenibilidad de la huella hídrica de una empresa depende de los productos fabricados (Hoekstra et al., 2011). En el caso de la sostenibilidad para un producto depende del análisis realizado para las diferentes etapas del proceso que llevaron a su fabricación (Hoekstra et al., 2011). Por otra parte, el análisis para un proceso productivo depende de su ubicación geográfica, es decir del análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica en el área geográfica donde se encuentra, pero también depende de si las huellas hídricas pueden ser reducidas o evitadas sin afectar el ámbito social (Hoekstra et al., 2011). Finalmente, para el desarrollo del análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica a nivel geográfico contempla una ecuación para cada tipo de huella hídrica, así el indicador de escasez de agua verde (EA_{verde}) calcula la sostenibilidad ambiental para la huella hídrica verde, la escasez de agua azul (EA_{azul}) permite establecer la sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul y el nivel de contaminación del agua (NCA) establece la sostenibilidad de la huella hídrica gris (Hoekstra et al., 2011).

A partir del “Manual de evaluación: Manual para la evaluación de la Huella Hídrica. Huella de ciudades” desarrollado para América Latina por la WFN junto a otras entidades (Water Footprint Network et al., 2012), se establece el uso de la sostenibilidad de la huella hídrica ambiental aplicada a estudios regionales, también a los estudios de ciudades. De esta manera, y teniendo en cuenta que las universidades tienen el comportamiento de pequeñas ciudades debido a sus diversas actividades, se decide entonces analizar las ecuaciones establecidas para análisis regional en el cálculo de la sostenibilidad de la huella hídrica ambiental.

Bajo la consideración anterior, el análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica permite evaluar y establecer los puntos críticos donde la huella hídrica puede superar o supere la disponibilidad hídrica total en la cuenca hidrográfica de estudio tanto temporalmente como espacialmente, esto acorde a los límites y objetivos establecidos desde la fase uno de la aplicación de la metodología WFA y las huellas hídricas calculadas (Hoekstra et al., 2011). De esta manera se va a explicar cada una de las ecuaciones para los cálculos del análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica.

2.3.1 Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica verde

La sostenibilidad de la huella hídrica verde al igual que la huella hídrica verde en si misma está enfocada en los cultivos productivos, de esta manera, la EA_{verde} será la relación entre la huella hídrica verde (HH_{verde}) y la disponibilidad de agua verde (DA_{verde}), tal y como se puede observar en la ecuación **(2-38)** (Hoekstra et al., 2011).

$$EA_{verde} = \frac{HH_{verde}}{DA_{verde}} \quad (2-38)$$

De esta manera, la DA_{verde} se define como la evapotranspiración total de agua verde en una cuenca hidrográfica, la cual es el resultado de restarle al total de agua lluvia almacenada en el suelo (ET_{verde}), la evapotranspiración de las plantas naturales sin fines productivos (ET_{veg}), junto con la resta de la evapotranspiración de las zonas que por diversas situaciones no puedan ser cultivables (ET_{improd}) (Hoekstra et al., 2011). Ver ecuación **(2-39)**.

$$DA_{verde}[x, t] = ET_{verde}[x, t] - ET_{veg}[x, t] - ET_{improd}[x, t] [volumen/tiempo] \quad (2-39)$$

2.3.2 Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul

La sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul está definida por la EA_{azul} , esta es la relación entre la huella hídrica azul (HH_{azul}) generada por el proceso evaluado y la disponibilidad de agua azul (DA_{azul}) de la cuenca hidrográfica donde se esté realizando el estudio (Hoekstra et al., 2011). De esta manera, la **ecuación (2-40)** representa el cálculo para la EA_{azul} .

$$EA_{azul} = \frac{\sum HH_{azul}[x, t]}{DA_{azul}[x, t]} \quad (2-40)$$

La DA_{azul} es el volumen de agua que puede ser realmente usado por los seres humanos sin afectar los ecosistemas (**ecuación (2-41)**). Su cálculo se desarrolla teniendo en cuenta que al caudal total ofrecido por la cuenca hidrográfica (Q_{total}) o escorrentía natural, a la cual se le excluye el valor del caudal ecológico ($Q_{ecológico}$) que es el volumen de agua requerido para mantener las características ecológicas y ecosistémicas en las cuencas hidrográficas

y en los cursos de agua pertenecientes a los análisis realizados (Cantonati et al., 2020; Izquierdo & Madroño, 2014; Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial, 2010).

$$DA_{azul} = Q_{total} - Q_{ecológica} \quad (2-41)$$

La oferta hídrica total (Q_{total}) o disponibilidad hídrica total es el volumen de agua de la escorrentía superficial y abastece el flujo en los cauces de los ríos (IDEAM, 2014). La oferta hídrica total se puede calcular por medio de la ecuación de balance hídrico a largo plazo (Poveda et al., 2007) y con ayuda de un software de sistemas de información geográfica, esto para trazar la oferta hídrica disponible de toda la cuenca, o también se puede obtener por medio de un modelo lluvia escorrentía (para mayor detalle de este modelo, ver **Anexo E**) (Cantonati et al., 2020; Izquierdo & Madroño, 2014; Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial, 2010).

Por otra parte, el $Q_{ecológico}$ debe ser calculado acorde a la normatividad establecida y vigente en la zona donde se esté realizando el estudio.

2.3.3 Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica gris

La sostenibilidad ambiental de la huella hídrica gris se calcula a partir del nivel de contaminación del agua (NCA), el cual se depende de la huella hídrica gris (HH_{gris}) y de la escorrentía total disponible (E_{real}) en la cuenca hidrográfica de la zona de captación y su capacidad para asimilar la carga contaminante del vertimiento. Esta relación se puede evidenciar en la ecuación (2-42).

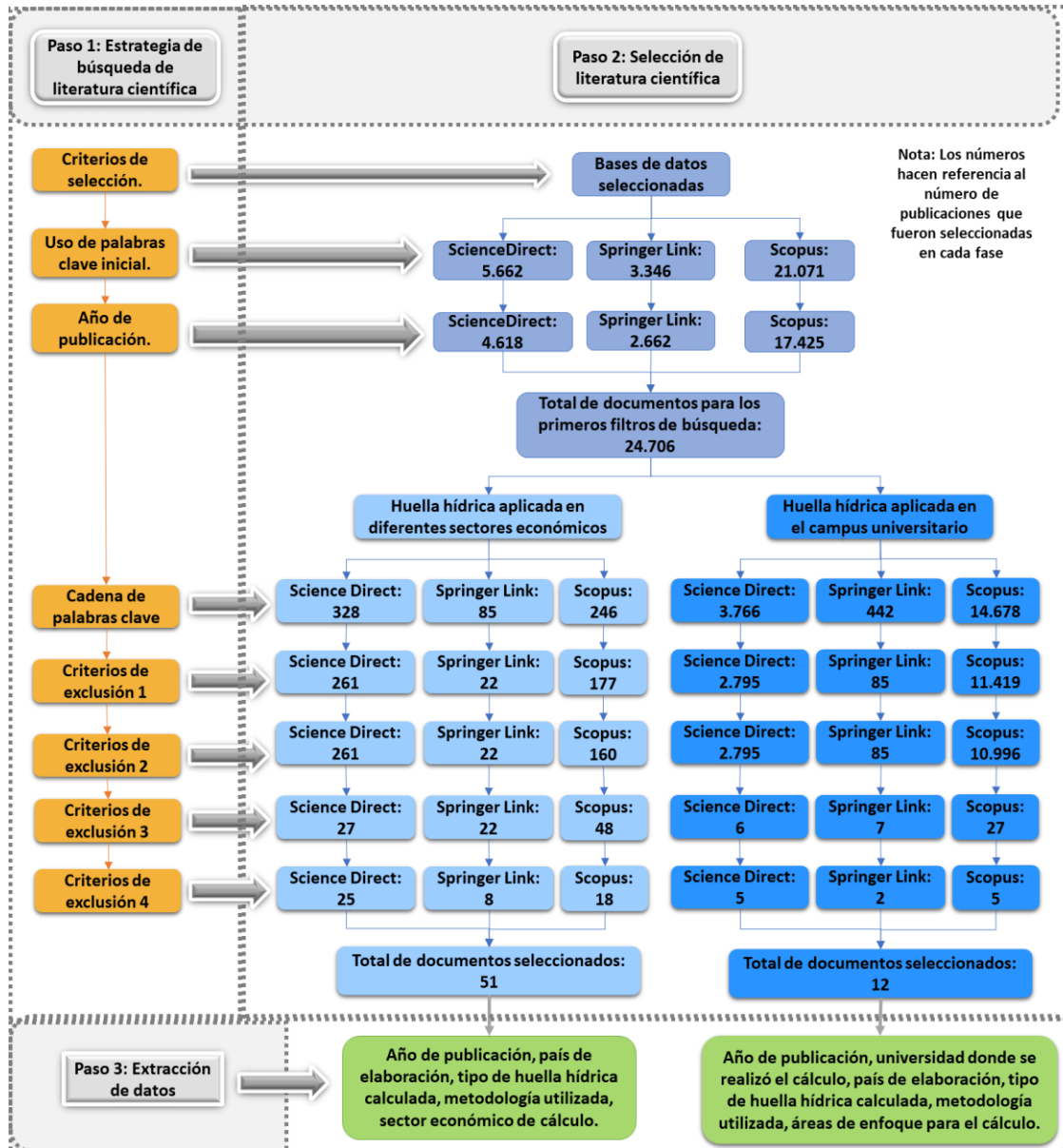
$$NCA = \frac{HH_{gris}}{E_{real}} \quad (2-42)$$

La E_{real} es equivalente a oferta hídrica total (Q_{total}), por lo tanto, su cálculo es exactamente igual a la descripción dada en la sección inmediatamente anterior.

3. Estudio bibliográfico

El estudio bibliográfico se centró en la recopilación de documentos científicos publicados en tres bases de datos a nivel mundial (Science Direct, Springer Link y Scopus) desde el año 2015 hasta el año 2022. En estas bases de datos se usaron palabras clave relacionadas principalmente con huella hídrica aplicada en múltiples sectores económicos y se realizó una segunda recopilación de documentos científicos donde se hizo énfasis en los campus universitarios. A estas búsquedas se aplicaron múltiples criterios de exclusión, permitiendo obtener artículos de aplicación de cálculo de la huella hídrica a partir de la metodología WFA desarrollada por la WFN. Estos artículos se examinaron según su relevancia de acuerdo con el contenido para una selección final, a partir de esto se realizaron múltiples análisis a la información de interés extraída.

La metodología desarrollada para la revisión bibliográfica descrita en esta sección se puede observar en la **Figura 3-1**. El detalle de cada una de las fases ejecutadas en esta revisión se desarrolla en las secciones **3.1, 3.2 y 3.3**.

Figura 3-1: Procedimiento metodológico para la revisión bibliográfica.

3.1 Estrategia de búsqueda de literatura

Las bases de datos utilizadas para la búsqueda bibliográfica fueron Springer Link, Science Direct y Scopus. Se realizaron dos búsquedas paralelas, las cuales iniciaron de la misma manera con una selección de los documentos teniendo en cuenta solo las palabras “Water Footprint” como primer filtro. Luego, el año de publicación de los documentos, donde se restringió toda publicación anterior a enero de 2015 y las publicaciones posteriores a diciembre de 2022 en su versión online.

Posteriormente, las búsquedas se dividieron en dos. La primera búsqueda se centró en todos los documentos que realizarán cálculos de huella hídrica a partir de la metodología WFA desarrollada por la WFN, esto para cualquier sector económico. La segunda búsqueda tuvo como objetivo solo aquellos documentos científicos que realizaran el cálculo de la huella hídrica a partir de la metodología WFA específicamente en los campus universitarios.

De esta manera para la primera búsqueda, se usó una cadena de palabras clave relacionadas con huella hídrica, tales como “Water Footprint” AND “WFN” OR “Water Footprint Network” para la base de datos Science Direct y Scopus; y “Water Footprint” AND “WFN” AND “Water Footprint Network” para Springer Link. Y para la segunda búsqueda se usó “Water Footprint” AND “University” como cadena de palabras clave para Science Direct y Scopus, por otro lado para Springer Link se usó “Water Footprint” AND “Campus”.

A ambas búsquedas bibliográficas se aplicaron múltiples criterios de exclusión adicionales, posterior a la cadena de palabras, tales como: 1) selección únicamente de artículos de investigación donde se excluyen capítulos de libros, artículos de revisión y otros documentos no relacionados. 2) Se excluyó documentos que no hayan sido escritos únicamente en inglés. 3)) Se excluyeron documentos donde en el título, resumen, palabras claves no indicaba el cálculo de la huella hídrica, este paso al igual que los dos anteriores se realizaron de manera sistemática con ayuda de los buscadores. 4) Finalmente, Se excluyeron documentos donde el contenido principal no indicara el cálculo de la huella hídrica, este último paso se realizó con análisis manual, y para Scopus se tuvo una consideración adicional, y fue eliminar los artículos repetidos, es decir los que provenían de ScienceDirect y Springer Link.

3.2 Selección de literatura

En la búsqueda inicial donde solo se incluyó la palabra “Water Footprint”, se encontraron 5.662 documentos en Science Direct, 3.346 documentos en Springer Link y 21.071 documentos en Scopus. Al aplicar el primer filtro de búsqueda centrando solo en los años de interés (2015-2022), los documentos encontrados fueron 4.619, 2.662, y 17.425 para cada una de las bases de datos relacionadas. Es importante aclarar que esta primera fase de selección es igual para ambas búsquedas.

Para la primera selección de documentos científicos de cálculo de la huella hídrica en diferentes sectores económicos se realizó una búsqueda por medio de la cadena de palabras clave ya mencionadas. De esta se obtuvo como resultado 328 documentos para la base de datos Science Direct, 85 para la base de datos Springer Link y 246 documentos científicos para la base de datos de Scopus. Luego de aplicar el primer filtro específico donde solo se seleccionaron artículos de investigación redujo la búsqueda a 261, 22 y 177 para Science Direct, Springer Link y Scopus. Posterior a ello, se seleccionaron artículos que solo estuvieran en inglés, donde solo hubo una reducción en el número de documentos para Scopus que bajo a 160 documentos. Seguidamente, se aplicó el tercer criterio de exclusión donde el número de artículos disminuyó significativamente a 27 artículos para Science Direct, 22 para Springer Link y 48 para Scopus. Finalmente se realizó una lectura detallada de los 97 documentos, donde se seleccionaron 51 que realmente desarrollaban el cálculo de la huella hídrica y que serán los documentos a analizar.

Por otra parte, la selección de documentos específicos donde se realizó el cálculo de huella hídrica para el sector universitario inicio con aplicar la cadena de palabras en la búsqueda, donde se obtuvieron 3766 resultados de documentos para Science Direct entre los años 2015 al 2022, para Springer Link se obtuvieron 442 y para Scopus fueron 14678 documentos para el mismo periodo de tiempo. Posterior a la aplicación del primer filtro los documentos de tipo artículo de investigación fueron 2795, 85 y 11.419 para Science Direct, Springer Link y Scopus respectivamente. Al aplicar el segundo filtro los documentos que estaban escritos únicamente en inglés fueron los mismo para Science Direct y Springer Link, sin embargo, para Scopus fueron de 10996. Luego hubo una reducción significativa en la cantidad de artículos de investigación para el sector universitario que realmente calculaban la huella hídrica, donde se obtuvo como resultado un total de 6 documentos para Science Direct, 7 documentos para Springer Link y 27 documentos para Scopus. De estos, luego de una revisión detallada, se obtuvo un total de 5 artículos científicos en Science Direct, 2 artículos para Springer Link y 5 artículos en Scopus, para un total de 12 artículos de investigación en los cuales se calculó la huella hídrica para un campus universitario.

3.3 Recopilación de datos

A partir de artículos de investigación seleccionados se decidió recopilar información relevante de cada uno de estos documentos, que permitiera comprender el contexto global del cálculo de la huella hídrica y las preocupaciones actuales tanto a nivel general como a nivel específico en los campus universitarios

De esta manera, para los documentos que desarrollaban el cálculo de la huella hídrica en diferentes sectores económicos se decidió registrar datos genéricos como el año de publicación, la base de datos de donde se extrajeron los documentos, el país en el cual se desarrolló la investigación, y el sector económico en el cual se enfocó el desarrollo. Adicionalmente, se extrajeron datos más específicos tales como la metodología empleada para el cálculo de la huella hídrica, junto con los tipos de huella hídrica calculados y las ecuaciones asociadas a los cálculos.

Por otra parte, para los artículos de investigación de cálculo de huella hídrica en campus universitarios, se decidió recolectar información asociada al año de publicación, la base de datos de donde se extrajo el documento, el país donde se realizó el cálculo, la universidad que desarrolló la investigación y el área de enfoque de la investigación. A esta información se agrega todo lo asociado directamente a los cálculos desarrollados, específicamente la metodología utilizada, las huellas hídricas calculadas y las ecuaciones utilizadas en la obtención de las diferentes huellas hídricas para los campus universitarios.

3.4 Análisis de la literatura

Los análisis para la información recolectada se van a desarrollar en dos secciones, esto acorde con el proceso de búsqueda y selección de la información. De esta manera, se desarrollará por completo en una sección el análisis de la información obtenida para los documentos de investigación donde se realizó el cálculo de la huella hídrica en diferentes sectores económicos. En otra sección diferente se realizará el análisis a la información obtenida de los documentos de cálculo de huella hídrica específicos para los campus universitarios.

3.4.1 Huella hídrica en diferentes sectores económicos

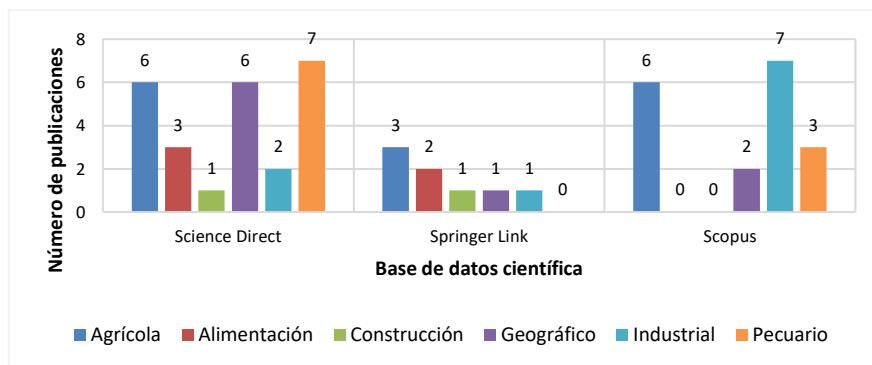
Se realiza el análisis de la información recolectada en los artículos seleccionados que se encuentran con mayor detalle en la Tabla 7-2: Publicaciones de aplicación de la huella hídrica en diferentes sectores.y la Tabla 7-3: Ecuaciones de huella hídrica utilizadas en diferentes sectores.contenidas en el **Anexo C**.

- **Bases de datos de artículos científicos y los diferentes sectores económicos.**

Se realizó el análisis de la información obtenida de los artículos científicos que calcularon la huella hídrica para los años comprendidos entre el 2015 y el 2022. De esta manera se puede establecer los sectores económicos que fueron estudiados en cada una de las bases de datos de artículos científicos (Science Direct, Scopus y Springer Link) tal y como se puede observar en la **Figura 3-2**.

Es así que, en la **Figura 3-2** se puede observar que la base de datos que más publicaciones realizó fue Science Direct con un total 25 publicaciones; seguida Scopus donde se publicaron 18 artículos científicos de cálculo de huella hídrica y finalmente Springer Link con 8 publicaciones en el periodo de estudio.

Figura 3-2: Publicaciones por base de datos de artículos científicos y sectores económicos.



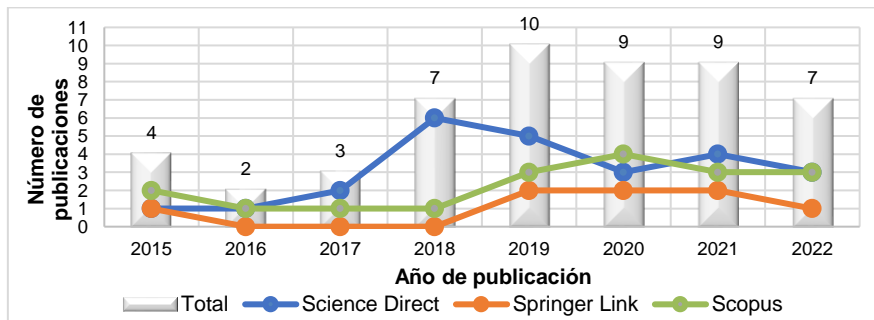
Así mismo, en la **Figura 3-2** se puede apreciar que en Science Direct el sector económico que más fue estudiado es el pecuario con 7 publicaciones asociadas, seguido por el sector agrícola y geográfico con 6 publicaciones en cada sector. Por otra parte, en Springer Link el sector agrícola fue donde más se calculó la huella hídrica con

3 publicaciones, seguido por el sector de alimentos con 2 publicaciones asociadas. Finalmente, en Scopus el sector industrial presento 7 publicaciones y el sector agrícola presento 6. En este sentido, cada base de datos sigue una tendencia diferente en el sector económico que más publicaciones realiza en el cálculo de la huella hídrica, sin embargo, el sector agrícola es muy relevante tanto en Science Direct como en Scopus.

- **Evolución de la producción científica en el tiempo para múltiples sectores económicos.**

Se decidió realizar el análisis de los artículos científicos seleccionados que calculaban la huella hídrica para los años 2015 al 2022 para Science Direct, Scopus y Springer Link. De esta manera, en la **Figura 3-3** se puede observar como las publicaciones realizadas a partir del año 2015 tuvieron un crecimiento en el número de publicaciones hasta el año 2019 con un máximo de 10 publicaciones en ese año.

Figura 3-3: Publicaciones por año y base de datos para múltiples sectores económicos.



En promedio se realizaron más de 6 publicaciones por año asociadas al cálculo de la huella hídrica. Donde entre los años 2015 al 2017 se realizó el menor número de publicaciones con tan solo 9 en total para esos años con un promedio de 3 publicaciones. Mientras que en los años de 2018 al 2022 se realizaron un total de 42 publicaciones con un promedio por año de más de 8 publicaciones.

De esta manera, se puede observar que Science Direct realizó un mayor número de publicaciones con un promedio anual de 3,13; seguido por Scopus con 2,25 publicaciones promedio por año y finalmente se encuentra Springer Link con una publicación en promedio en cada año que fue estudiado.

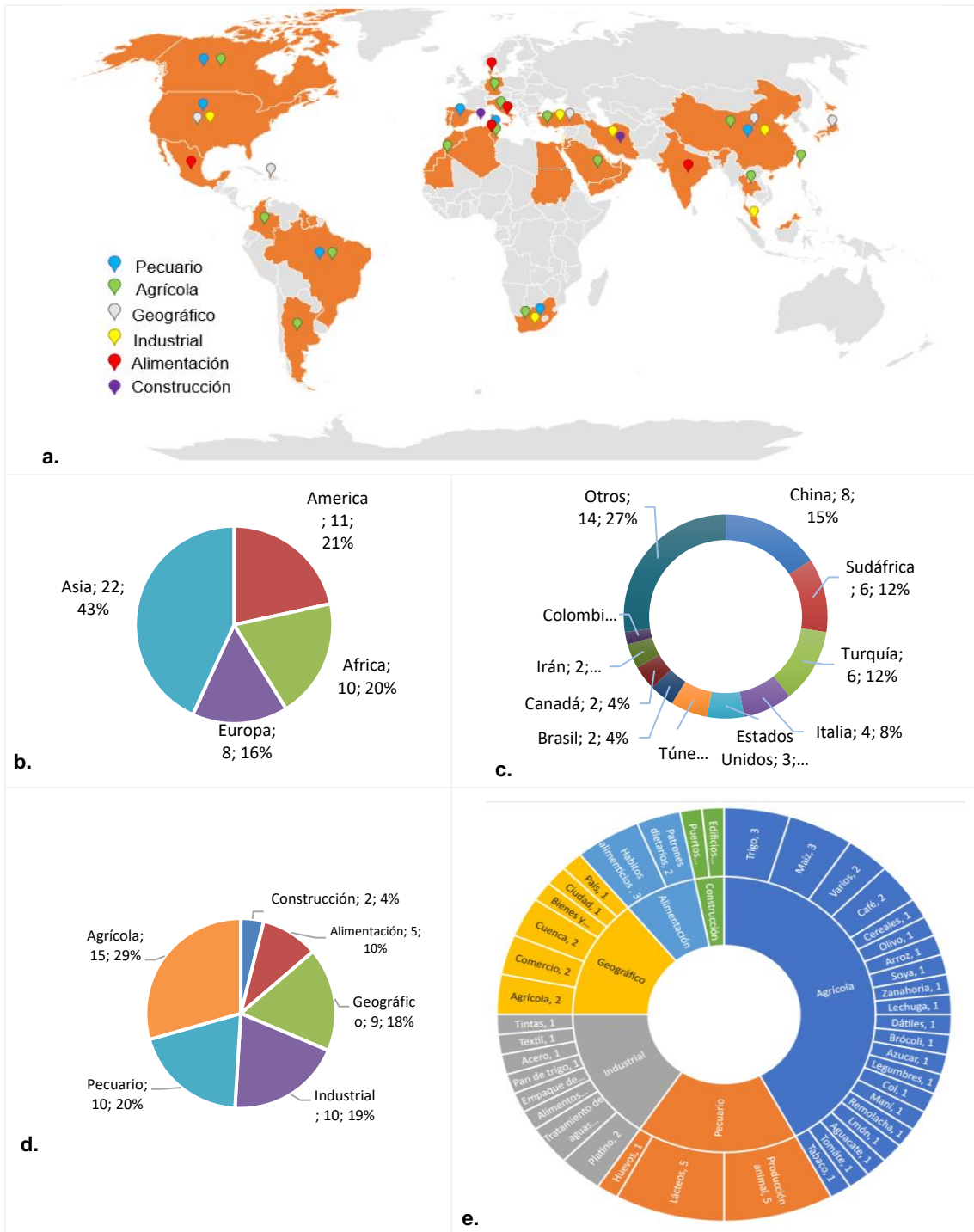
- **Sectores y países de aplicación de la huella hídrica**

Los estudios que calcularon la huella hídrica se encuentran centrados en 24 áreas geográficas como como se puede observar en la **Figura 3-4**. Donde se realizan diferentes análisis relacionados, de esta manera, en la parte **a**. se establece la distribución gráfica de los estudios por país y sector económico en el cual se aplicó la huella hídrica. La parte **b**. evidencia los estudios realizados por continente; así mismo, la parte **c**. permite detallar los países con mayor aporte dentro de los estudios realizados. De esta manera, la parte **d** establece la distribución cuantitativa de los estudios realizados por sector económico. Finalmente, la parte **e**. detalla cuantitativa y gráficamente la distribución de los estudios acorde al sector económico en el cual se realizó.

En la parte **a** se puede ver de manera gráfica que espacialmente el mayor interés de los estudios se centra en países de Norte y Sur America. Sin embargo, en la parte **b** se puede observar que el mayor aporte de los estudios viene realmente de con el 43% del total de los artículos desarrollados, y de acuerdo con la gráfica **c** China tiene la mayor cantidad de estudios con el 15% de aporte, seguido por Turquía (tomado como país asiático) con el 12% e Irán con el 4% que representan más del 30% del total de los estudios realizados. Seguido por América con el 21% donde el mayor aporte proviene de los desarrollos de Estados Unidos con el 6%. Luego África con el 20%, siendo Sudáfrica el de mayor aporte con el 12%. Finalmente, Europa desarrolla el 16% de los estudios que se centran en Italia con el 8% de aporte del total de los estudios realizados.

Por otra parte, en la parta **a** y **d** de la **Figura 3-4** se establecen 6 categorías generales o sectores económicos para los cuales se calculó la huella hídrica, estas categorías fueron pecuario, agrario, geográfico, industrial, alimentación y construcción. La categoría con mayor aporte, es decir la que más se ha estudiado es el sector agrícola con 16 publicaciones (31%), seguido por el sector pecuario con 10 artículos de investigación (20%), luego el sector industrial con 10, el sector geográfico con 8, alimentación con 5 y finalmente el sector de construcción con 2 publicaciones.

Figura 3-4: Análisis espacio sectorial de las publicaciones.



En la parte **e** de la **Figura 3-4**, se detallan los temas específicos de cálculo para cada sector económico, esto teniendo en cuenta que un estudio pudo aplicar la huella hídrica a más de un tema en particular como es el caso del sector agrícola. Este sector económico se caracteriza debido a que casi todos los desarrollos calcularon la huella hídrica para más de un producto, tal es el caso de le Roux et al. (2016) en Sudáfrica que realizó la huella hídrica para cultivos de hortalizas, donde incluyó seis diferentes tipos. Así mismo ocurrió con Zhang et al. (2018) en China, que calculó la huella hídrica para el trigo, el tabaco, algunas legumbres y cereales. De esta manera, en el sector agrícola los principales temas estudiados son el trigo y el maíz.

Por su parte, el sector pecuario realizó la misma cantidad de estudios para la producción de carne como para la producción de lácteos que fueron los dos temas de mayor interés en esta categoría. Donde solo el desarrollo de Mekonnen et al. (2019) generó un estudio conjunto de los dos temas para Estados Unidos, esto acorde a la parte **e** de la **Figura 3-4** y la información detallada en el **Anexo C**.

De la misma manera, en el sector industria el tema del tratamiento de aguas industriales fue el más importante. Así, el comercio de agua virtual que es el intercambio del recurso hídrico de un país a otro por medio de sus exportaciones e importaciones, y los análisis a nivel de cuenca, fueron los más importantes para el sector geográfico (parte **e** de la **Figura 3-4**).

Por otro lado, en la categoría de alimentación los temas desarrollados van asociados principalmente a los hábitos alimenticios, es decir la huella hídrica de un plato de comida específico, usualmente asociado a comidas tradicionales de la región como en el caso de México (Lares-Michel et al., 2021) o de la India (Aleksandrowicz et al., 2019) que son países caracterizados por su cultura culinaria (parte **e** de la **Figura 3-4**).

Finalmente, en el sector de la construcción solo se desarrollaron 2 artículos de investigación, el primero estudio la huella hídrica de los edificios a partir de los materiales y el proceso de construcción (Hosseinian & Ghahari, 2021). El segundo decidió estudiar el impacto ambiental tanto hídrico como en emisiones de carbono para los puertos deportivos presentes en tres islas de Europa, una de Portugal, otra de España y la última de Italia (Cruz-Pérez et al., 2021).

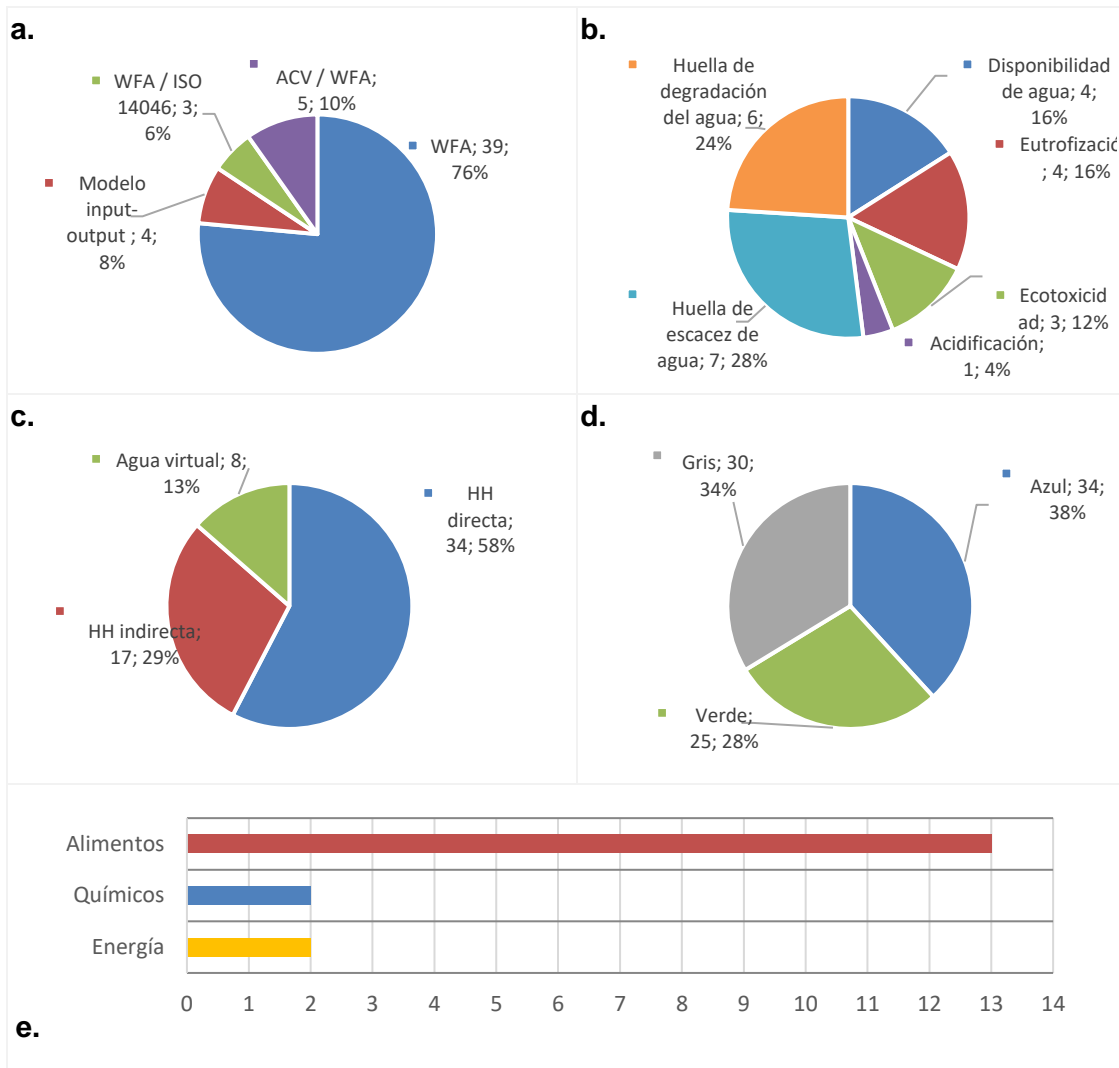
- **Publicaciones por metodología de cálculo**

Los desarrollos realizados por las publicaciones seleccionadas asociados al cálculo de la huella hídrica se pueden observar en la **Figura 3-5**. Donde en la parte **a.** se establece la distribución gráfica de los estudios por metodología aplicada. En la parte **b.** se observa la distribución gráfica de los estudios por categorías de impacto incluyendo la WFA y la ISO 14046. Por otro lado, en la parte **c.** se estipula específicamente la distribución gráfica de los estudios por categoría de huella hídrica calculada. Así mismo, en la parte **d.** se establece la distribución gráfica de los estudios por tipo de huella hídrica. Finalmente, en la parte **e.** se ve de manera gráfica la distribución de los estudios por huella hídrica indirecta calculada.

En la parte **a.** de la **Figura 3-5**, se puede observar que de los 51 artículo de investigación seleccionados el 76% desarrollo el cálculo de la huella hídrica solo por medio de la metodología WFA; el 10% aplicó el ACV exclusivamente para la huella hídrica; el 6% aplicó y comparó la metodología de la WFA con la metodología de la ISO 14064, y el 8% aplicó un análisis Input-Output para calcular la huella hídrica geográfica por medio de matrices de relación económicas y de consumo.

Es importante establecer que en cada estudio se pudo calcular más de una de las huellas, por consiguiente, la cantidad de huellas calculadas es superior al número de artículos de investigación revisados.

De esta manera, en la parte **b** de la **Figura 3-5**, se establecen las categorías de impacto que fueron calculadas a partir de la ISO 14046, junto con los indicadores de escasez y degradación de la WFA. Es así como, de los indicadores de la ISO 14046 se realizó el cálculo de la disponibilidad de agua, la ecotoxicidad, la eutrofización y la acidificación. De esta manera el 16% de los estudios que calcularon las categorías de impacto lo realizó para la disponibilidad de agua, el 16% para la categoría de eutrofización, el 12% para ecotoxicidad y tan solo el 4% de los estudios que aplicaron las categorías de impacto lo realizó para la acidificación. Por otra parte, para la escasez de agua de la WFA fue aplicada al 28% de los estudios que calcularon indicadores de impacto y la degradación de agua se aplicó al 24% de estos.

Figura 3-5: Análisis sectorial del cálculo de la huella hídrica.

Para calcular la huella hídrica, en cada uno de los estudios se aplicó la huella hídrica directa, indirecta o el concepto de agua virtual del agua. De esta manera en la parte **c** de la **Figura 3-5** se puede observar que el 58% de las huellas calculadas corresponde a la huella hídrica directa, que el 29% corresponde al cálculo de la huella hídrica indirecta y tan solo el 13% calcula la huella hídrica por medio del agua virtual.

Teniendo en cuenta solo los artículos de investigación que calcularon la huella hídrica directa (**Figura 3-5** parte **d**) se establece que el 38% de estos artículos calculo la huella hídrica azul, el 34% la huella hídrica gris y el 28% calculo la huella hídrica verde. La diferencia entre el cálculo realizado con cada una de estas huella radica en que no

todos los estudios calcularon la huella hídrica directa con los tres tipos de huella. Ejemplo de esto es el estudio realizado por Ranchod et al. (2015) que calculó la huella hídrica directa azul para el proceso de extracción minera de platino, o el estudio realizado por Vergé et al. (2017) que realizó la huella hídrica gris para cultivos de maíz y soja.

De la misma manera, al realizar el análisis de los estudios que aplicaron la huella hídrica indirecta (**Figura 3-5 parte e**), se establecen tres categorías de cálculo. La primera es la de alimentos con once cálculos realizados, esta categoría está asociada a los insumos alimenticios, ya sea que estén relacionados con la alimentación pecuaria (Ibidhi & Ben Salem, 2019; Palhares & Pezzopane, 2015; Xing et al., 2019), con las materias primas para la producción de pan (Mohlotsane et al., 2018), o los alimentos que hacen parte de una dieta vegetariana, vegana, tradicional o de otro tipo (Bong et al., 2020; Zucchinelli, Spinelli, et al., 2021). La segunda y la tercera están asociadas a los químicos y energía requerida en los procesos de producción de minerales (Ranchod et al., 2015) y en el tratamiento de aguas residuales (Kalya & Alver, 2022).

- **Ecuaciones aplicadas en el cálculo de huella hídrica**

En la **Tabla 7-3 del anexo C** se evidencian todas las ecuaciones que fueron utilizadas para calcular la huella hídrica en cada uno de los estudios analizados. A partir de ello, se determina si fueron aplicadas las ecuaciones de la metodología de la WFA, si hubo modificaciones o si no hubo ecuaciones presentes en el estudio realizado.

De esta manera, se establece que 7 estudios no presentaron ecuaciones, de los cuales seis estaban relacionados al análisis de la huella hídrica por medio del ACV y con la ISO 14064, esto se debe a que utilizan bases de datos de huellas hídricas para realizar los cálculos y no ecuaciones de manera directa (Aleksandrowicz et al., 2019; Bai et al., 2018; Lovarelli et al., 2018; Manzardo, Loss, et al., 2016; Noya et al., 2018). El séptimo estudio que no presentó ecuaciones se debe a que realizó un análisis de nexo agua, energía y alimento por lo cual describe de manera general los cálculos realizados para la huella hídrica, la huella energética y la huella de carbono (Becker & Gondhalekar, 2022)

Por otra parte, todos los cálculos de huella hídrica que fueron realizados por medio del modelo input-output se hicieron bajo ecuaciones que hacían uso del agua virtual, esto se debe a que los cálculos se desarrollaban para huellas hídricas regionales y por su complejidad se realizaron análisis matriciales para calcular la huella hídrica (Ono et al., 2015; Song et al., 2022; Tian et al., 2018; Zucchinelli, Sporchia, et al., 2021).

La ecuación **(2-1)** para el cálculo de la huella hídrica que se realiza sumando la huella hídrica directa e indirecta presenta una variación en la ecuación **(7-16)**, esto se debe a que en ese artículo Zucchinelli, Sporchia, et al. (2021) asumen la huella hídrica indirecta como agua virtual, por lo cual cambian el nombre del factor, pero representa el mismo cálculo.

Así mismo ocurre con las ecuaciones para el cálculo de la huella hídrica azul, si bien la huella hídrica azul es un balance del agua azul consumida, este se realiza acorde a las necesidades particulares de cada sector y las variables pueden cambiar pero el concepto es el mismo, ejemplo de ello es el estudio de Kalya & Alver (2022) que reemplaza el balance hídrico por una sola variable que representa el agua consumida del proceso. También el estudio realizado por Al-Bahouh et al. (2021) donde al agua consumida por el ganado y al agua de limpieza, se suma el agua de roció de la leche.

Hay algunos casos especiales donde establecieron modificaciones al cálculo de la huella hídrica total para que se adaptara a ese sector, tal y como se realizó en el estudio de Lares-Michel et al. (2021) donde a la huella hídrica para una dieta alimenticia se agregaron factores de lavado y cocción de los alimentos que hacen parte de cada plato de la dieta consumida, de esta manera se puede observar en las ecuaciones **(7-20)**, **(7-21)** y **(7-22)**.

También está la variación para el sector pecuario donde la huella hídrica de los animales se calcula teniendo en cuenta la huella de la alimentación, del consumo directo de agua y del agua de servicios necesaria para todos los procesos así se establece en la ecuación **(7-1)** y **(7-10)** de los estudios desarrollados por Ibidhi & Ben Salem, (2019) y Palhares & Pezzopane (2015).

Esto permite establecer que la huella hídrica establecida por la WFA no es inamovible y puede presentar pequeñas variaciones y modificaciones acorde a cada caso de estudio donde se esté aplicando el cálculo de la huella hídrica.

En contraste, la huella hídrica gris presentó modificaciones acorde a las necesidades de esta manera, las modificaciones principales se dan en la ecuación **(2-27)** donde el denominador cambia completamente de ser la diferencia entre la concentración máxima y la concentración natural, a ser solamente la concentración máxima (Kalya & Alver, 2022; Vergé et al., 2017). O incluso se modifica la misma expresión del denominador, donde la concentración natural se convierte en la concentración real, quedando de esta manera la concentración máxima menos la concentración real (Vergé et al., 2017)

Mientras que el cálculo de la huella hídrica verde no presentó ninguna alteración en los estudios en los cuales se calculó. De esta manera, se evidencia que el cálculo que presenta mayor solidez es el de la huella hídrica verde para el sector agrícola que es el más estudiado y consolidado; mientras que el que presenta modificaciones más importantes es la huella hídrica gris.

3.4.2 Huella hídrica en campus universitario

Para establecer el cálculo de la huella hídrica para campus universitario, no se limitó al tipo de metodología aplicada debido a la cantidad de publicaciones disponibles en este sector económico. De esta manera, todas las publicaciones relacionadas con el cálculo de la huella hídrica en campus universitario en las bases de datos de Science Direct, Springer Link y Scopus, que se llevaron a cabo desde el año 2015 al año 2022 fueron incluidas.

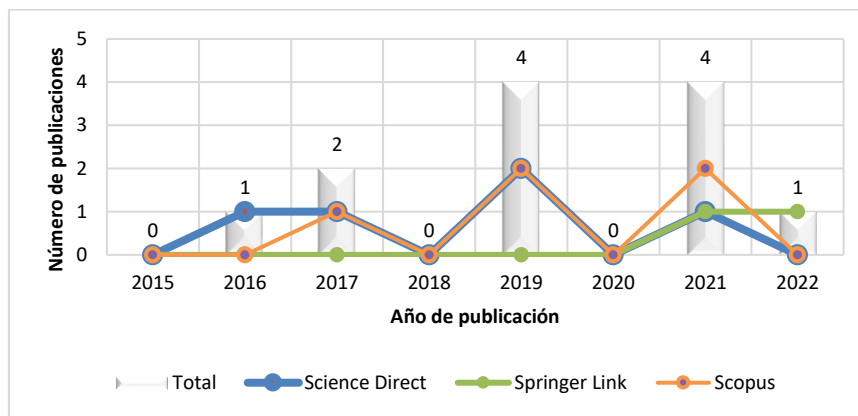
De esta manera, la **Tabla 7-4** del **Anexo C** evidencia la información general que fue obtenida de los artículos de investigación seleccionados que realizaron el cálculo de la huella hídrica en campus universitario. Esta información será analizada a detalle en la presente sección.

- **Evolución de la producción científica en el tiempo para campus universitario.**

Se analizó la información extraída de los artículos científicos que calcularon la huella hídrica para campus universitarios en los años comprendidos entre 2015 al 2022 para las bases de datos de Science Direct, Scopus y Springer Link.

De esta manera, en la **Figura 3-6** se puede observar que los años con mayor número de publicaciones fueron el año 2019 y 2021 con cuatro documentos publicados cada uno. Así mismo, Scopus y Science Direct presentan la misma cantidad de publicaciones totales con 5 desarrollos asociados al cálculo de la huella hídrica en campus universitarios; mientras que en Springer Link solo se hubo dos desarrollos investigativos asociados. Sin embargo, por la reducida cantidad de desarrollos realizados, que en promedio fueron cerca de dos publicaciones por año, no se puede establecer una tendencia clara de las investigaciones realizadas para los campus universitarios asociada a la cantidad de publicaciones.

Figura 3-6: Publicaciones por año y base de datos para campus universitario.



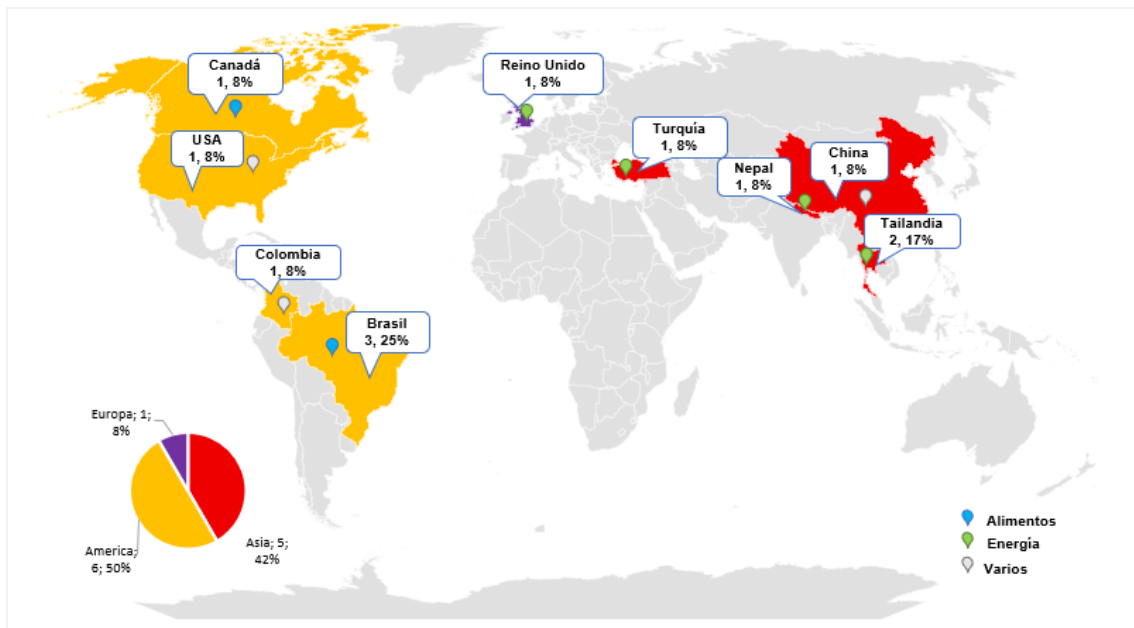
- **Sectores y países de aplicación de la huella hídrica**

Los artículos de investigación que calcularon la huella hídrica para campus universitario se centran en nueve países de acuerdo con la **Figura 3-7**. De esta manera, el 50% de los desarrollos fue llevado a cabo en universidades de Norte y Sur América, el 42% en países del continente asiático y el 8% en Europa, específicamente en el Reino Unido.

Así mismo, en la **Figura 3-7** se puede observar que el país que realizó el mayor número de contribuciones en este campo fue Brasil con 3 estudios realizados, seguido por Tailandia con 2 desarrollos de cálculo de huella hídrica para campus universitario y los demás países realizaron un solo aporte en este campo. Adicionalmente, y acorde a la **Tabla 7-4**, los desarrollos realizados en Brasil calculan la huella hídrica para alimentos siendo este el tema más importante. Mientras que para Tailandia el tema desarrollado en ambas publicaciones fue la huella hídrica asociada al consumo energético.

De esta manera y acorde a la **Tabla 7-4** y la **Figura 3-7** los temas principales de estudio en America están asociados a el tema de alimentación con cuatro de los seis artículos donde el tema principal fue ese, los otros dos artículos desarrollados fueron de temas varios sin preferencia por alguno específico. Mientras que en Asia el tema principal fue la relación entre la energía (eléctrica y fósil) y el consumo hídrico con cuatro de los cinco desarrollos investigativos realizados en esta región, la publicación restante realizó el cálculo de la huella hídrica para temas varios sin preferencia.

Figura 3-7: Análisis espacial de las publicaciones en campus universitarios.



- **Publicaciones por metodología de cálculo**

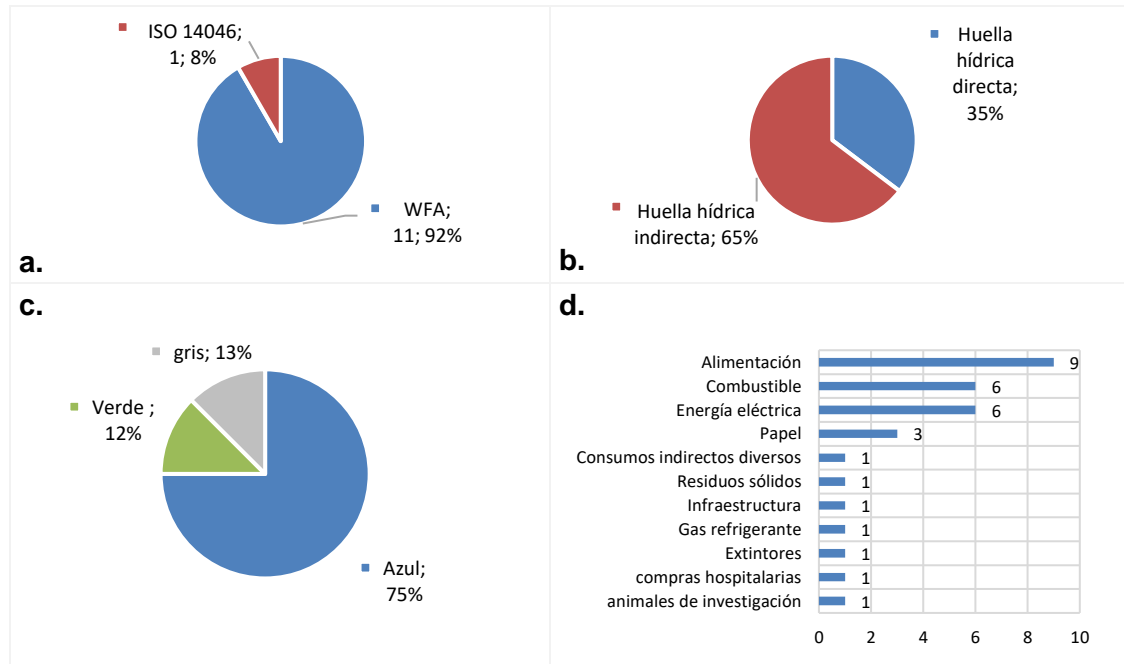
En la **Figura 3-8** en la parte **a** se puede evidenciar cuál fue la metodología de cálculo que aplicaron en los estudios. De esta manera 11 de los artículos, es decir el 92% de los cálculos de huella hídrica realizados, fueron aplicados bajo la metodología de la WFA. De esta manera, tan solo un artículo realizó el cálculo de la huella hídrica por medio de la metodología de la ISO 14046.

Por otra parte, en los estudios analizados se aplicó tanto la huella hídrica directa como indirecta, algunos estudios solo aplicaron una de las dos. Es así como, en la **Figura 3-8** en la parte **b**, se puede observar que la huella hídrica indirecta tuvo una mayor aplicación con el 65%, respecto a la huella hídrica directa que tuvo el 35% de aplicación en los desarrollos investigativos.

Del mismo modo, en la **Figura 3-8** en la parte **c**, se analiza la aplicación de las huellas azul, verde y gris, donde el 76% de la huella hídrica directa calculada es azul, el 12% y 13% corresponde al cálculo de la huella hídrica verde y gris respectivamente. Sin embargo, el porcentaje de aplicación de la huella hídrica verde y gris corresponde al cálculo realizado en un solo artículo de investigación.

Finalmente, en la **Figura 3-8** en la parte **d**, se establecen los tipos de huella hídrica indirecta calculada. Es así que la huella hídrica indirecta por consumo de alimentos se aplicó en 9 estudios; la huella hídrica indirecta por consumo de energía tanto eléctrica como fósil para combustibles móviles fue calculada en 6 artículos; la huella hídrica indirecta del papel se calculó en tres artículos de investigación; y finalmente, las huellas hídricas indirectas por residuos sólidos, infraestructura, gas refrigerante, extintores, compras hospitalarias y animales de investigación fueron calculadas para un artículo.

Figura 3-8: Análisis de la huella hídrica calculada para campus universitario.



• **Cálculos aplicados para huella hídrica en campus universitario**

Los estudios seleccionados que calcularon la huella hídrica bajo la metodología de la WFA para campus universitario fueron once. De los cuales, nueve no presentaron ecuaciones para realizar el cálculo. De esta forma, cuatro artículos realizaron exclusivamente el cálculo de la huella hídrica de los alimentos servidos en los restaurantes al interior de los campus universitarios por medio de información extraída de bases de datos.

Tal es el caso de D. M. Chen et al. (2016) que calculó junto a la huella hídrica, la huella de carbono y el uso del suelo para integrar la información resultante a una aplicación de acceso estudiantil y permitir a los estudiantes consumir alimentos bajo una elección de sostenibilidad. Así mismo, en la investigación de Strasburg & Jahno (2017), tienen en cuenta la huella hídrica de los alimentos como un parámetro para establecer la ecoeficiencia. Por otra parte, Hatjiathanassiadou et al. (2019) y Kilian et al. (2021) realizaron el cálculo de la huella hídrica de los alimentos servidos en las cafeterías de los campus con la intención precisa de obtener e informar la huella hídrica.

Por otra parte, Kandananond (2019b) realizó el cálculo de la huella hídrica indirecta de la energía consumida tanto eléctrica como fósil (gasolina y diésel) para el campus universitario Valaya Alonkon Rajabhat en Tailandia, este cálculo se realizó por medio de factores de consumo hídrico (agua virtual) sin presentar ecuaciones asociadas. Luego, para la misma universidad, el autor asumió el campus como una organización, a partir de esto realizó el cálculo de huella hídrica de uso doméstico (azul) por medio del factor de consumo de agua per cápita por la cantidad de estudiantes y personal dentro de la universidad; también calculó la huella hídrica de uso agrícola (azul y verde) para una granja experimental al interior del campus junto a la huella gris por fertilización (Kandananond, 2019a). Sin embargo, no presentó las ecuaciones de cálculo asociadas a los desarrollos presentados.

De esta manera, en el estudio de Natyzak et al. (2017) y de-D. M. Chen et al. (2016) se realizó el cálculo de la huella hídrica directa azul a partir del consumo hídrico registrado en la facturación del campus de la Universidad de Virginia en Estados Unidos, mientras que el cálculo de la huella hídrica indirecta, llamada en el artículo como demanda virtual de agua, fue calculada por medio de factores de consumo hídrico. Por su parte, en el estudio de Mu et al. (2021) calculó la huella hídrica de un grupo de estudiantes universitarios de 3 universidades chinas en la provincia de Shaanxi a partir de encuestas de consumo directo e indirecto, para establecer la importancia de la participación de la población en la adaptación climática; sin embargo, no se presentaron las ecuaciones asociadas a los cálculos realizados. De igual forma en el estudio propuesto por Okutan & Akkoyunlu (2021) realizó el cálculo de la huella hídrica directa e indirecta en la Universidad de Boğaziçi en Turquía, por medio de encuestas aplicadas a los estudiantes del campus universitario, dentro de las encuestas se encontraban preguntas asociadas al uso de agua directa (duchas, sanitarios, lavamanos, etc.) y el uso de agua indirecta (combustible, energía eléctrica, alimentación, etc.)

Con respecto a la huella hídrica calculada en Colombia en la Universidad Tecnológica de Pereira por medio de la ISO 14046 (Osorio-Tejada et al., 2022), fue desarrollada principalmente para el proceso de tratamiento de aguas residuales que realiza la universidad y otros consumos indirectos. De esta manera se identificó que las actividades indirectas eran las más representativas, que realizar un proceso terciario

al tratamiento de aguas podría reducir aún más los impactos generados y que el proceso de reciclaje reduce considerablemente la escasez de agua para usuarios secundarios.

Finalmente, el desarrollo realizado por Gu et al. (2019) en la Universidad de Keele en el Reino Unido y el estudio realizado por Vaidya et al. (2021) en la Universidad de Kathmandú en Nepal, establecieron el nexo entre el agua, la energía y los alimentos por medio del cálculo de la huella hídrica, huella de carbono y la huella energética. De esta manera, en ambos artículos se presentó la ecuación **(3-1)** donde se calculó la huella hídrica total (WF_{total}) a partir de la suma entre la huella hídrica directa (DEF), la huella hídrica de la energía (WF_{energy}) y la huella hídrica por alimentos (WF_{Food}).

$$WF_{total} = DEF + WF_{energy} + WF_{food} \quad (m^3) \quad \mathbf{(3-1)}$$

DEF para el estudio realizado por Vaidya et al. (2021) incluyó la huella hídrica azul calculada a partir de la información generada por encuestas y la huella hídrica gris que pasa por la PTAR. Mientras que en el estudio de Gu et al. (2019) se calcula la DEF acorde al consumo de agua potable que fue suministrada a la universidad, es decir la huella hídrica azul directa, y no se incluyó la huella hídrica gris debido a que el vertimiento es realizado a una PTAR. Por otra parte, la WF_{energy} y la WF_{Food} fueron calculadas por la sumatoria de la multiplicación entre la cantidad de energía o alimentos consumidos (EC o FP) y la huella hídrica consuntiva de cada tipo de energía o alimento (UCWE), como se puede observar en las ecuaciones **(3-2)** y **(3-3)**.

$$WF_{energy} = \sum_i^n EC_i \times UCWE_i \quad (m^3) \quad \mathbf{(3-2)}$$

$$WF_{food} = \sum_i^n FP_i \times UCWE_i \quad (m^3) \quad \mathbf{(3-3)}$$

4. Adaptación de la metodología WFA para campus universitario

A partir de la revisión de la metodología WFA en la **sección 4** y de los análisis realizados a los diferentes artículos de investigación de las bases de datos Science Direct, Springer Link y Scopus, para la aplicación de la metodología WFA en diferentes sectores económicos (**sección 3.4.1**) y en especial para los campus universitarios (**sección 3.4.2**). Se establecieron las aplicaciones actuales del cálculo de la huella hídrica bajo la metodología de la WFA, teniendo en cuenta las adaptaciones metodológicas de las ecuaciones y consideraciones realizadas en algunos de los estudios analizados en los años 2015 al 2022.

De esta manera, se establece la adaptación de la metodología WFA relacionada con las ecuaciones que se deben aplicar, las consideraciones que se deben tener y los límites que se deben considerar en el momento de aplicar una huella hídrica en un campus universitario. Adicionalmente, como adaptación general se debe establecer que el cálculo de la huella hídrica se realice en un periodo de doce meses, es decir un año calendario, para considerar las variaciones entre los semestres académicos y las variaciones climáticas interanuales.

4.1 Adaptaciones a la huella hídrica directa

El cálculo de la huella hídrica directa en los campus universitarios se caracterizó por calcular principalmente la huella hídrica azul (**Figura 3-8**). De esta manera, la huella hídrica verde y gris no fueron tenidas en cuenta de manera considerable. Teniendo en cuenta que la huella hídrica de un campus universitario puede tomarse como la huella hídrica de un consumidor, se debe aplicar la ecuación (**2-10**) donde se incluye el cálculo de la huella hídrica azul, verde y gris.

4.1.1 Adaptación de la huella hídrica azul

La huella hídrica azul fue la más aplicada en los estudios de huella hídrica en campus universitario dentro de la huella hídrica directa (**Figura 3-8**). De esta manera, se evidencia su gran importancia en este sector económico. Teniendo en cuenta que la huella hídrica azul es un balance masico de consumo de agua azul, los datos para realizar su cálculo pueden ser obtenidos de múltiples formas. Sin embargo, la robustez del cálculo depende de la procedencia de la información y la calidad de los datos obtenidos.

La información con la mayor confiabilidad se obtiene de instrumentación o medidores directos de flujo ubicados en las instalaciones, pero no todos los campus universitarios cuentan con esta instrumentación debido a los elevados costos a causa del gran número de edificios con los que pueden llegar a contar un campus universitario.

A partir de las descripciones de los cálculos de las huellas hídricas para los campus universitarios en la sección 3.4.2, y junto al “manual de la evaluación de la huella hídrica para ciudades en Latinoamérica” (Water Footprint Network et al., 2012), se establecen tres formas de calcular la huella hídrica azul a partir de los datos disponibles. Así, en la tabla **Tabla 4-1** se evidencian las ecuaciones propuestas.

Tabla 4-1: Ecuaciones adaptadas para el cálculo de la huella hídrica azul.

Ecuación	Variables	Numeración	Consideraciones de obtención de información
HH_{azul} $= Afl - Efl \left[\frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right]$	HH _{azu} = huella hídrica azul. Afl = afluente Efl = efluente	(4-1)	<ul style="list-style-type: none"> El afluente puede ser obtenido de medidores o facturas de servicios públicos. El efluente se puede obtener de medidores o encuestas de consumo. Si Aflu = Eflu, entonces la HH_{azu} = 0. Si el efluente es vertido en una cuenca hidrográfica diferente o en el mar, la HH_{azu} = Aflu.
HH_{azul} $= HH_{per\ cápita}$ $\times hab \left[\frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right]$	HH _{per cápita} = consumo hídrico de una persona de un país o ciudad. hab = estudiantes, personal administrativo, docente y de servicios	(4-2)	<ul style="list-style-type: none"> Huella hídrica per cápita será obtenida de datos municipales, departamentales o nacionales. Se debe incluir a todo el personal que hace parte de la universidad

Ecuación	Variables	Numeración	Consideraciones de obtención de información
HH_{azul} $= HH_{per\ est}$ $\times hab \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$	$HH_{per\ est}$ = consumo hídrico de un estudiante. hab = estudiantes, personal administrativo, docente y de servicios	(4-3)	<ul style="list-style-type: none"> Huella hídrica por estudiante será obtenida de datos municipales, departamentales o nacionales. Se debe incluir a todo el personal que hace parte de la universidad.

La primera opción de cálculo (ecuación (4-1)) es el balance de hídrico del campus buscando garantizar que todos los consumos hídricos sean incluidos. De esta manera, como se mencionó anteriormente, obtener la información procedente de instrumentación será la mejor opción tanto para el cálculo del afluente como del efluente.

Sin embargo, en caso de no contar con esta información se puede asumir la facturación de la empresa prestadora de servicios públicos como el valor del afluente del sistema. Se realiza la aclaración de que este valor es el afluente y no el consumo hídrico total, esto para evitar una sobrestimación de la huella hídrica azul. Así mismo, el consumo hídrico facturado, solo será el valor total de la huella hídrica si el vertimiento se realiza en una cuenca hidrográfica diferente a la zona de extracción del agua azul o si el vertimiento es realizado directamente al mar.

Por otra parte, el efluente se puede calcular por medio de las ecuaciones presentadas en la **Tabla 4-2**, la información para la aplicación de las ecuaciones desde la (4-4) a la (4-10), se puede obtener por medio de encuestas de uso y consumo de agua en las instalaciones del campus

Tabla 4-2: Ecuaciones para el cálculo del efluente.

Ecuación	Variables	Numeración
Efl $= vln\ lavamanos$ $+ vln\ inodoros$ $+ vln\ duchas$ $+ vln\ limpieza$ $+ vln\ laboratorios$	$vln\ lavamanos$ = volumen de agua que sale de las instalaciones por el lavamanos [m^3] $vln\ inodoros$ = volumen de agua que sale de las instalaciones por el inodoro [m^3] $vln\ duchas$ = volumen de agua que sale de las instalaciones por el duchas [m^3] $vln\ limpieza$ = volumen de agua que sale de las instalaciones por limpieza [m^3] $vln\ laboratorios$ = volumen de agua que sale de las instalaciones por uso en los laboratorios [m^3]	(4-4)

Ecuación	Variables	Numeración
$V_{ln \text{ lavamanos}} = Fr_{UL} * Tp_{UL} * FLMg * FuncAjl * Dmes \text{ [m}^3\text{]}$	<p>FrUL = frecuencia promedio de uso de lavamanos por funcionario día [veces*hab/día] TpUL = tiempo promedio de uso del lavamanos por funcionario vez [min*hab/vez] FLMg = flujo de agua (caudal) promedio del grifo de los lavamanos [m³/min] FuncAjl = cantidad de funcionarios que efectivamente utilizan los lavamanos durante el día [hab] Dmes = días de ingreso libre al campus durante el mes [días].</p>	<p>(4-5)</p>
$V_{ln \text{ inodoros}} = Fr_{UI} * VOLpD * FuncAjl * Dmes \text{ [m}^3\text{]}$	<p>FrUI = frecuencia promedio de uso de inodoros por funcionario día [veces*func/día] TpUL = tiempo promedio de uso del lavamanos por funcionario vez [min*func/vez] FLMg = flujo de agua (caudal) promedio del grifo de los lavamanos [m³/min] FuncAjl = cantidad de funcionarios que efectivamente utilizan los lavamanos durante el día</p>	<p>(4-6)</p>
$V_{ln \text{ inodoros}} = Fr_{UI} * VOLpD * FuncAjl * Dmes$	<p>FrUI = frecuencia promedio de uso de inodoros por funcionario día [veces*func/día] VOLpD = Volumen promedio de descarga del tanque del inodoro [m³/descarga] FuncAjl = cantidad de funcionarios que efectivamente utilizan los inodoros durante el día</p>	<p>(4-7)</p>
$V_{ln \text{ duchas}} = Fr_{UD} * Tp_{Ud} * FDC * FuncAjlD * Dmes \text{ [m}^3\text{]}$	<p>FrUD = frecuencia promedio de uso de duchas por funcionario día [veces*func/día] TpUd = tiempo promedio de uso de las duchas por funcionario vez [min*func/vez] FDC = flujo de agua (caudal) promedio de la ducha [m³/min] FuncAjl = cantidad de funcionarios que efectivamente utilizan las duchas durante el día Dmes = días hábiles (trabajados) durante el mes [días]</p>	<p>(4-8)</p>
$V_{ln \text{ servicios}} = Fr_{U\text{serv}} * Tp_{U\text{serv}} * FLMgL * Dmes \text{ [m}^3\text{]}$	<p>FrUlab = frecuencia promedio de uso de grifos por día [veces/día] TpUlab = tiempo promedio de uso de los grifos por vez [min/vez]</p>	<p>(4-9)</p>
$V_{ln \text{ laboratorios}} = Fr_{U\text{lab}} * Tp_{U\text{lab}} * FLMgL * Dmes \text{ [m}^3\text{]}$	<p>FrUlab = frecuencia promedio de uso de grifos por día [veces/día] TpUlab = tiempo promedio de uso de los grifos por vez [min/vez]</p>	<p>(4-10)</p>

Fuente: adaptado de (Water Footprint Network et al., 2012)

Si por alguna razón la ecuación **(4-1)** de balance hídrico no puede ser calculada, la segunda opción, presentada en la ecuación **(4-2)** es asumir la huella hídrica per cápita existente para la ciudad o país donde se encuentre el campus universitario de acuerdo a

la disponibilidad de información de la región, esto teniendo en cuenta que los campus universitarios se comportan como pequeñas ciudades. El valor de la huella hídrica per cápita se multiplicará por la población perteneciente a la universidad (estudiantes, docentes, personal administrativo y de servicios) y esto dará el valor de la huella hídrica del campus.

La última opción es muy similar a la anterior, donde se tiene en cuenta un valor de huella hídrica por persona, en este caso por estudiante, utilizando la ecuación (4-3). Solo debe utilizarse esta ecuación si se cuenta con información específica de la huella hídrica de los estudiantes en la región donde se encuentre el campus universitario.

4.1.2 Adaptación de la huella hídrica verde

El cálculo de la huella hídrica verde no fue considerablemente realizado en las huellas hídricas calculadas para los campus universitarios. Sin embargo, en la revisión de artículos de diferentes sectores económicos (sección 3.4.1), se pudo evidenciar que el cálculo de la huella hídrica verde está bien definido y consolidado.

De esta manera, se establece que se debe realizar el cálculo de la huella hídrica verde en los campus universitarios para las zonas con cobertura vegetal. Esto se debe a que, si bien puede ser poco representativa respecto a las otras huellas hídricas, genera un consumo de agua verde que se debe considerar y calcular. Es así que a partir del balance hídrico de agua verde y el “manual de la evaluación de la huella hídrica para ciudades en Latinoamérica” (Water Footprint Network et al., 2012) se establecen las ecuaciones (4-11) y (4-19).

$$HH_{proc,verde} = UAC_{verde} \times AV \left[\frac{volumen}{tiempo} \right] \quad (4-11)$$

La ecuación (4-11) permite el obtener de la huella hídrica verde para las zonas verdes del campus universitario por medio del cálculo del uso del agua de cultivo (UAC_{verde}), que es descrito a detalle en la página 21, multiplicado por el área ocupada por la cobertura vegetal presente en el campus (AV).

Sin embargo, como se expresó con anterioridad, el cálculo del UAC_{verde} que es representado por la ET_c y esta a su vez se calcula por medio del factor entre K_c y ET_o ; así, calcular la ET_o requiere una gran cantidad de parámetros para aplicar la ecuación **(2-24)**.

Si bien este cálculo manual se puede remplazar por el uso del software CROPWAT, existe la posibilidad de no contar con la información local solicitada, lo cual generaría la necesidad de hacer uso de la base de datos anexa a CROPWAT. Esto puede generar un sesgo en los resultados ya que algunos datos presentes en la base de datos son globales o específicos solo para algunas regiones del mundo.

Por otra parte, se establece que el cálculo de la ET_o puede ser remplazado por el cálculo de ecuaciones empíricas simplificadas de amplio uso en la literatura donde se calcula la evapotranspiración potencial (ETP) como símil a la ET_o .

La ETP es la máxima capacidad que tiene la cobertura vegetal de evapotranspirar sin ninguna limitación hídrica. Para el cálculo de la ETP se conocen múltiples ecuaciones empíricas. De estas, las más usadas son el método de Thornthwaite, el método de Turc y para Colombia el método desarrollado por Cenicafé. Estas ecuaciones se presentan en la

Tabla 4-3

Tabla 4-3: Ecuaciones para el cálculo de la ETP.

Método	Ecuaciones	Variables	Numeración
Thornthwaite	$ETP = 16 \times (10T/I)^a$ [mm/mes] [mm]	ETP = Evapotranspiración potencial (mm). T = Temperatura media mensual (°C). a = función del índice de calor anual I = índice de calor anual	(4-12)
	$a = (0,000000675 \times I^3) - (0,0000771 \times I^2) + (0,01792 \times I) + 0,49239$		(4-13)
	$I = \sum_1^{12} i$		(4-14)
Turc	$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + P^2/L^2}}$ SI $P/L > 0,316$	ETR = Evapotranspiración real [mm/año]. P = Precipitación [mm] L = Parámetro heliotérmico	(4-15)
	$ETR = P$ SI $P/L < 0,316$		(4-16)
	$L = 300 + (25T) + (0,05T^3)$		(4-17)
Cenicafé	$ETP = 1017,17 e^{-0,0002 \times h}$ [mm/año]	h = altura sobre el nivel del mar.	(4-18)

Las ecuaciones para el cálculo de la ETP son una excelente alternativa a la poca disponibilidad de datos para el cálculo de la ETo. Sin embargo, es importante establecer que al contar con menos parámetros climatológicos los sesgos en los resultados pueden aumentar.

Por otra parte, si solo se tiene conocimiento del tipo de cobertura vegetal para calcular la huella hídrica verde, sin mayor detalle, y no hay forma de calcular la ETc o la ETP se puede calcular la huella hídrica verde por medio de la ecuación (4-19). Donde la huella hídrica verde se obtiene al multiplicar la huella hídrica del tipo de cobertura vegetal específico ($HH_{verde,i}$) por el área ocupada por esa misma cobertura vegetal (AV_i), y luego sumar todos los resultados individuales.

$$HH_{verde} = \sum_i HH_{verde,i} \times AV_i \quad [volumen/tiempo] \quad (4-19)$$

La huella hídrica de muchas coberturas vegetales y una gran variedad de productos procedentes de múltiples cultivos ya se encuentran debidamente estudiados, caracterizados y con la huella hídrica establecida a nivel mundial (Hoekstra & Mekonnen, 2010; Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Sin embargo, no todas las plantas cuentan con una huella hídrica estándar debido a que pueden ser endémicas de una zona o simplemente aún no se ha realizado el estudio particular. Por esta razón, es importante tener claras las especies vegetales que se tienen para establecer si existen similitudes con otro tipo de especies que ya cuenten con huella hídrica o si se requiere algún estudio adicional.

Asimismo, la huella hídrica de una especie vegetal puede variar de acuerdo con su ubicación geográfica y las condiciones del terreno donde se encuentra, por esta razón es mejor tomar esta opción solo cuando ya no se cuente con datos específicos del área de estudio.

4.1.3 Adaptación de la huella hídrica gris

El cálculo de la huella hídrica gris al igual que la huella hídrica verde fue poco aplicada en las huellas hídricas calculadas para los campus universitarios. Sin embargo, los vertimientos realizados por los campus universitarios son vertimientos puntuales por lo cual se podría aplicar la ecuación (2-26).

No obstante, la ecuación (2-26) realiza el cálculo teniendo en cuenta la concentración natural, es decir aquella que debería tener el río sin intervención antrópica y no la concentración real que corresponde a la carga contaminante actual en la fuente hídrica receptora. No considerar las condiciones reales del afluente receptor puede generar una subestimación considerable, principalmente en zonas donde la intervención humana es notable. De esta manera, se modifica la variable de concentración natural (C_{nat}) por concentración real de la fuente hídrica receptora (C_{real}), donde la relación entre la concentración máxima (C_{max}) o normativa y la C_{real} indiquen la capacidad restante que tiene el afluente receptor para asimilar la carga contaminante del vertimiento.

Adicionalmente, en el cálculo de la huella hídrica gris a partir de la metodología WFA se desarrolla con el parámetro fisicoquímico que haya representado el mayor valor en el cálculo como se explica en la **Tabla 2-5**. Sin embargo, un solo parámetro no representa completamente la carga contaminante generada por el vertimiento, por lo que se calcula la huella hídrica gris realizando la sumatoria de huellas hídricas grises asociadas a sus respectivos parámetros que hayan sido medidos.

Teniendo en consideración las dos modificaciones anteriores al cálculo de la huella hídrica gris, la ecuación resultante es la (4-20). Así se resalta en color azul las modificaciones realizadas.

$$HH_{gris} = \frac{\sum (vol_{efl} \times C_{efl}) - (vol_{afl} \times C_{afl})}{C_{max} - C_{real}} \left[\frac{volumen}{tiempo} \right] \quad (4-20)$$

Si bien la relación entre la concentración real y la concentración máxima nos permite comprender mejor la capacidad de asimilación de la fuente hídrica receptora, presenta una anomalía. Esto se debe a que la concentración real del flujo hídrico en la fuente receptora

puede en algún momento tener una carga contaminante mayor que la carga máxima permitida. Es por esta razón que en los momentos donde la concentración real es mayor a la concentración máxima, la relación va a dar negativa, lo que significaría que la fuente hídrica superficial ha superado los niveles de contaminación permitidos por la normatividad nacional.

Lo anterior indicaría que cualquier vertimiento realizado no generaría ninguna alteración adicional. Sin embargo, esta afirmación es errónea, ya que cada vertimiento puede aumentar de una u otra manera la pluma de contaminación presente en la fuente hídrica. Por esta razón se decide poner una condición en los momentos donde esta anomalía se presente. Así, si la concentración real de la fuente receptora (C_{real}) es igual o mayor a la concentración máxima permitida por la normatividad (C_{max}), la relación entre estas concentraciones será equivalente a la concentración máxima permitida, tal y como se muestra en la ecuación **(4-21)**.

$$C_{max} - C_{real} = C_{max} \quad SI \quad C_{real} \geq C_{max} \quad \mathbf{(4-21)}$$

Esta relación se desarrolla teniendo en cuenta que la fuente hídrica receptora ya supera los límites normativos. Así, se asume que la capacidad de asimilación de esta fuente receptora es mucho menor, por lo cual no tiene casi capacidad para reducir la huella hídrica gris a valores normativos. De esta manera, se debe asegurar que el vertimiento realizado cumpla con los estándares normativos ejerciendo la mínima presión sobre el recurso hídrico.

Por otra parte, si el vertimiento es entregado a un tercero para tratamiento, este debe informar el valor de la concentración final de las aguas grises entregadas. Así, se podrá asumir que este dato informado es el valor final de la concentración del efluente que es vertido en la fuente hídrica receptora, permitiendo calcular la huella hídrica gris asociada a la contaminación final generada. Sin embargo, si el tercero contratado para el tratamiento no informa el valor final de las aguas tratadas, se debe asumir como concentración del efluente el valor presente antes de entregar las aguas grises, asumiendo completamente la huella hídrica gris causada.

4.2 Adaptaciones de la huella hídrica indirecta

La huella hídrica que mayor aplicación tuvo dentro de los estudios realizados para campus universitarios fue la huella hídrica indirecta (**Figura 3-8**). De esta manera, los alimentos, la energía eléctrica, los combustibles fósiles y el papel fueron los temas de mayor aplicación de la huella hídrica indirecta. De esta manera, las ecuaciones **(3-2)** y **(3-3)** representan las variaciones de la ecuación **(2-37)** para el cálculo de la huella hídrica indirecta específica para los diferentes consumos realizados.

Si bien no se pretende modificar el cálculo de la huella hídrica indirecta, si se establecen las ecuaciones de manera específica para realizar el cálculo de la huella hídrica indirecta para el consumo de energía (eléctrica o fósil) y el papel, ya que son consumos realizados directamente por las actividades y los procesos de la universidad. Por esta razón, no se establece el detalle para el cálculo de la huella hídrica indirecta de los alimentos debido a que en un campus universitario las cafeterías pueden ser un proceso tercerizado por parte de la universidad por lo cual calcular o no, esta huella depende de los límites del sistema que se tengan en cuenta en el estudio a realizar. En caso de que se desee calcular esta huella hídrica indirecta se puede hacer utilizando la ecuación **(3-3)**.

4.2.1 Huella hídrica indirecta de energía

La huella hídrica energética es aquella relacionada con el consumo de agua para la generación energética, ya sea en el proceso de extracción de las materias primas de origen fósil, el proceso de transformación de estas materias primas a combustibles fósiles, el uso del agua dulce para la generación misma de energía eléctrica o el proceso de transformación de residuos como el bagazo para obtener energía eléctrica. Es decir, la huella hídrica energética es el volumen de agua consumida y contaminada en toda la cadena de valor de la generación energética tanto fósil como eléctrica (P. W. Gerbens-Leenes et al., 2008; W. Gerbens-Leenes et al., 2009; Mekonnen & Hoekstra, 2012).

De esta manera, la huella hídrica indirecta por consumo de combustibles fósiles puede calcularse por medio de la ecuación **(3-2)**. Sin embargo, la huella hídrica por consumo de energía eléctrica va a tener una variación, la cual depende de la matriz energética del país donde se esté realizando la investigación. Esto ocurre debido a que cada tipo de energía

generada (eólica, solar, hidroeléctrica, etc.) tiene un factor de consumo hídrico diferente porque sus procesos de generación lo son, pero la energía eléctrica consumida es solo una. De esta manera, los diferentes tipos de energía eléctrica generadas en un país aportan un porcentaje del total de la matriz energética del país.

A partir de la ecuación **(3-2)** para el cálculo de la huella hídrica indirecta por consumo energético, se realiza la adaptación de la ecuación para consumo de energía eléctrica en la ecuación **(4-22)**. Donde el porcentaje de aporte de cada tipo de energía (PE_i) se multiplica con la cantidad de energía eléctrica consumida (EC) en el campus universitario, para así obtener el consumo de energía por ese tipo específico. Luego, este valor se multiplica con el factor de la huella hídrica específica de ese tipo de energía (HHE_i). Al realizar la sumatoria de la huella hídrica para todos los tipos de energía que conforman la matriz energética se obtiene la huella hídrica energética del campus.

$$HH_{ind,energía\ eléctrica} = \sum_i^n (EC \times PE_i) \times HHE_i \quad (m^3) \quad \text{(4-22)}$$

4.2.2 Huella hídrica indirecta de papel

La huella hídrica del papel es el volumen de agua que se consume en el proceso de fabricación del papel desde la obtención de la materia prima hasta el proceso de fabricación. Es así como, la huella hídrica del papel está asociada al tipo de papel, ya que cada tipo de papel puede tener algún proceso diferentes al de los demás modificando así su huella hídrica (Schyns et al., 2017; van Oel & Hoekstra, 2012) (Schyns et al., 2017; van Oel & Hoekstra, 2012).

La huella hídrica indirecta por el consumo de papel de una organización se adapta de la ecuación **(2-37)**. De esta manera, se multiplica el tipo de papel consumido (PC) por la huella hídrica asociada a ese tipo de papel (HHP) como se puede observar en la ecuación **(4-23)**. Así mismo, las diferentes huellas hídricas calculadas para los diferentes tipos de papel se deben reportar de manera individual.

$$HH_{ind,papel} = \sum PC \times HHP \quad (m^3) \quad \text{(4-23)}$$

4.3 Adaptaciones a la sostenibilidad ambiental de la huella hídrica

La sostenibilidad ambiental no fue calculada para ninguno de los campus universitarios que fueron estudiados en la sección 3.4.2. Sin embargo, debe ser calculada para establecer si la universidad está realizando o no un efecto negativo en el medio ambiente, con ello establecer los puntos críticos temporales y espaciales para el campus universitario y tener herramientas sólidas para saber dónde se deben enfocar los esfuerzos en las estrategias de mejora.

De esta manera, la metodología WFA mide la sostenibilidad ambiental para las tres huellas hídricas calculadas (azul, verde y gris). Sin embargo, la huella hídrica verde para los campus universitarios se medirá a partir de las zonas verdes que se encuentren dentro del campus. Por lo cual no tiene sentido medir la escasez de agua verde, ya que esta tiene en cuenta parámetros asociados a la productividad de un cultivo y las zonas verdes del campus universitario tiene como objetivo prestar servicios ambientales y no de productividad. Por esta razón, para los campus universitarios no será tomada en cuenta la escasez de agua verde, solo se calculará la escasez de agua azul (EA_{azul}) y el nivel de contaminación del agua (NCA).

Por otra parte, es importante resaltar que la cuenca hidrográfica de estudio para calcular la EA_{azul} y el NCA pueden ser diferentes, ya que existe la posibilidad de que el afluente no provenga de la misma zona en donde se realiza el vertimiento, situación que no es contemplada en la WFA para estos indicadores. Es por esta razón que cada análisis de sostenibilidad ambiental que se realice para los campus universitarios debe evaluar los indicadores acordes a la cuenca hidrográfica correspondiente. Adicionalmente, el cálculo de la EA_{azul} y el NCA deben calcularse a la menor escala espacial posible, es decir, si existe información suficiente para realizar los cálculos a nivel de microcuenca se debe realizar de esta forma para evidenciar los impactos locales más representativos.

De igual forma, la ecuación para realizar el cálculo de la EA_{azul} no se modificará, ya que tiene en cuenta garantizar el caudal mínimo ecológico. Por su parte, el cálculo de la NCA toma en cuenta todo el flujo de agua disponible sin considerar los factores ecológicos.

Teniendo en cuenta que un ecosistema de cualquier índole puede verse afectado por factores limitantes como la disponibilidad hídrica, pero también por factores contaminantes, se decide que el NCA se debe calcular teniendo en cuenta la disponibilidad de agua real de la cuenca (DA_{real}) como en la EA_{azul} . De acuerdo esto la ecuación **(2-42)** cambia y se establece la nueva expresión que sería la ecuación **(4-24)**.

$$NCA = \frac{HH_{gris}}{DA_{real}} \quad \mathbf{(4-24)}$$

5. Metodología

La metodología WFA es una metodología de carácter global que ha tenido mayor aplicación y desarrollo en el sector agrícola (**sección 3.4.1**). Sin embargo, en los otros sectores, incluyendo los campus universitarios, aún se realizan variaciones al cálculo desarrollado acorde a los requerimientos de cada caso de estudio en el cual se esté aplicando (**sección 3.4.2**). De esta manera, la metodología para el cálculo de la huella hídrica adaptada de la WFA para campus universitarios (**sección 4**) es la que será aplicada y comparada en este estudio con la metodología original WFA.

Para esto, se decide aplicar y comparar la metodología WFA y su adaptación para campus universitarios, en la fase de cálculo de la huella hídrica y el análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica, en el Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Este estudio se realizó durante seis meses de marzo a agosto del año 2022, lo que abarca un semestre académico (marzo a junio), un periodo de vacaciones (julio) y el inicio del siguiente semestre académico (agosto). Si bien la metodología adaptada establece que el estudio se debe aplicar durante un año calendario, se toma la decisión de realizarlo por seis meses para evidenciar el comportamiento de la huella hídrica al ser comparada entre la metodología de la WFA y la metodología adaptada para campus universitario.

5.1 Zona de estudio

El Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia en la sede Medellín es uno de los tres campus urbanos principales de la universidad. Este cuenta con 19 edificios, desde el bloque M1 hasta el bloque M18, donde se desarrollan actividades académicas, de investigación y extensión. En la **Tabla 5-1** se encuentra información general del campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Tabla 5-1: Información general Campus Robledo.

Ítem	Valor	Unidad	Fuente
Área	100.978,69	m ²	(Facultad de Minas, n.d.-a)
Estudiantes inscritos (promedio marzo a agosto 2022)	6.974	Hab	Áreas curriculares de la Facultad de Minas
Docentes de planta activos	194	Hab	Oficina de Gestión Ambiental sede Medellín
Personal administrativo	50	Hab	Oficina de Gestión Ambiental sede Medellín
Programas académicos asociados	56	Hab	(Facultad de Minas, n.d.-b)
Edificios	19	Unid.	(Facultad de Minas, n.d.-a)
Laboratorios	32	Unid	
Áreas verdes	37.943,25	m ²	Oficina de Gestión Ambiental sede Medellín

Los edificios se encuentran distribuidos en tres áreas que son (**Figura 5-1**), la facultad de Minas con los bloques desde el M2 hasta el M10, Ingeominas que cuenta con los bloques desde el M11 hasta el bloque M18, y finalmente el bloque M1 que se encuentra completamente separado de los demás. Esta división se debe al cruce de una vía principal de la ciudad de Medellín.

Figura 5-1: Campus Robledo Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.



Fuente: (Universidad Nacional de Colombia, n.d.) y Google Maps

5.2 Metodología adaptada de la WFA

La metodología WFA fue adaptada en la fase de cálculo de la huella hídrica y en la fase de evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica para ser aplicada específicamente en campus universitarios (ver **sección 4**). Es así como en la **Tabla 5-2** se presentan las adaptaciones realizadas de la metodología WFA para campus universitario que serán aplicadas en el presente estudio.

Tabla 5-2: Adaptaciones a la metodología WFA para campus universitario.

Ítems	Ecuación	Consideraciones asociadas
Huella hídrica directa	N/A	Aplicar de manera obligatoria la huella hídrica azul, verde y gris.
Huella hídrica azul	(4-1)	Considerar completamente el balance de masa como una caja negra, con datos de entrada y salida del flujo másico.
	(4-2)	En caso de no existir suficiente información para realizar el balance de masa, aplicar datos secundarios de consumo hídrico per cápita del país o ciudad donde se realice el cálculo.
	(4-3)	Si, se tiene información más detallada del consumo hídrico por persona desde el sector académico en la ciudad o el país de estudio, será un dato secundario de mayor relevancia.
Huella hídrica verde	(4-11)	Se toma la ecuación original de la huella hídrica de un cultivo y se elimina el factor del rendimiento del cultivo, ya que las zonas verdes en un campus universitario no tienen función de producción sino de servicios ecosistémicos.
	N/A	Dado que el factor UAC depende de la ETo y se calcula por medio del método FAO Penman Monteith, se propone calcular la ETo por medio de otros métodos como el método de Thornthwaite, el método de Turc y para Colombia el método desarrollado por Cenicafé. Esto en caso de no contar con suficiente información para calcular la ecuación de la FAO.
	(4-19)	En caso de no contar con información suficiente para realizar el cálculo del factor UAC, se puede hacer uso de datos secundarios como huellas hídricas ya calculadas para la vegetación específica que se encuentra en el campus. Estos datos deben ser de preferencia de la ciudad o país de la zona de estudio.
Huella hídrica gris	(4-20)	Se realizó el cambio del factor de la concentración natural a la concentración real de la fuente hídrica receptora en el denominador para tener en cuenta la asimilación restante de la fuente hídrica receptora. También se decidió tomar los parámetros que hayan sido medidos y no solo el que haya dado una huella hídrica más alta, ya que la fuente hídrica receptora tendrá que reducir la contaminación de todos los parámetros y no solo de uno.
	(4-21)	A partir de la consideración anterior, la relación en el denominador puede dar negativo. Para evitar errores de concepto y cálculo, se cambia el denominador para asegurar que el vertimiento realizado ejerza la mínima presión sobre el recurso hídrico, sin desmeritar el impacto generado.

Ítems	Ecuación	Consideraciones asociadas
	N/A	Si el vertimiento realizado es entregado a un tercero, se debe tener conocimiento de la concentración final de la descarga. En caso de no contar con esta información, se asume la totalidad de la carga contaminante generada como si la descarga se realizará directamente a la fuente hídrica receptora.
Huella hídrica indirecta	(4-22) y (4-23)	Se propone calcular de manera imprescindible la huella hídrica indirecta por consumo de energía, combustible fósil y papel.
Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica	(4-24)	Se calcula solo la escasez de agua azul y el nivel de contaminación del agua (NCA). La escasez de agua azul no se modifica. El denominador de NCA se modifica de escorrentía real (flujo hídrico total) a disponibilidad real del agua (DAreal) para asegurar el mínimo ecológico en la fuente hídrica receptora.

5.3 Recolección de información

Para el cálculo de la huella hídrica azul, verde, gris, indirecta y la sostenibilidad de la huella hídrica se recopilaron múltiples datos acorde a los requerimientos específicos de cada ecuación. De esta manera se describe a continuación los datos acorde al tipo de huella hídrica calculada junto con la fuente de información y los supuestos que permitieron calcular la huella hídrica del Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín bajo la metodología adaptada de la WFA.

5.3.1 Huella hídrica azul

Para realizar el cálculo de la huella hídrica azul es importante entender que el abastecimiento del Valle de Aburrá proviene en un 91% del embalse la Fe y Riogrande II, y los vertimientos son realizados en el río Medellín (Corporación CuencaVerde, 2018). Es decir, que el volumen de agua extraído de una cuenca hidrográfica no regresa a su cuenca de procedencia, por consiguiente y acorde a la definición de la huella hídrica azul (ver pág. 17) todo el volumen de agua extraído se convierte en la huella hídrica.

De esta manera, el cálculo de la huella hídrica azul realizado por medio de la ecuación (4-1) que corresponde al balance hídrico entre el volumen de agua que ingresa a las instalaciones de la universidad y el volumen hídrico que es vertido al alcantarillado se convierte en el volumen de agua consumido por parte de las instalaciones de la universidad

el cual es equivalente al consumo hídrico facturado por parte de la empresa de servicios públicos, información otorgada por la Unidad de Logística y Servicios Transversales.

Por otra parte, la huella hídrica calculada por medio de la ecuación **(4-2)** y la ecuación **(4-3)** se realiza a través de la aplicación de datos primarios de población estudiantil, información otorgada por Áreas curriculares de la Facultad de Minas y Oficina de Gestión Ambiental sede Medellín. Así mismo, se requieren datos secundarios de consumo hídrico per cápita para la ciudad de Medellín (Corantioquia & Universidad Nacional de Colombia, 2017) y consumo hídrico cápita para educación media y superior para Colombia (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2017).

5.3.2 Huella hídrica verde

La huella hídrica verde se calculó a partir de la ecuación **(4-11)** donde se requiere información acerca del tipo de cobertura vegetal específico, del coeficiente de cultivo (K_c) y de la evapotranspiración de referencia (E_{To}), para las instalaciones del Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

De esta manera, los datos de cobertura vegetal fueron otorgados por la Oficina de Gestión Ambiental de la sede Medellín. El K_c específico para las coberturas vegetales en el Campus Robledo fue tomado de un informe de la FAO donde desarrollan múltiples parámetros de suelo asociados a diferentes tipos de cobertura vegetal (FAO, 2018). Y para el cálculo de la E_{To} por medio del software libre CROPWAT, se requirió de datos hidroclimatológicos como la precipitación, la temperatura mínima, la temperatura media, la temperatura máxima, la humedad relativa y la velocidad del vientos, estos datos fueron tomados del sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA).

Así mismo, estos datos hidroclimatológicos son usados para aplicar las ecuaciones de Thornthwaite **(4-12)**, el método de Turc **(4-15)** y Cenicafé **(4-18)** para el cálculo de la huella hídrica verde. Por otra parte, para aplicar la ecuación **(4-19)** se requiere información de la huella hídrica de la cobertura vegetal que se encuentra en el Campus Robledo, esta información es obtenida de estudios previos de cálculo de huella hídrica para diferentes coberturas vegetales en Colombia (Campuzano Ochoa et al., 2015).

5.3.3 Huella hídrica gris

La huella hídrica gris fue calculada a partir de la ecuación **(4-20)**. Para esto, se requieren los datos del volumen del efluente (E_{fl}), la concentración máxima permitida en el vertimiento (C_{max}), la concentración real del afluente receptor de la descarga (C_{real}), la concentración del efluente (C_{eff}) y la concentración del afluente (C_{afl}).

La concentración máxima (C_{max}) fue tomada a partir de los límites máximos permitidos para los vertimientos al alcantarillado público y a las fuentes hídricas superficiales de la Resolución 0631 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Los datos asociados a la concentración real (C_{afl}) que es igual a la concentración del recurso hídrico de entrada se tomaron a partir de la Resolución 2115 de 2017 (Ministerio de la Protección Social. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007) donde se establecen las concentraciones máximas para el agua potable, y ya que el Campus Robledo tiene acceso al acueducto local, se cumplen estos parámetros para el afluente.

El efluente considerado es igual al volumen de agua facturado para el Campus Robledo que es el mismo dato asociado a la huella hídrica azul y fue otorgado por la Unidad de Logística y Servicios Transversales de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

El vertimiento se realiza al alcantarillado público de la ciudad de Medellín, el cual recolecta las aguas grises y las lleva a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Aguas Claras. Sin embargo, no se cuenta con información de la concentración final de los parámetros de calidad de agua, por esta razón se toma la concentración de la descarga al alcantarillado como la C_{eff} .

Es así como los datos asociados a la C_{eff} fueron tomados al interior del Campus Robledo, específicamente en los manjoles de flujo de salida de los edificios (ver **Figura 5-2**). De esta manera, se ejecutaron 10 puntos de muestreos durante una jornada académica, una vez al mes durante los seis meses de estudio.

Para el bloque M1 se tomó un punto de muestreo, así mismo para Ingeominas también se tomó un solo punto de muestreo donde llegan todas las aguas vertidas de los edificios allí presentes. Por otra parte, para la Facultad de Minas se tomaron ocho puntos acorde a los puntos de salida del vertimiento fuera del área de estudio; para este último se promediaron los resultados para obtener un solo análisis congruente con la información total disponible para el cálculo de la huella hídrica gris.

Figura 5-2: Evidencia fotográfica de la toma de muestras.



Fuente: Campus adaptado de (Universidad Nacional de Colombia, n.d.), fotografías elaboración propia.

Los parámetros medidos fueron DBO, DQO, hierro y SST esto a partir de información suministrada por la Oficina de Gestión Ambiental, acerca de muestreos en años anteriores, evidenciando la importancia de estos parámetros para el Campus Robledo. Los parámetros analizados fueron establecidos por el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Finalmente, el punto de vertimiento considerado es el Río Medellín, ya que es el punto final donde se realiza la descarga después de su tratamiento en la PTAR de Aguas Claras. Por esta razón, la concentración natural (C_{real}) de los parámetros fisicoquímicos es tomada de muestreos realizados en el Río Aburrá a nivel del punto de referencia Puente Machado, ya que este es el punto de muestreo más cercano y anterior a la zona de vertimiento de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Aguas Claras (Universidad de Antioquia y Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2020).

5.3.4 Huella hídrica indirecta por energía eléctrica

La huella hídrica indirecta por consumo de energía eléctrica se calculó a partir de la ecuación (4-22). Para ello, fue necesario obtener información del consumo energético en el Campus Robledo, información otorgada por la Unidad de Logística y Servicios Transversales. Adicionalmente se requiere el porcentaje de aporte de las fuentes de energía de la matriz energética del país el cual fue obtenido de XM (2022). Por otra parte, los factores de consumo hídrico de las fuentes de energía que conforman la matriz energética para Colombia (energía eólica, hidroeléctrica, fotovoltaica, de gas natural, de combustible líquido, de carbón y del bagazo) se obtuvieron de P. W. Gerbens-Leenes et al. (2008) y Wilson et al. (2012).

Tabla 5-3: Factores de huella hídrica energética.

Matriz energética Colombia	Factor (m ³ /GJ)	Referencia
EE Eólica	0,00	(P. W. Gerbens-Leenes et al., 2008)
EE Hidroeléctrica (hidráulica)	1,87	(Mekonnen & Hoekstra, 2012)
Gas natural	0,18	(Wilson et al., 2012)
Combustible líquido	1,06	(P. W. Gerbens-Leenes et al., 2008)
Carbón	0,53	(Wilson et al., 2012)
EE Solar (fotovoltaica)	0,27	(P. W. Gerbens-Leenes et al., 2008)
Bagazo (cogeneración)	50,00	(Wilson et al., 2012)

5.3.5 Huella hídrica indirecta por papel

La huella hídrica indirecta por consumo de papel se calculó a partir de la ecuación (4-23). De esta manera, se recolectó la información de los residuos generados de papel archivo, papel periódico, cartón y plegadiza como productos del papel, esta información fue otorgada por la Oficina de Gestión Ambiental. Se asumió como fuente de información los

residuos generados y no los adquiridos porque la mercancía se puede comprar y almacenar hasta que se requiera su uso, pero el volumen de papel generado como residuo refleja adecuadamente el consumo realizado de este insumo. Por otra parte, los factores de consumo hídrico para cada uno de estos tipos de papel fueron extraído de (Schyns et al., 2017; van Oel & Hoekstra, 2012)

Tabla 5-4. Huella hídrica de algunos derivados de la madera.

Material	Factor (m ³ /ton)
Papel Archivo	1029
Periódico	841
Cartón	965
Plegadiza	1099

Fuente: (Schyns et al., 2017).

5.3.6 Análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica

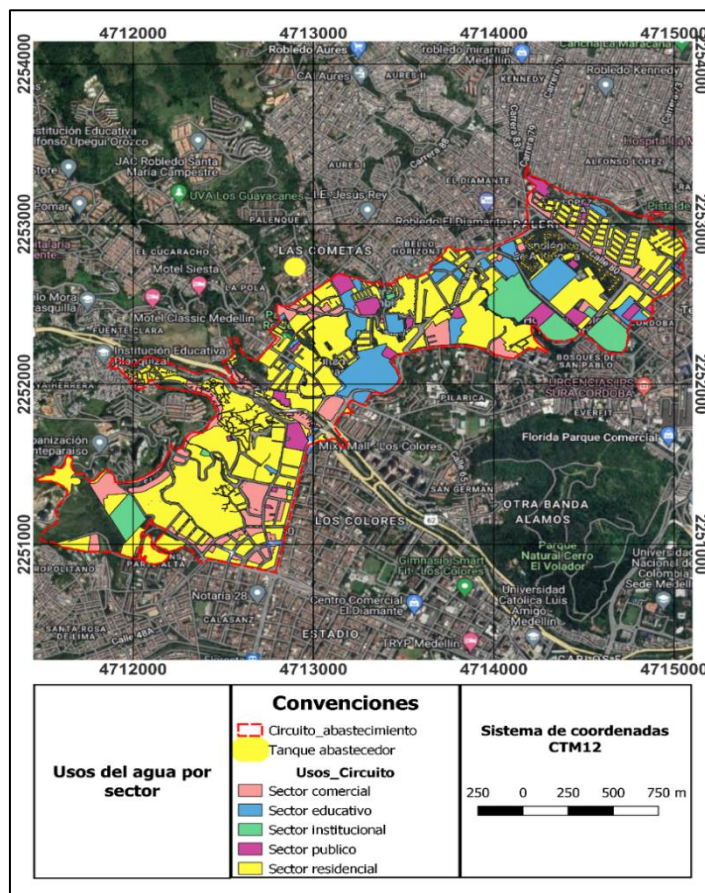
Para realizar el análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica y aplicar la ecuación (2-40) para la escasez de agua azul (EA_{azul}) y la ecuación (4-24) de nivel de contaminación del agua (NCA) se requiere la información de la disponibilidad real de agua (DA_{real}). Esta es la resta entre la oferta hídrica total y el caudal ecológico de una cuenca. Por otra parte, el Campus Robledo no se abastece ni realiza el vertimiento a la fuente hídrica de alta capacidad más cerca (Quebrada la Iguaná). Por esto se decide plantear múltiples escenarios para realizar el cálculo de la EA_{azul} y la NCA.

Los escenarios a calcular son la cuenca abastecedora que es el embalse Río Grande el cual está conformado por el Río Chico y el Río Grande. Por otra parte, se calcula el NCA teniendo como consideración la zona de vertimiento al Río Medellín desde la PTAR de Aguas Claras asumiendo que el vertimiento realizado por el Campus Robles se realiza directamente al a este afluente. Adicionalmente, se plantea el escenario, donde la zona de captación y la zona de vertimiento es la fuente hídrica más cercana con gran capacidad (como escenarios hipotéticos), en este caso la quebrada la Iguaná con la intención de comprender a nivel metodológico el comportamiento de los índices de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica.

Se contemplan dos escenarios más para el cálculo del EA_{azul}, con el fin de tener mejores estimaciones del impacto que genera la actividad educativa del Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. De esta manera, se estimó el consumo de agua a partir del circuito abastecedor de la zona, que es Palenque (Empresas Públicas de Medellín, 2022), con el supuesto de contar con la capacidad completa del tanque de abastecimiento (tanque Robledo) para el consumo del Campus Robledo. Adicionalmente se realiza una variación a este supuesto donde solo se tiene acceso a un porcentaje del abastecimiento, ya que este debe garantizar la disponibilidad hídrica para otros sectores económicos dentro de la misma zona.

En la **Figura 5-3** se puede observar la distribución espacial de cada sector al interior del circuito de abastecimiento y en la **Tabla 5-5** se relaciona los porcentajes correspondientes para cada sector económico en la zona.

Figura 5-3: Distribución de usos del agua por sector.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-5: Disponibilidad de agua del sistema de acueducto.

Uso	Área (m ²)	% Área
Sector educativo	214.584,6	11,5
Sector institucional	157.828,3	8,5
Sector publico	96.282,3	5,2
Sector comercial	236.823,0	12,7
Sector residencial	1158.214,8	62,1

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, el caudal ecológico ($Q_{\text{ecológico}}$) es el requerimiento hídrico para los ecosistemas presentes en la fuente de agua. Este se puede calcular por múltiples metodologías. Sin embargo para Colombia las tres más conocidas son la basada en la Resolución 865 del año 2004, en función del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IDEAM, 2018), y la desarrollada a partir del valor 7Q10 y el valor Q95 de las series hidrológicas de interés (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible & Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2013). De esta manera y bajo estas metodologías se calcula el caudal ecológico para los escenarios propuestos en el **Anexo H**.

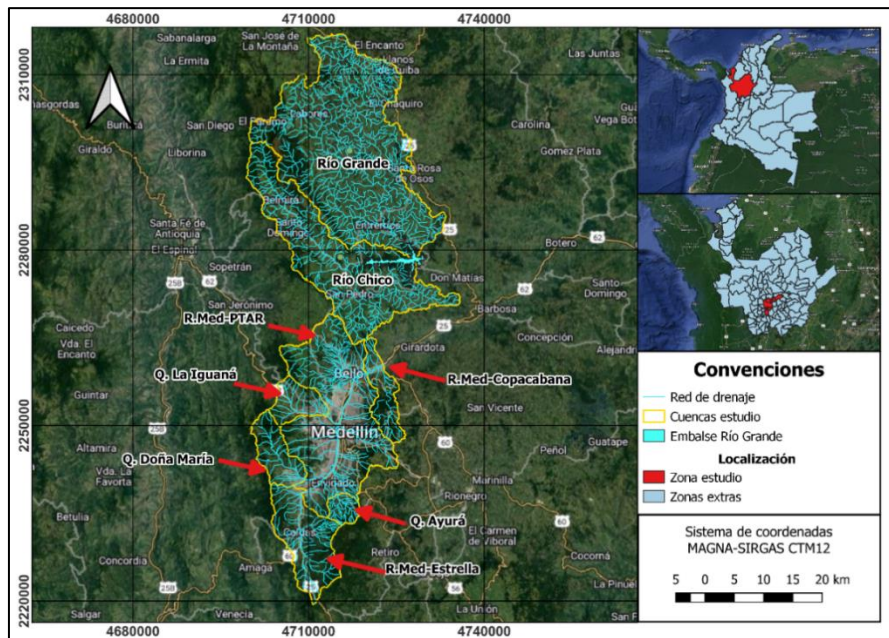
Para obtener el caudal ecológico es necesario realizar un trazado de cuencas por medio de Sistemas de Información Geográfica, para lo cual se utilizó el software de uso libre MAPWINDOWS 4.8.8, con la herramienta watershed delination y el conjunto de herramienta HidroSIG 4.0, implementado por el Posgrado de Recursos Hidráulicos de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.

Las cuencas que van a ser trazadas dependen de los escenarios propuestos, es decir de los diferentes límites de cálculo considerados. Así, las cuencas de interés que serán trazadas para realizar los análisis de los caudales ecológicos de los diferentes escenarios son la quebrada Doña María, la quebrada la Iguaá, el Río Aburrá, y los Ríos Grade y Chico que son los que conforman el embalse de Río Grande, que a su vez abastece el circuito Palenque y es el que finalmente abastece al Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Para el trazado de cuencas se requieren datos de la red de drenaje obtenidos de los datos abiertos del IGAC en escala 1:100.000 (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2022). Adicionalmente se requieren datos de del Modelo Digital del Terreno (MDT) generado por

la misión de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) por medio de diversas observaciones del Satélite PALSAR (uno de los instrumentos del ALOS Advanced Land Observing Satellite-1); donde su resolución espacial cuenta con 12.5m y 30m, cuyas observaciones fueron hechas entre el 2006 y el 2011 (NASA, 2022). Con esta información primaria recolectada, se realizó el trazado de las cuencas de interés, donde el trazado final para este estudio, se pueden ver en la **Figura 5-4**.

Figura 5-4: Red de drenaje y cuencas trazadas.



Por otra parte, el modelo lluvia escorrentía de tanques de agregado lineal de (Vélez et al., 2002), es uno de los métodos más completos para calcular la oferta hídrica total en zonas no instrumentadas, es un modelo a escala diaria que simula un proceso lluvia–escorrentía (**anexo E**). Este modelo permitió calcular la oferta hídrica para los escenarios propuestos como se puede observar en el **anexo G**.

El modelo lluvia escorrentía (modelo de tanques) permite calcular el caudal de las cuencas de interés. Este modelo tiene en cuenta las variables del área de la cuenca, series de precipitación diaria, y evapotranspiración, estas variables deben ser modeladas y adaptadas a la cuenca de estudio.

El modelo de tanques cuenta con parámetros hidráulicos que son el almacenamiento capilar del suelo, la conductividad del suelo en su capa superficial e inferior, pérdidas subterráneas, el tiempo medio de residencia del flujo superficial, tiempo medio de residencia flujo subterráneo, tiempo medio de residencia del flujo base, exponente de infiltración y exponente de evaporación (**anexo E**).

Dada la variabilidad espacial del modelo a desarrollar y de las variables a tener en cuenta, el modelo se desarrolla con un análisis de datos para calibración y corroboración en su aplicación (**anexo F**).

Por otra parte, se requieren datos hidroclimatológicos de las cuencas estudiadas para el cálculo del caudal total y el caudal ecológico, estos datos son la precipitación diaria, evapotranspiración potencial, área de la cuenca (MADS et al., 2019) y caudales diarios. Para esto se relacionan las estaciones meteorológicas de donde se tomó la información que fue del IDEAM (IDEAM, 2022) y de Corantioquia (Corantioquia, 2022) como se puede observar en la **Tabla 5-6** .

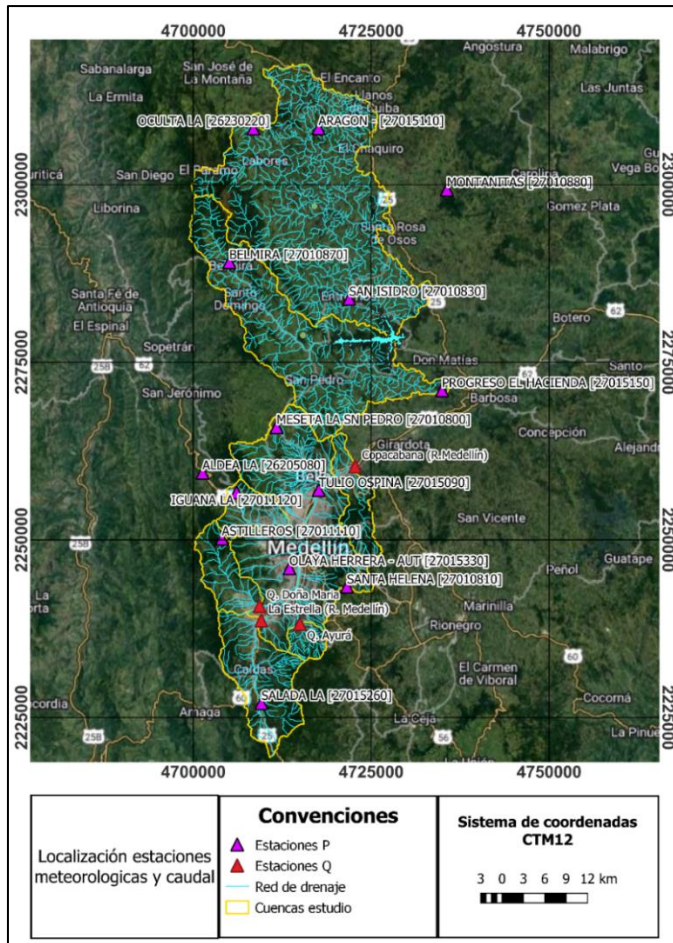
Tabla 5-6: Estaciones meteorológicas.

Nombre Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Categoría	Entidad	Nombre Estación
SALADA LA [27015260]	6.0484	-75.6247	1923	Agrometeorológica	IDEAM	SALADA LA [27015260]
MESETA LA SN PEDRO [27010800]	6.3997	-75.6072	2600	Pluviométrica	IDEAM	MESETA LA SN PEDRO [27010800]
TULIO OSPINA [27015090]	6.3197	-75.5533	1453	Climática Ordinaria	IDEAM	TULIO OSPINA [27015090]
SANTA HELENA [27010810]	6.1969	-75.5168	2550	Climática Ordinaria	IDEAM	SANTA HELENA [27010810]
OLAYA HERRERA - AUT [27015330]	6.22	-75.5900	1490	Sinóptica Principal	IDEAM	OLAYA HERRERA - AUT [27015330]
LAURELES-MEDELLIN [27011270]	6.2464	-75.5911	1512	Pluviométrica	IDEAM	LAURELES-MEDELLIN [27011270]
IGUANÁ LA [27011120]	6.3163	-75.6575	2300	Pluviométrica	IDEAM	IGUANÁ LA [27011120]
ASTILLEROS [27011110]	6.2573	-75.6759	2450	Pluviométrica	IDEAM	ASTILLEROS [27011110]
ALDEA LA [26205080]	6.3411	-75.7009	1737	Meteorológica Especial	IDEAM	ALDEA LA [26205080]
Q. DOÑA MARIA	6.1718	-75.6276	1610	Limnigráfica	Corantioquia	Q. DOÑA MARIA
Q. AYURÁ	6.1493	-75.5763	1685	Limnigráfica	Corantioquia	Q. AYURÁ
LA ESTRELLA (Río Aburrá)	6.1536	-75.6254	1625	Limnigráfica	Corantioquia	LA ESTRELLA (Río Aburrá)
COPACABANA (Río Aburrá)	6.3502	-75.5073	1420	Limnigráfica	Corantioquia	COPACABANA (Río Aburrá)
PROGRESO EL HACIENDA [27015150]	6.4475	-75.3972	1345	Climática Ordinaria	IDEAM	PROGRESO EL HACIENDA [27015150]
SAN ISIDRO [27010830]	6.5632	-75.5158	2320	Pluviométrica	IDEAM	SAN ISIDRO [27010830]
BELMIRA [27010870]	6.6092	-75.6683	2540	Pluviométrica	IDEAM	BELMIRA [27010870]
MONTANITAS [27010880]	6.7029	-75.3922	2630	Pluviométrica	IDEAM	MONTANITAS [27010880]

Nombre Estación	Latitud	Longitud	Altitud	Categoría	Entidad	Nombre Estación
OCULTA LA [26230220]	6.7794	-75.6386	2300	Pluviométrica	IDEAM	OCULTA LA [26230220]
ARAGON [27015110]	6.7801	-75.5557	2652	Climática Ordinaria	IDEAM	ARAGON [27015110]

En la **Figura 5-5** se puede observar la ubicación de las estaciones meteorológicas en relación de las cuencas trazadas.

Figura 5-5: Estaciones meteorológicas en las cuencas trazadas.



Con toda la información anterior recolectada y procesada se calcula la oferta disponibilidad de agua real (DA_{real}) (**Anexo I**), teniendo así toda la información requerida para calcular el EA_{azul} con la ecuación (2-40) y el NCA por medio de la ecuación (4-24) bajo todos los escenarios propuestos.

6. Resultados y discusiones

Los resultados se presentan para cada huella hídrica calculada y para cada escenario por medio del cual se calculó la sostenibilidad ambiental de la huella hídrica. En cada uno se evidencia y analiza las diferencias entre la metodología de la WFA y las adaptaciones desarrolladas en la **sección 4**. Así mismo, analiza las diferencias entre las ecuaciones propuestas en la adaptación metodológica, con la intención observar la eficiencia en el cálculo realizado a partir de datos terciarios.

6.1 Contabilidad y comparación de la huella hídrica

6.1.1 Huella hídrica azul

El campus Robledo contó con una población de casi 7.000 (ver **Tabla 5-1**) estudiantes activos en el periodo comprendido entre el mes de marzo del 2022 hasta el mes de agosto del mismo año, periodo en el cual se realizó el cálculo de la huella hídrica. Sin embargo, el Campus Robledo no funciona como una unidad aparte de los otros dos campus urbanos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Esto se debe a que las actividades académicas se desarrollan independientemente del campus al que esté asociado el programa académico en curso, por esta razón los estudiantes están en constante movimiento entre los campus de la sede Medellín.

En vista de esto, la huella hídrica azul calculada a partir de datos poblacionales (ecuación **(4-2)**) y del consumo hídrico para el sector académico (ecuación **(4-3)**) dan como resultado una sobrestimación de la huella hídrica azul como se puede observar en la **Tabla 6-1** y la **Figura 6-1**. De esta manera, la huella hídrica azul calculada por medio del factor de consumo hídrico per cápita para educación media y superior tuvo el valor más cercano a la huella hídrica calculada a partir de la facturación de reporte de consumo hídrico realizado (ver **Tabla 6-1** y **Figura 6-1**). Sin embargo, antes de hacer uso de estas ecuaciones se

debe considerar las características de los campus universitarios en estudio para evitar una sobrestimación.

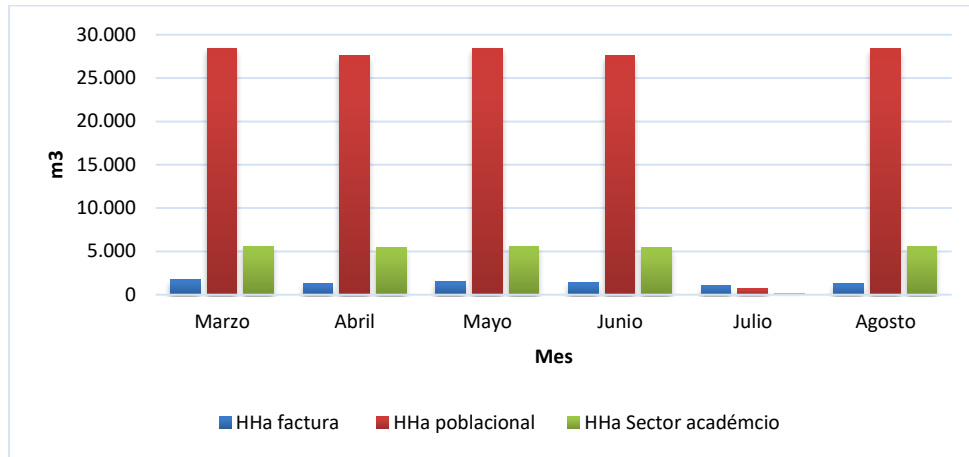
Este análisis evidencia que cada caso de estudio es específico y responde a unas condiciones particulares, por esta razón se deben aplicar todas las ecuaciones posibles según la disponibilidad de datos, ya que solo con los resultados finales se podrá tomar una decisión clara y concisa del resultado más pertinente para el estudio desarrollado junto con un enfoque más claro que permita formular estrategias a corto, mediano y largo plazo para la reducción de esta huella hídrica.

Por otra parte, la **Tabla 6-1** también evidencia que el consumo hídrico registrado en las facturas de servicios públicos, que permitieron el cálculo de la huella hídrica azul por traspaso de aguas de una cuenca a otra, representa de manera más acertada las dinámicas al interior del Campus Universitario. Es así como la huella hídrica generada a partir de los datos de facturación corresponde al balance hídrico para el Campus Robledo. Siendo de esta manera, el cálculo que satisface tanto los requerimientos de la ecuación de la huella hídrica de la metodología WFA (ecuación **(2-11)**) como la adaptación realizada (ecuación **(4-1)**). Dando como única diferencia en la adaptación metodológica respecto a la WFA la posibilidad de realizar el cálculo de la huella hídrica por medio de información secundaria.

Tabla 6-1: Huella hídrica azul.

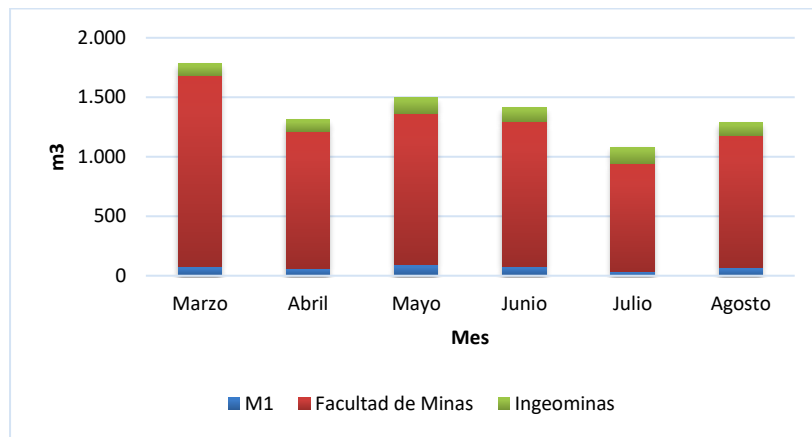
	Cálculos con datos de facturación				Cálculo con factor de consumo hídrico per cápita	Cálculo con factor de consumo hídrico por estudiante
	M1	Facultad de Minas	Ingeominas	Campus Robledo	Campus Robledo	Campus Robledo
Mes	HH _{azul} factura (m3) (traspaso de agua)	HH _{azul} factura (m3) (traspaso de agua)	HH _{azul} factura (m3) (traspaso de agua)	HH _{azul} factura (m3) (traspaso de agua)	HH _{azul} (m3) (poblacional)	HH _{azul} (m3) (Sector académico)
Marzo	76,00	1.603,00	102,00	1.781,00	28.468,45	5.604,03
Abril	64,00	1.151,00	96,00	1.311,00	27.550,11	5.423,25
Mayo	91,00	1.271,00	133,00	1.495,00	28.468,45	5.604,03
Junio	79,00	1.215,00	120,00	1.414,00	27.550,11	5.423,25
Julio	35,00	906,00	140,00	1.081,00	759,84	144,75
Agosto	66,00	1.111,00	111,00	1.288,00	28.381,83	5.586,98

Figura 6-1: Comparación gráfica de la huella hídrica azul.



Con los resultados anteriores se realiza la **Figura 6-2** donde se puede analizar el comportamiento de la huella hídrica al interior del Campus Robledo. Por consiguiente, el consumo hídrico más significativo está en la Facultad de Minas. Esto se debe a las actividades y administrativas que se desarrollan principalmente allí.

Figura 6-2: Huella hídrica azul por áreas.



6.1.2 Huella hídrica verde

El cálculo de la huella hídrica verde para el Campus Robledo fue realizado a partir de la metodología adaptada para el cálculo de la huella hídrica en campus universitario por medio de la ecuación (4-11), esta ecuación es correspondiente a la ecuación (2-19) de la metodología original WFA. Para esto, se hizo uso de la herramienta CROPWAT para el cálculo de la ETc.

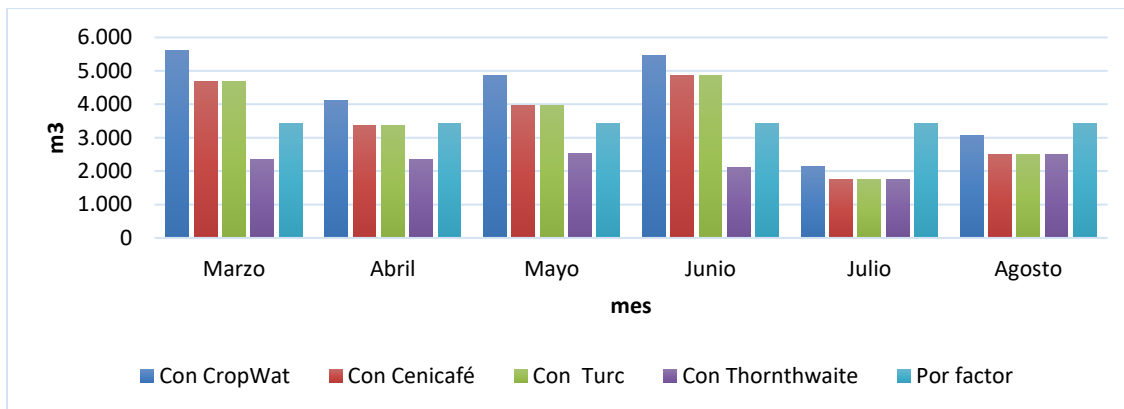
Por otra parte y para evaluar el resultado de la huella hídrica a partir de ecuaciones empíricas de cálculo de la ETP como alternativa al cálculo de la ETo se aplicaron las ecuaciones de Cenicafé (4-18), Turc (4-15) y Thornthwaite (4-12). Así mismo, se calculó la huella hídrica por medio de factores de consumo hídrico verde de cultivos ya conocidos para el pasto y la vegetación forestal. De esta manera, los resultados de los cálculos realizados se pueden observar en la **Tabla 6-2**.

Tabla 6-2: Huella hídrica verde.

Mes	HHv CropWat (m3)	HHv con Cenicafé (m3)	HHv con Turc (m3)	HHv con Thornthwaite (m3)	HHv con factor (m3)
Marzo	5.605,61	4.675,11	4.675,11	2.337,03	3.419,87
Abril	4.124,43	3.361,97	3.361,97	2.351,65	3.419,87
Mayo	4.856,74	3.958,09	3.958,09	2.533,36	3.419,87
Junio	5.472,81	4.862,66	4.862,66	2.102,22	3.419,87
Julio	2.124,82	1.734,46	1.734,46	1.734,46	3.419,87
Agosto	3.056,71	2.493,42	2.493,42	2.493,42	3.419,87

Los resultados de los cálculos observados en la **Tabla 6-2** y la **Figura 6-3**, evidencian que el método de mayor consumo hídrico verde en el Campus Robledo es el método calculado por medio de CROPWAT. Si bien es el valor más elevado, también es el que representa la mayor robustez en los cálculos, ya que se tiene en cuenta un mayor número de parámetros hidroclimatológicos y de suelo locales que otorgan mayor confiabilidad en los resultados obtenidos.

Figura 6-3: Comparación gráfica de la huella hídrica verde.



Por otra parte los resultados obtenidos al aplicar la ETP por medio de las ecuaciones de Cenicafé (4-18), Turc (4-15) y Thornthwaite (4-12), evidencian que son datos más inestables, ya que dependen solo de unos pocos parámetros climatológicos, sin considerar las condiciones del suelo o del cultivo en sí. Sin embargo pueden llegar a ser alternativas de gran utilidad cuando no se tengan suficientes información disponibles para realizar el cálculo por medio de la ETc y CROPWAT. De esta manera, y acorde a la **Tabla 6-2** y la **Figura 6-3** los métodos alternativos para el cálculo de la ETo más cercanas al valor real generado por CROPWAT son las ecuaciones de Cenicafé y Turc.

La menor robustez se presenta al realizar el calculado a partir de la ecuación (4-19), esto se debe a que los factores de las huellas hídricas ya conocidas, para las coberturas vegetales al interior del Campus Robledo, tienen en cuenta condiciones generales para el estudio específico en el cual fueron calculados, por esta razón los valores son estáticos mes a mes y no representa las variaciones locales y temporales.

6.1.3 Huella hídrica gris

Si bien la huella hídrica gris calculada por medio de la adaptación metodológica no contempla alternativas a la información necesaria para el cálculo, como si se hace para la huella hídrica azul y verde, sí propone modificaciones importantes en la ecuación de cálculo. De esta manera, se aplica la ecuación (2-27) para el cálculo de la huella hídrica gris a partir de la WFA, la ecuación (4-20) para el cálculo a partir de la adaptación metodológica y se comparan ambas ecuaciones.

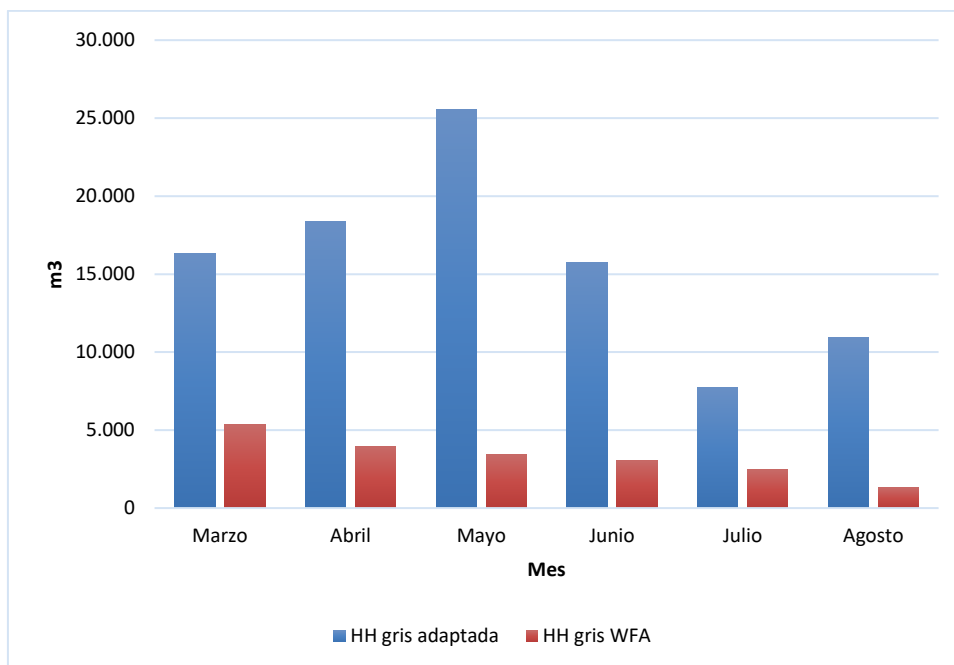
La huella hídrica gris para el Campus Robledo es calculada para cada uno de los parámetros medidos (DBO, DQO, SST y hierro) a partir de los muestreos realizados en el Campus Robledo (ver **Anexo J**). En la **Tabla 6-3** se presentan los resultados obtenidos para la metodología WFA y su adaptación metodológica para Campus Universitario de manera consolidada para el bloque M1, la Facultad de Minas e Ingeominas discretizados para cada mes analizado.

Tabla 6-3: Huella hídrica gris mediante la WFA y la adaptación a campus universitarios.

HH gris adaptada (m³)				
Bloque	M1	Facultad de Minas	Ingeominas	HH total mes
Marzo	1.438,63	13.757,26	1.136,14	16.332,03
Abril	1.288,16	16.477,98	595,44	18.361,58
Mayo	1.255,87	23.847,04	442,17	25.545,07
Junio	1.370,15	14.134,44	257,10	15.761,68
Julio	309,50	6.361,32	1.060,71	7.731,54
Agosto	1.341,12	8.793,94	794,80	10.929,86
Total	7.003,43	83.371,98	4.286,35	

HH gris WFA (m³)				
Bloque	M1	Facultad de Minas	Ingeominas	HH total mes
Marzo	385,78	4.276,97	685,24	5.347,98
Abril	267,95	3.546,40	113,54	3.927,88
Mayo	262,08	3.094,44	54,09	3.410,61
Junio	241,21	2.775,76	45,28	3.062,25
Julio	85,68	2.194,72	164,27	2.444,67
Agosto	189,20	1.040,31	97,68	1.327,19
Total	1.431,90	16.928,59	1.160,09	

Figura 6-4: Comparación de la huella hídrica gris.



Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la **Tabla 6-3** y en la **Figura 6-4**, se puede observar que la huella hídrica gris calculada por medio de la metodología de la WFA presenta una subestimación de la huella hídrica gris. Esto se debe a que contempla el escenario ideal donde la fuente hídrica receptora no ha sido intervenida por el ser humano y por consiguiente tiene la capacidad completa de asimilar los contaminantes presentes en el vertimiento. Si bien este enfoque permite observar únicamente las afectaciones generadas por el área de estudio, esta concepción no se acopla al escenario real para el caso de estudio, ya que el Río Medellín ha sido fuertemente intervenido por la población humana desde hace mucho tiempo y por consiguiente, ya no conserva los niveles naturales de las sustancias presentes en la fuente hídrica.

- **Análisis de sensibilidad de la huella hídrica gris**

Dada la gran variabilidad en los resultados obtenido se presenta la cuestión si la ecuación planteada es altamente sensible a las condiciones reales (actuales) del río lo cual indicaría que se está asumiendo en gran medida la contaminación generada por otros actores debido al denominador adoptado o si es resultado de la sumatoria de los parámetros y por ende el resultado es la representación del consumo y la contaminación por la variación directa de las actividades y la población del campus, lo cual indicaría netamente la relación de las actividades ejecutadas por la universidad.

De esta manera, en la **Figura 6-5** se analiza la sensibilidad de la huella hídrica gris calculada por medio de la WFA teniendo en cuenta un aumento y una reducción del 10% de la huella. Por otra parte en la **Figura 6-6** se puede observar la comparación entre la huella hídrica gris calculada por la WFA; la calculada a través de la ecuación adaptada completamente; la huella hídrica gris adaptada solo contemplando la variación del denominador donde se tiene en cuenta la concentración real del río, pero sin la sumatoria de todos los parámetros medidos, solo teniendo en cuenta el parámetro de mayor impacto al igual que el cálculo realizado con la WFA; y finalmente se considera el escenario donde la huella hídrica gris adaptada solo contemplara la sumatoria de los parámetros calculados por medio de la WFA.

Figura 6-5: Análisis de sensibilidad porcentual de la huella hídrica gris WFA.

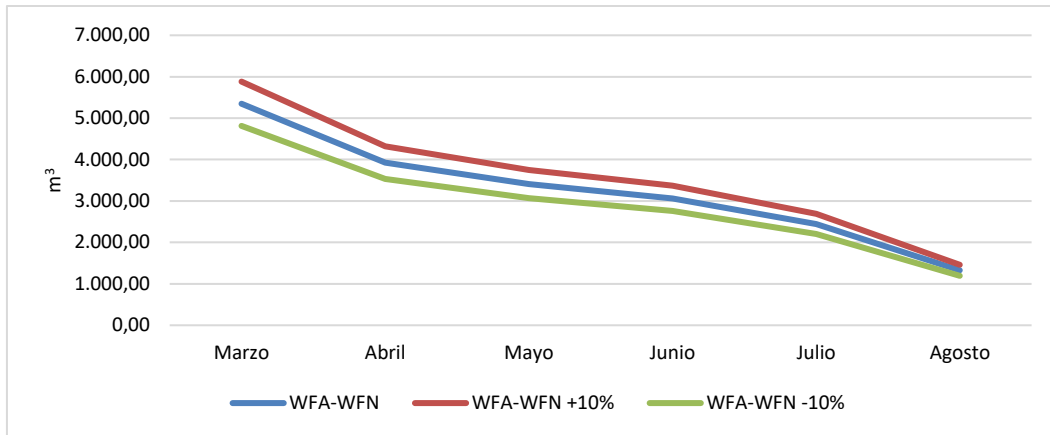


Figura 6-6: Análisis de sensibilidad comparativa de la huella hídrica gris.

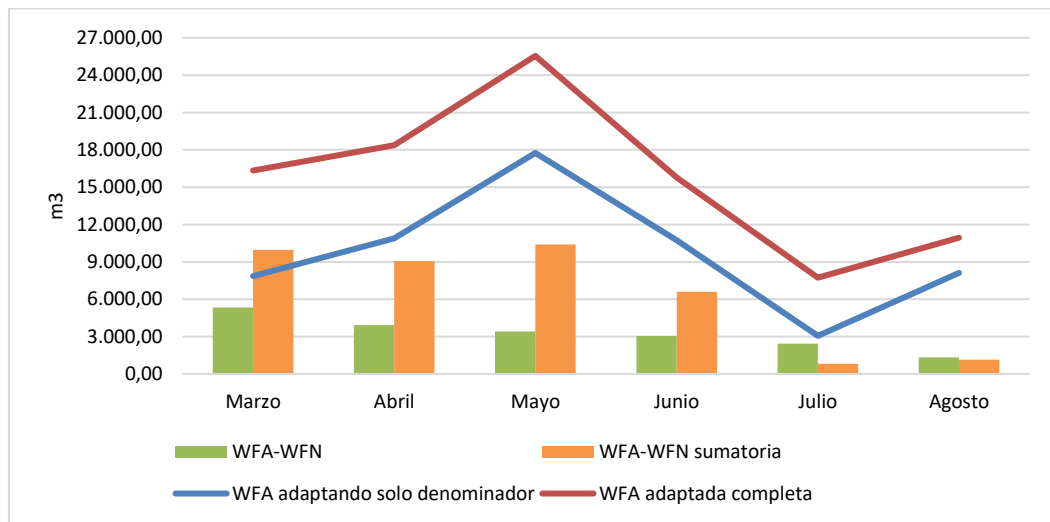
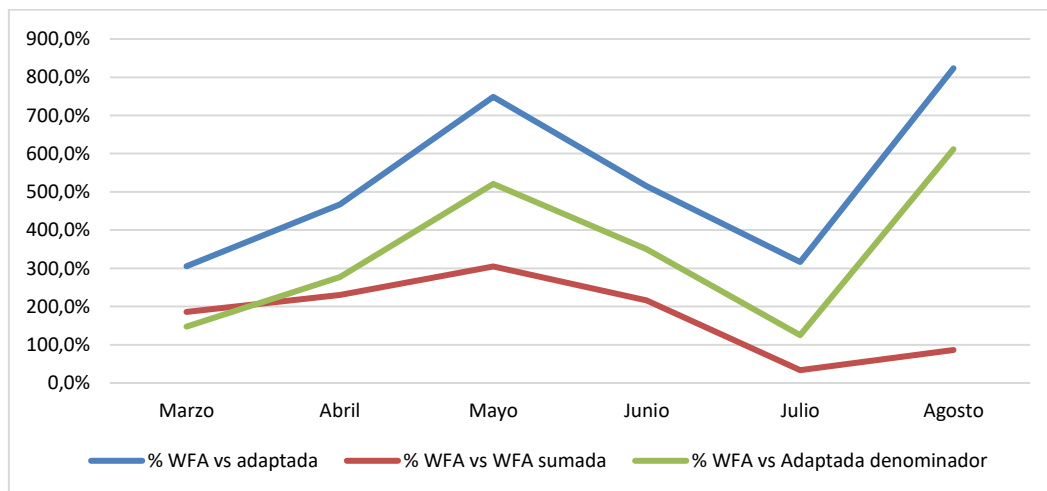


Figura 6-7: Análisis de sensibilidad de diferencia porcentual de la huella hídrica gris.



En la **Figura 6-5** se puede observar que al realizar la variación porcentual de la huella hídrica gris calculada por medio de la WFA no hay una variabilidad significativa. Sin embargo, en la **Figura 6-6** si se presenta una variación significativa entre las huellas al comparar las diferentes variaciones entre la huella calculada por medio de la WFA y las variaciones que permitieron la ecuación adaptada. No obstante, y respaldado por medio de la **Figura 6-7**, se puede observar que tanto la sumatoria de los parámetros medidos como considerar las condiciones reales de la fuente receptora son significativamente aportantes a la diferencia entre los resultados obtenidos al calcular la huella hídrica gris a través de la WFA y la adaptación generada, pero es evidente que el mayor aporte es dado al considerar las condiciones reales de la fuente receptora, sin ser en algunos meses significativamente superior su aporte.

Si bien la huella hídrica gris calculada por medio de la ecuación adaptada es considerablemente superior al obtenido por medio de la WFA, se pudo observar que el aporte a esta diferencia no se debe completamente a la consideración de tomar las condiciones reales de la fuente receptora, sino que también existe un gran aporte debido a la sumatoria de parámetros medidos, por lo cual decir que la huella hídrica calculada por medio de la ecuación adaptada es una respuesta directa a las características reales del afluente receptor no es verdad. Adicionalmente, la adaptación realizada se presenta como el escenario más conservador y por consiguiente más eficiente para la preservar los recursos naturales. Esto teniendo en cuenta que siempre que se busque diseñar estrategias para la conservación y recuperación de los recursos, los escenarios a ejecutar deben basarse en los resultados con valores superiores que garanticen mejores condiciones ambientales.

6.1.4 Huella hídrica directa

La huella hídrica directa para el Campus Robledo es la suma de los resultados obtenidos para la huella hídrica azul, verde y gris a partir de la aplicación de la metodología adaptada para el cálculo de la huella hídrica en campus universitarios.

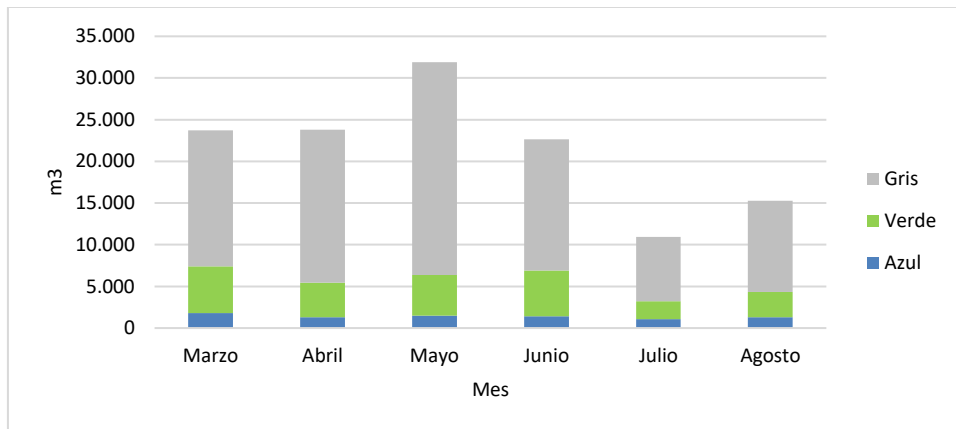
De esta manera, se presenta en la **Tabla 6-4** y en la **Figura 6-8** los resultados obtenidos para la huella hídrica directa del Campus Robledo.

En la **Tabla 6-4** y en la **Figura 6-8** se puede observar que en todos los meses la huella hídrica gris es la de mayor representación, seguida de la huella hídrica verde y finalmente la azul. Adicionalmente, las tres huellas hídricas aumentan de manera considerable al iniciar cada periodo académico lo que en el año 2022 fue en el mes de marzo y agosto, luego estos valores disminuyen en la temporada de receso que fue en el mes de julio.

Tabla 6-4: Huella hídrica directa.

Mes	Azul (m3)	Verde (m3)	Gris (m3)	HH directa (m3)
Marzo	1.781,00	5.605,61	16.332,03	23.718,64
Abril	1.311,00	4.124,43	18.361,58	23.797,01
Mayo	1.495,00	4.856,74	25.545,07	31.896,81
Junio	1.414,00	5.472,81	15.761,68	22.648,49
Julio	1.081,00	2.124,82	7.731,54	10.937,36
Agosto	1.288,00	3.056,71	10.929,86	15.274,57

Figura 6-8: Comparación gráfica de la huella hídrica directa.



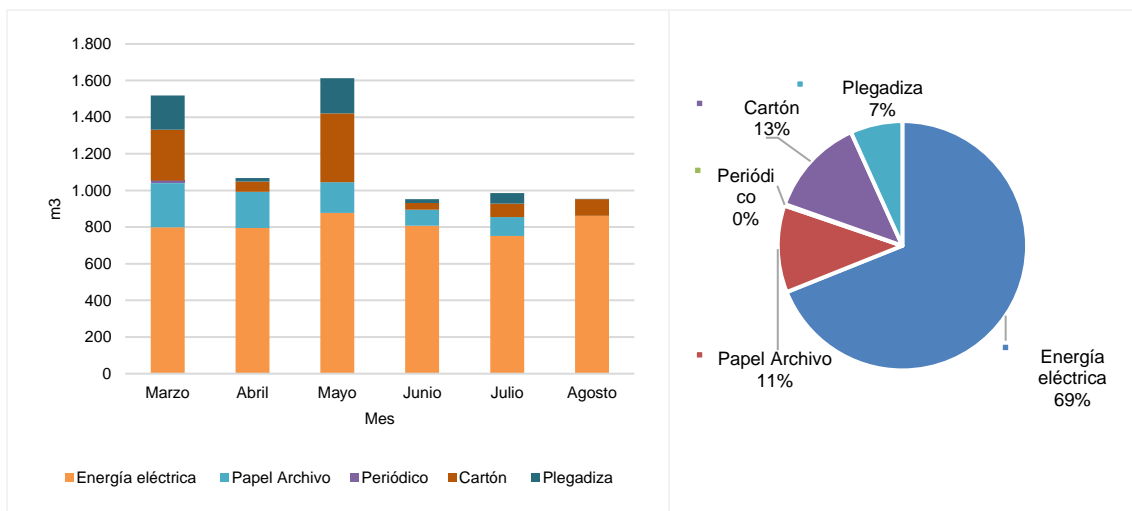
- **Huella hídrica indirecta**

La huella hídrica indirecta en el Campus Robledo se llevó a cabo con la intención de establecer su importancia dentro de la huella hídrica total. Para esto se calcula la huella hídrica de la energía eléctrica consumida, el papel de archivo gastado al igual que el periódico, el cartón y la plegadiza (**Tabla 6-5 y Figura 6-9**).

Tabla 6-5: Huella hídrica indirecta.

Mes	Energía eléctrica (m3)	HHi Papel Archivo (m3)	HHi Periódico (m3)	HHi Cartón (m3)	HHi Plegadiza (m3)	HH indirecta total (m3)
Marzo	798,22	241,82	14,30	277,53	187,49	1.519,36
Abril	794,86	198,39	0,00	55,01	19,56	1.067,82
Mayo	877,06	167,83	0,00	376,25	191,67	1.612,81
Junio	807,17	88,70	0,00	35,71	21,76	953,34
Julio	751,49	104,13	0,00	72,76	58,36	986,74
Agosto	861,64	0,00	0,00	91,48	1,32	954,44

Figura 6-9: Comparación gráfica de huella hídrica indirecta.



La **Figura 6-9** evidencian que la huella hídrica indirecta por consumo energético es la más importante para el Campus Robledo, debido a que representa el 69% del total de la huella hídrica indirecta. Seguido por el cartón con el 13% con una representación en la generación ocasional en los meses de marzo y mayo, lo cual aumenta considerablemente la huella hídrica indirecta en esos meses. Luego el papel archivo con el 11%, con lo cual entre los tres factores mencionados se cuenta con más del 90% de la huella hídrica indirecta.

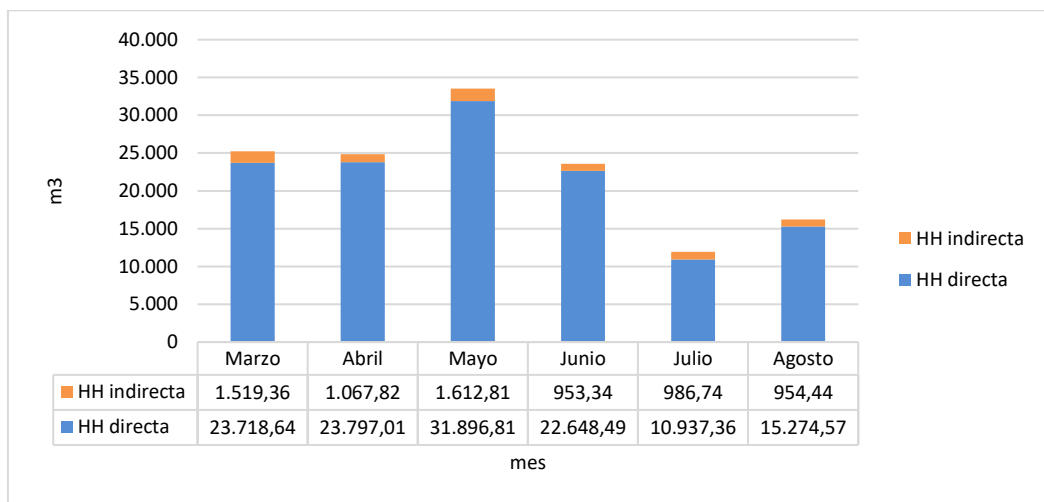
6.1.5 Huella hídrica total

La huella hídrica total para el Campus Robledo será la suma de la huella hídrica directa e indirecta implementada bajo la metodología adaptada. De esta manera, se puede observar el resultado de la huella hídrica total en la **Figura 6-10**.

Es así como en la **Figura 6-10** la huella hídrica indirecta es casi constante, posee muy poca variabilidad entre los meses, por lo que se puede asumir que no depende del flujo de estudiantes sino del uso y mantenimiento de las instalaciones en sí mismo.

Por otra parte, la huella hídrica directa varía considerablemente cada mes acorde a la etapa del ciclo académico, esta información es un buen indicador para establecer en que épocas del año se deben desarrollar diferentes tipos de estrategias con el fin de realizar una adecuada gestión del recurso hídrico.

Figura 6-10: Comparación gráfica de la huella hídrica total.



6.2 Análisis de sostenibilidad ambiental de la huella hídrica

El análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica para el Campus Robledo se realiza para la escasez de agua azul (EA_{azul}) y para el nivel de contaminación del agua (NCA). Estos cálculos se desarrollan teniendo en cuenta diferentes escenarios de captación y vertimiento. De esta manera se podrá analizar una serie de escenarios hipotéticos que bajo la noción de realizar una captación o un vertimiento en una fuente hídrica más pequeña y cercana, causa o no una afectación ambiental.

6.2.1 Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica azul

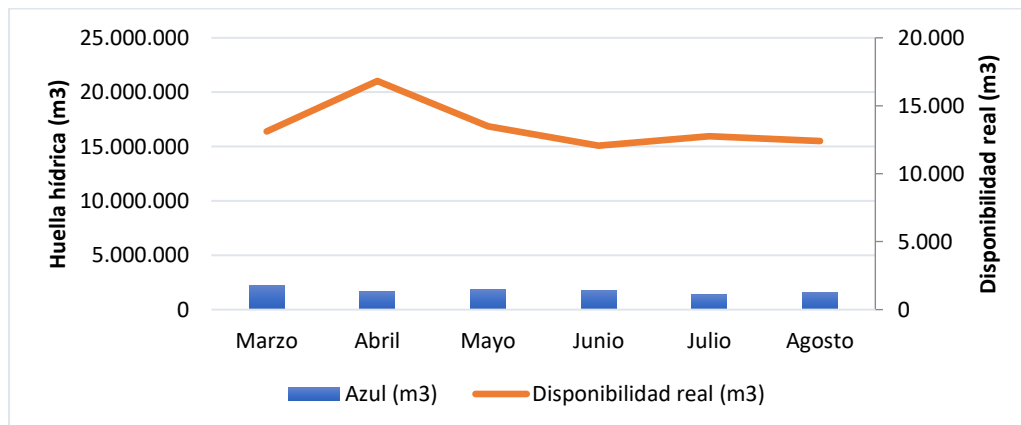
El índice de escasez de agua azul (EA_{azul}) para el caso de estudio Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín evalúa el impacto de escasez hídrica sobre el ecosistema de la cuenca abastecedora, que es el embalse Río Grande. En la **Tabla 6-6** se puede observar el resultado del cálculo de EA_{azul} para la cuenca abastecedora.

Tabla 6-6: Escasez de agua azul para el escenario Embalse Río Grande.

Mes	M1	Facultad de Minas	Ingeominas	Total
Marzo	4,63E-06	9,78E-05	6,22E-06	1,09E-04
Abril	3,04E-06	5,47E-05	4,57E-06	6,24E-05
Mayo	5,39E-06	7,541E-05	7,89E-06	8,87E-05
Junio	5,24E-06	8,06E-05	7,96E-06	9,37E-05
Julio	2,19E-06	5,68E-05	8,77E-06	6,77E-05
Agosto	4,26E-06	7,17E-05	7,16E-06	8,31E-05

Por otro lado, en la **Figura 6-11**, se evidencia la relación entre la disponibilidad real de la cuenca y la huella hídrica azul generada teniendo como límite de cálculo toda la cuenca abastecedora que es el embalse Río Grande, por su gran tamaño no se genera ninguna repercusión que sea significativa, ya que no es una zona de escasez hídrica y las dimensiones de la cuenca abastecedora son notoriamente superiores. Por consiguiente, el consumo hídrico del Campus Robledo no genera afectación a la cuenca de abastecimiento.

Figura 6-11: Escasez de agua azul escenario Embalse Río Grande.



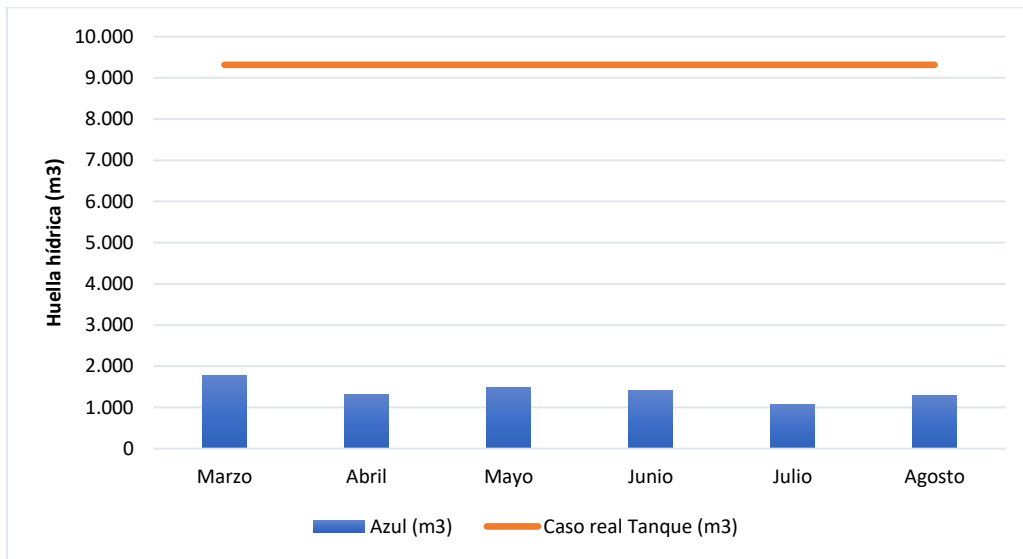
Debido a que la huella hídrica del Campus Robledo no genera ninguna repercusión de escasez ambiental en la cuenca del embalse de Río Grande, se decide analizar si a nivel del circuito de abastecimiento se genera algún impacto.

De esta manera, la EA_{azul} bajo el escenario del circuito de abastecimiento tampoco presenta un riesgo hídrico como se puede observar en la **Tabla 6-7 y Figura 6-12**. Esto se debe a que el volumen del tanque abastecedor para el circuito Palenque tiene suficiente capacidad para abastecer las necesidades del Campus Robledo sin generar escasez del recurso hídrico, teniendo en cuenta solo la capacidad total del tanque.

Tabla 6-7: Escasez de agua azul escenario circuito de abastecimiento.

Mes \ Bloque	M1	Facultad de Minas	Ingeominas	Total Campus Robledo
Marzo	0,0182	0,1721	0,0109	0,1912
Abril	0,0069	0,1236	0,0103	0,1407
Mayo	0,0098	0,1364	0,0143	0,1605
Junio	0,0085	0,1304	0,0129	0,1518
Julio	0,0038	0,0973	0,0150	0,1160
Agosto	0,0071	0,1193	0,0119	0,1383

Figura 6-12: Escasez de agua azul escenario circuito de abastecimiento.



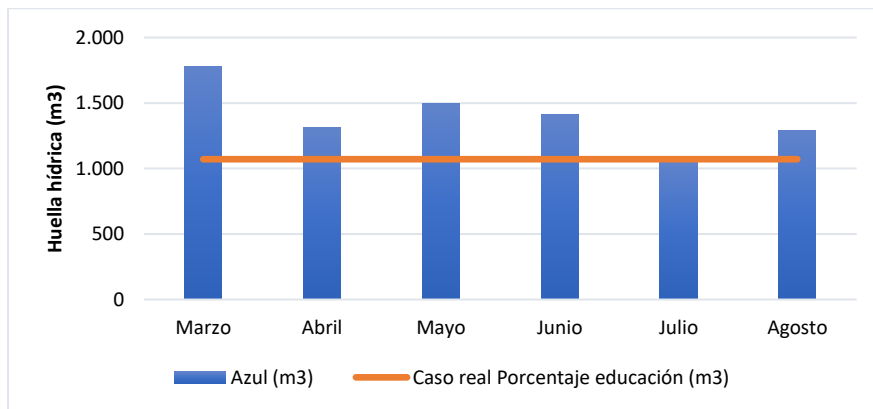
Dado que a nivel del circuito de abastecimiento el campus Robledo tampoco genera un consumo hídrico mayor al ofertado, se decide realizar el análisis con un enfoque no solo ambiental sino también social. De esta manera, se realiza un análisis teniendo en cuenta el porcentaje de consumo hídrico del tanque abastecedor para el sector académico dentro del circuito Palenque.

En consecuencia, a nivel local y de sector económico específico, en este caso académico para el Campus Robledo, se puede observar que la EA_{azul} para la facultad de minas y para el Campus universitario en general es superior a 1. Esto indica que el campus está consumiendo un mayor volumen hídrico al correspondiente a todo el sector educativo que se encuentra en la zona de cobertura del circuito de abastecimiento que es alimentado con la cuenca abastecedora (ver **Tabla 6-8 y Figura 6-13**).

Tabla 6-8: Escasez de agua azul escenario sector educativo.

Mes	M1	Facultad de Minas	Ingeominas	Total
Marzo	0,07	1,50	0,10	1,66
Abril	0,06	1,07	0,09	1,22
Mayo	0,08	1,19	0,12	1,40
Junio	0,07	1,13	0,11	1,32
Julio	0,03	0,85	0,13	1,01
Agosto	0,06	1,04	0,10	1,20

Figura 6-13: Escasez de agua azul escenario sector educativo.



No obstante, se hace la salvedad que los análisis aquí realizados son basados en la capacidad máxima del tanque abastecedor, ya que para conocer las verdaderas condiciones de disponibilidad de agua, sería necesario conocer a fondo los modelos hidráulicos del sistema de acueducto de la zona, y dicha información es de uso privado y no abierta al público general.

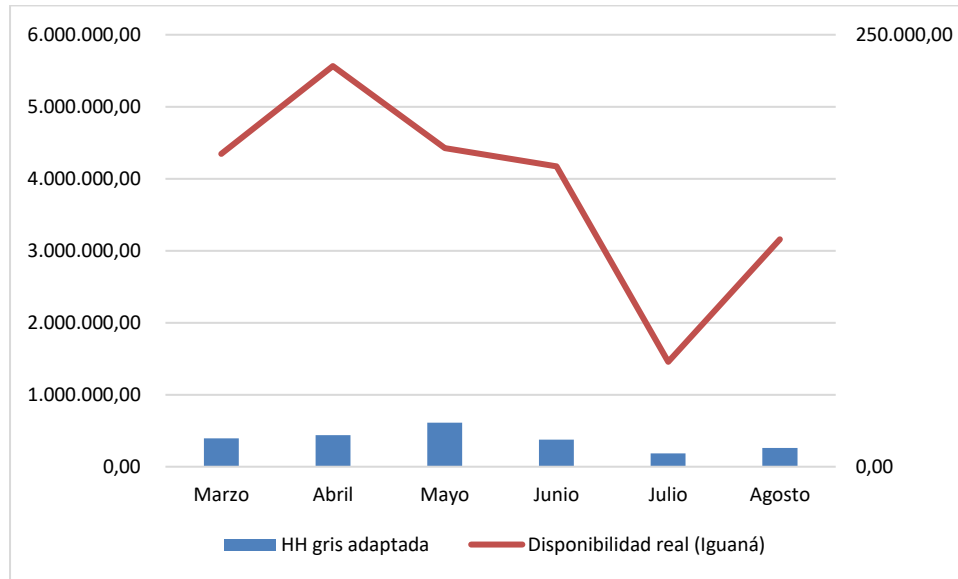
Por otra parte, el escenario hipotético propuesto para el Campus Robledo es asumir que realiza el consumo hídrico directamente de la quebrada la Iguaná. Este escenario se desarrolló para ver cómo responde el EA_{azul} a una cuenca hidrográfica más joven, menos estable y con un caudal menor. Sin embargo, el consumo hídrico en el Campus Robledo es muy bajo, y por consiguiente la zona de estudio no presenta riesgo hídrico (ver **Tabla 6-9** y **Figura 6-14**).

Por otro lado, este escenario en una zona de riesgo hídrico podría dar información importante para establecer las estrategias de reducción del índice de sostenibilidad para evitar, prevenir o reducir una posible afectación en la disponibilidad hídrica de la cuenca si el consumo se realiza en esta cuenca de análisis.

Tabla 6-9: Escasez de agua azul escenario Quebrada la Iguaná.

Mes	M1	Facultad de Minas	Ingeominas	Total
Marzo	1,75E-05	3,70 E-04	2,35E-05	4,10E-04
Abril	1,15E-05	2,07 E-04	1,73E-05	2,36E-04
Mayo	2,056E-05	2,87 E-04	3,00E-05	3,38E-04
Junio	1,89E-05	2,91 E-04	2,88E-05	3,39E-04
Julio	2,40E-05	6,22 E-04	9,61E-05	7,42E-04
Agosto	2,09E-05	3,52 E-04	3,51E-05	4,08E-04

Figura 6-14: Escasez de agua azul escenario Quebrada la Iguaná.



6.2.2 Sostenibilidad ambiental de la huella hídrica gris

El nivel de contaminación del agua (NCA) para el caso de estudio Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín evalúa el impacto de degradación hídrica sobre el ecosistema de la cuenca receptora en este caso el Río Medellín.

En la **Tabla 6-10** se calcula el NCA para la metodología WFA y su adaptación para campus universitario. De esta manera, se puede observar que la fuente hídrica receptora es tan estable y el caudal tan grande que los vertimientos realizados no representan ningún riesgo de degradación en ningún momento del año bajo ninguna de las dos metodologías aplicadas.

Tabla 6-10: NCA escenario Río Medellín para la metodología WFA y su adaptación.

Índice de Sostenibilidad de la HH gris (metodología adaptada)				
Mes \ Bloque	M1	Facultad de Minas	Ingeominas	Total Campus Robledo
Marzo	3,51E-05	3,40E-04	2,77E-05	4,00 E-04
Abril	2,06E-05	2,60E-04	9,54E-06	2,90 E-04
Mayo	2,50E-05	4,70E-04	8,80E-06	5,10 E-04
Junio	2,17E-05	2,20E-04	4,06E-06	2,50 E-04
Julio	5,93E-06	1,20E-04	2,03E-05	1,50 E-04
Agosto	1,88E-05	1,20E-04	1,11E-05	1,50 E-04

Índice de Sostenibilidad de la HH gris (metodología WFA)				
Mes \ Bloque	M1	Facultad de Minas	Ingeominas	Total Campus Robledo
Marzo	3,81E-06	4,23E-05	6,77E-06	5,29E-05
Abril	2,22E-06	2,93E-05	9,39E-07	3,25E-05
Mayo	2,32E-06	2,74E-05	4,80E-07	3,02E-05
Junio	1,88E-06	2,17E-05	3,54E-07	2,39E-05
Julio	7,34E-07	1,88E-05	1,41E-06	2,09E-05
Agosto	1,40E-06	7,71E-06	7,24E-07	9,84E-06

Por otra parte, se establece el escenario hipotético de vertimiento en la quebrada la Iguaná que es más pequeña, joven e inestable que el Río Medellín. Sin embargo, el caudal es abundante y el vertimiento supuesto a ser realizado no causaría daños por degradación en la calidad del agua bajo ninguna de las dos metodologías aplicadas (ver **Tabla 6-11**).

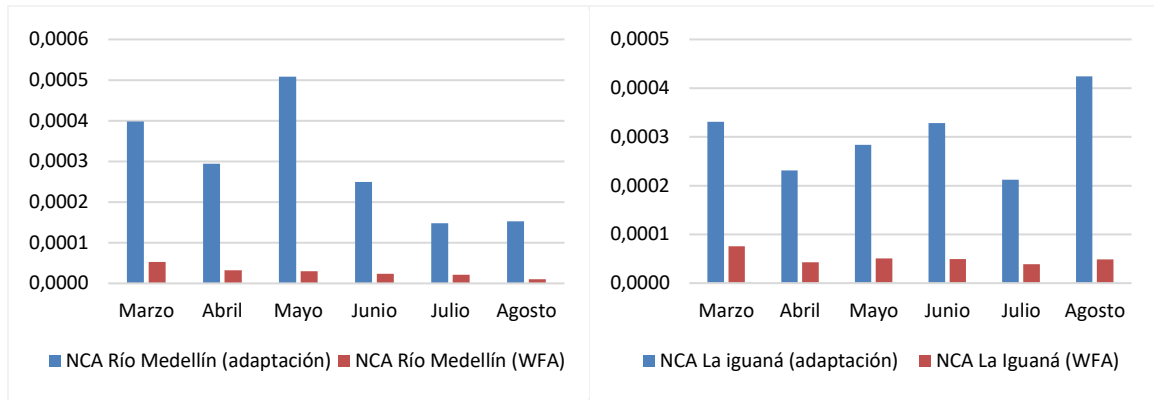
Tabla 6-11: NCA Quebrada la Iguaná para la metodología WFA y su adaptación.

Escenario hipotético				
Mes \ Bloque	M1	Facultad de Minas	Ingeominas	Total Campus Robledo
Marzo	0,00033	0,00033	0,00033	0,00033
Abril	0,00023	0,00023	0,00023	0,00023
Mayo	0,00028	0,00028	0,00028	0,00028
Junio	0,00033	0,00033	0,00033	0,00033
Julio	0,00021	0,00021	0,00021	0,00021
Agosto	0,00042	0,00042	0,00042	0,00042
Índice de Sostenibilidad de la HH gris (metodología WFA)				
Mes \ Bloque	M1	Facultad de Minas	Ingeominas	Total Campus Robledo
Marzo	7,57267E-05	7,57267E-05	7,57267E-05	7,5727E-05
Abril	4,25935E-05	4,25935E-05	4,25935E-05	4,2594E-05
Mayo	5,06205E-05	5,06205E-05	5,06205E-05	5,0621E-05
Junio	4,92385E-05	4,92385E-05	4,92385E-05	4,9238E-05
Julio	3,88219E-05	3,88219E-05	3,88219E-05	3,8822E-05
Agosto	4,8383E-05	4,8383E-05	4,8383E-05	4,8383E-05

Finalmente, se decide corroborar la diferencia entre la ecuación para el cálculo del NCA por medio de la metodología WFA y su versión adaptada para ser aplicada en campus universitarios que incluye en el cálculo el caudal ecológico. Es así como se observa en la **Figura 6-15** que la metodología adaptada al considerar un factor ecológico reduce la disponibilidad para el uso del recurso hídrico para actividades humanas. De esta manera,

aplicar la adaptación metodológica respecto a la WFA reducir la presión sobre el ecosistema.

Figura 6-15: Comparación del NCA para la metodología WFA y su adaptación.



En el caso de estudio presentado para el Campus Robledo se ve la importancia no solo de calcular el EA_{azul} y el NCA, sino también de evaluar correctamente los límites a los cuales se quiere llegar para obtener un resultado de mayor relevancia, a partir del cual se puedan desarrollar estrategias de mejora. De esta manera una de las partes más importantes a desarrollar y a tener en cuenta son los límites de referencia que se van a tener en cuenta para calcular el índice de sostenibilidad.

A pesar de no generar estrés hídrico significativo o una contaminación realmente perjudicial al ecosistema acuático en los casos estudiados para el Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia, es importante siempre generar estrategias de respuesta para reducir las huellas hídricas y por lo tanto los índices de sostenibilidad. Siendo este un caso de ejemplo que por medio de los diferentes escenarios permite comprender su aplicación y futuro uso en zonas que si presenten estrés o degradación hídrica.

6.3 Huella hídrica de otras universidades

Para comprender los resultados obtenidos de la huella hídrica para el Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, se decide comparar sus resultados con los obtenidos por otras universidades y campus universitarios. De esta manera, en la **Tabla 6-12**, se recopila la información de los resultados de las huellas hídricas calculadas para múltiples universidades incluyendo el estudio aquí realizado.

De este modo, siete de los 16 estudios, es decir el 44%, calcularon la huella hídrica por consumo de alimentos, combustible, papel y otros, mediante encuestas o datos asociados al consumo, por lo cual no calcularon de manera específica ninguna de las huellas hídricas, ni aplicaron ecuaciones evidenciadas en los estudios (Arboleda Tabares et al., 2022; D. M. Chen et al., 2016; Hatjiathanassiadou et al., 2019; Kilian et al., 2021; Mu et al., 2021; Okutan & Akkoyunlu, 2021).

Bajo estas circunstancias, a partir de la **Tabla 6-12**, se puede observar que las huellas hídricas indirectas más aplicadas corresponden a las establecidas por la adaptación metodológica que fueron las de energía eléctrica, energía de combustible fósil y papel con un total de 11 estudios que aplicaron por lo menos una de estas huellas hídricas indirectas, es decir el 69% de los estudios analizados (Arboleda Tabares et al., 2022; Castillo Valencia, 2016; Chavarría-Solera et al., 2020a; Gu et al., 2018; Kandananond, 2019b; Natyzak et al., 2017; Okutan & Akkoyunlu, 2021; Ortiz Sarango, 2018; Vaidya et al., 2021).

Por otra parte, la huella hídrica asociada a los menús servidos en las cafeterías también es muy estudiado, esto se debe al gran interés por el impacto causado al medio ambiente de la producción alimenticia, es así que el 69% de los estudios realizaron el cálculo de esta huella hídrica (Arboleda Tabares et al., 2022; Castillo Valencia, 2016; D. M. Chen et al., 2016; Hatjiathanassiadou et al., 2019; Kilian et al., 2021; Mu et al., 2021; Natyzak et al., 2017; Okutan & Akkoyunlu, 2021; Vaidya et al., 2021). Sin embargo, en muchas ocasiones, este servicio no lo presta la universidad sino un tercero, por consiguiente la huella hídrica asociada no se calcularía.

De esta manera, la mayoría de los estudios no realizó el cálculo de la huella hídrica gris, tan solo en tres estudios realizaron el cálculo. En dos de ellos se estableció que la huella

hídrica gris era el factor más aportante (Castillo Valencia, 2016; Condezo, 2019), mientras que el otro estudio (Ortiz Sarango, 2018) consideró que la huella hídrica indirecta por consumo de papel fue la más significativa.

Por otra parte, la huella hídrica azul fue la más calculada de las huellas hídricas directas para las universidades con un porcentaje de aplicación en los estudios del 50%, mientras que el de la huella hídrica verde fue de 19% y de la gris fue de 25%.

De los siete estudios que realizaron el cálculo de la huella hídrica indirecta y la huella hídrica azul (Castillo Valencia, 2016; Chavarría-Solera et al., 2020b; Gu et al., 2019; Natyzak et al., 2017; Ortiz Sarango, 2018; Vaidya et al., 2021) incluyendo el presente estudio, se pudo observar la huella hídrica indirecta era superior en todos ellos, excepto para el Campus Robledo, donde la huella hídrica azul era superior a la huella hídrica indirecta.

Esto se puede deber a tres factores, el primero para el Campus Robledo no se realizó el cálculo de la huella hídrica por consumo de alimentos, ya que un servicio tercerizado al interior de la universidad. El segundo, puede estar asociado a que para el Campus Robledo no se realizó el cálculo de la huella hídrica por consumo de combustible fósil debido a que los buses que movilizan a los estudiantes entre los tres campus urbanos de la sede Medellín de la Universidad Nacional, por consiguiente, esta huella se debe calcular a nivel de sede y no de campus. Finalmente, el tercer factor se puede deber a que el Campus Robledo redujo significativamente sus consumos de papel antes y después de la pandemia por COVID 19.

Así mismo, la EA azul y el NCA fue calculado solo por dos universidades incluyendo el presente estudio y el estudio de (Castillo Valencia, 2016), esto es un punto de partida para que en futuros estudios se calcule y se pueda comparar en la región. Así mismo, obtener un análisis que de un resultado más allá del consumo o un proceso de contaminación, sino evidenciando el límite que el sistema hídrico puede soportar.

Sin embargo y a pesar de todos los análisis realizados, no es posible comparar los resultados de las huellas hídricas de manera directa. Esto se debe a diferentes factores, primero la escala temporal de todos los estudios no es la misma, por consiguiente y para

obtener una comparación adecuada se debe garantizar para todos los estudios realizados que los cálculos correspondan a un año calendario. Por otra parte, las huellas hídricas calculadas para cada campus universitario se realizaron a conveniencia y no bajo una metodología específica y unificada para todos los campus universitarios; por esta razón, para poder obtener un resultado más comparable entre los diferentes campus universitarios se debe aplicar la metodología adaptada específicamente para el cálculo de la huella hídrica para campus universitario. Adicionalmente, se debe considerar las dimensiones espaciales del campus, los servicios complementarios que ofrecen y la población universitaria permanente y flotante con la que cuenta.

Para lograr que los resultados obtenidos sean comparables entre las instituciones educativas se debe considerar diferentes aspectos, entre ellos llevar la huella hídrica por número poblacional, es decir dividir la huella hídrica entre la población de estudiantes, trabajadores y las personas ocasionales que realicen actividades al interior del campus universitario. Adicionalmente, si en la universidad se realizan actividades complementarias que puedan representar un alto impacto hídrico como prestar servicios médicos u hospitalarios se recomienda calcularlos como una huella hídrica indirecta fuera del cálculo general para ser comparada solo con instituciones que también tengan estos servicios. Esto permite garantizar que los cálculos realizados sean equitativos entre las instituciones considerando los mismos factores.

Tabla 6-12: Comparación de la huella hídrica calculada en campus universitario.

Campus	País	Año de estudio	HH azul m ³	HH verde m ³	HH gris m ³	HH indirecta (temas)	HH indirecta (valor) m ³	Sostenibilidad de la huella hídrica	Consideraciones	Referencias
Robledo de la sede Medellín Universidad Nacional de Colombia	Colombia	2022	8.370	25.241,12	94.661,76	Energía eléctrica y papel	7.094,51	EA azul y NCA.	Semestral	Estudio actual
Pontificia Universidad Católica del Perú	Perú	2014	40.635	267,79	12'283.826,70	Energía, papel, alimento	2'104.934,79	EA azul y NCA	Solo usa DBO Anual	(Castillo, 2016)
instalaciones administrativas de la Universidad Continental	Perú	2018	3.795,80	N/A	15.183,20	N/A	N/A	N/A	Asume que el vertimiento es la huella hídrica gris Semestral	(Condezo, 2019)
Universidad Politécnica Salesiana Campus Sur	Ecuador	2016	2.302,2	5.676,48	23.382,82	Energía eléctrica y papel	11'312.667,82	N/A	Calcula la HH azul multiplicando el consumo por el 20% Calcula la HH verde por riego Anual	(Ortiz Sarango, 2018)
Universidad Santiago de Cali (USC)	Colombia	2019	N/A	N/A	N/A	Energía, papel, alimento	N/A	N/A	Uso de encuestas para el cálculo de la	(Arboleda Tabares et al., 2022)

									huella hídrica por persona Semestral	
Universidad Nacional en Costa Rica	Costa Rica	2012-2016	240.403	N/A	N/A	Energía eléctrica, fósil y papel	663.470,4	N/A	Promedio anual	(Chavarría-Solera et al., 2020a)
Universidad pública federal brasileña	Brasil	2013	N/A	N/A	N/A	Alimento	N/A	N/A	huella hídrica por persona Semestral	-(Strasburg & Jahno, 2017)
Universidad Federal de Rio Grande do Norte (UFRN)	Brasil	2018	N/A	N/A	N/A	Alimento	N/A	N/A	huella hídrica por persona Semestral	Hatjiathanassiadou et al., 2019)
Federal University of the Southern Frontier (UFFS) y; Federal University of Technology – Paraná (UTFPR)	Brasil	2019	N/A	N/A	N/A	Alimento	N/A	N/A	huella hídrica por persona Semestral	(Kilian et al., 2021)-
Universidad McGill en Montreal	Canada	2013	N/A	N/A	N/A	Alimento	N/A	N/A	huella hídrica por persona Semestral	(D. M. Chen et al., 2016)
Universidad de Virginia (UVA)	Estados Unidos	2014	1,7 millones	N/A	N/A	alimentos, combustible, papel, animales de investigación y compras hospitalarias	15,2 millones	N/A	Cálculo anual Por medio de encuestas	(Natzak et al., 2017)-

Universidad Valaya Alonkon Rajabhat	Tailandia	2018	N/A	N/A	N/A	Energía eléctrica y fósil	17.555,16	N/A	Semestral	(Kandananond, 2019b)
Universidad de Keele	Reino Unido	2015-2016	13.046	N/A	N/A	Energía y alimentos	519.369	N/A	Cálculo anual	-(Gu et al., 2019)
Universidad de Kathmandú	Nepal	2019-2020	63.432,22	N/A	N/A	Energía, combustible y Alimentación	564.943,24	N/A	Cálculo anual	(Vaidya et al., 2021)-
Universidad de Boğaziçi	Turquía	2018-2019	N/A	N/A	N/A	Energía, combustible y Alimentación	N/A	N/A	huella hídrica por persona anual	(Okutan & Akkoyunlu, 2021)
tres universidades de la provincia de Shaanxi	China	2018	N/A	N/A	N/A	alimento, compras, ropa y pape	N/A	N/A	huella hídrica por persona anual	(Mu et al., 2021)-

6.4 Estrategias de gestión hídrica

Los análisis de sostenibilidad de la huella hídrica para el Campus Robledo no evidenciaron que se estuviera ejerciendo presión sobre el recurso hídrico desde la cuenca abastecedora o hacia la fuente hídrica receptora del vertimiento. Por esta razón, el enfoque de la gestión del recurso hídrico no se realizará para un punto crítico, sino que deberá ir enfocado en la reducción del consumo hídrico total.

De esta manera, los resultados obtenidos para el Campus Robledo en el cálculo de la huella hídrica total evidencian que la huella hídrica directa es la que mayor aporte genera, ya que corresponde al 94% de la huella hídrica total. Es por ello, que las acciones de gestión de la huella hídrica deberán ir enfocadas en la reducción de la huella hídrica gris que dentro de la huella hídrica directa genera el 74% del total de la huella. Siendo así esta huella el factor crítico a controlar para reducir la huella hídrica total.

Es así como para reducir la huella hídrica gris del Campus Robledo se propone primero conocer el valor de la concentración de la descarga final desde la PTAR Aguas Claras. Y segundo, dentro de la universidad se propone realizar tratamiento de aguas a los vertimientos realizados principalmente por parte de los laboratorios antes de realizar la descarga y así minimizar el impacto en las fuentes hídricas.

Adicionalmente se establecen estrategias de gestión básicas para otras de las huellas hídricas calculadas como respuesta a los resultados obtenidos para la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Por lo cual, para el Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia las estrategias de reducción de la huella hídrica azul deberían estar enfocadas en la actualización y cambio de los equipos de descarga hídrica de alto consumo con los lavamanos, sanitarios y la grifería por aquellos que presenten mayor eficiencia junto con una actualización de los equipos del laboratorio de hidráulica. Así mismo, el recurso hídrico que no haya sido contaminado como el agua proveniente del laboratorio de hidráulica puede ser reutilizado en otros procesos o para riego de las plantas; también, dicha agua puede tener un proceso de recirculación para la descarga de unidades sanitarias.

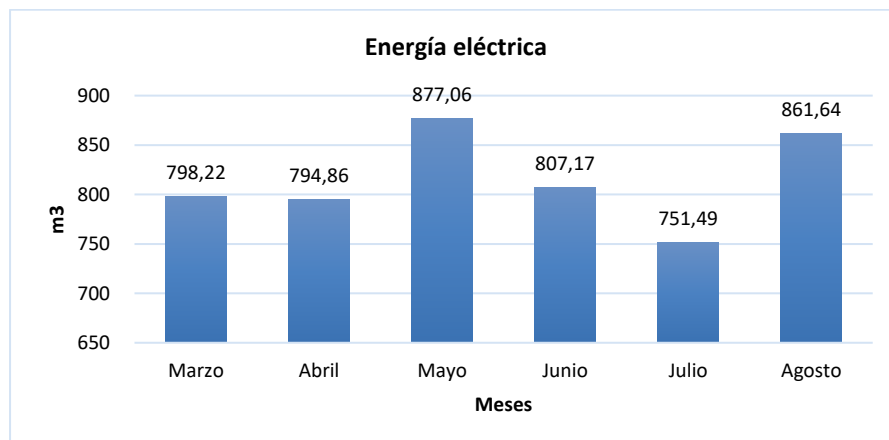
Adicionalmente, para garantizar que la huella hídrica azul y gris sea lo más precisa posible, se recomienda apropiar medidores hídricos en los bloques que consideren más relevantes en cuanto a consumo y contaminación hídrica, de esta manera se evitan sesgos por cálculos adicionales.

Por otro lado, para la huella hídrica verde no se plantean estrategias de gestión, ya que las zonas verdes prestan servicios ecosistémicos y de confort humano más allá de lo que se puede evaluar por medio del consumo hídrico, por consiguiente, no se establecen medidas de reducción. Sin embargo, de ser necesario en épocas de sequía se pueden implementar estrategias de riego inteligente para evitar el desperdicio y consumo excesivo del recurso hídrico.

Para la huella hídrica indirecta se reconoce que el consumo de energía eléctrica genero el 69% de la huella hídrica indirecta. De esta manera, las estrategias de gestión para el Campus Robledo asociadas a la huella hídrica indirecta serán enfocadas en la energía eléctrica.

Dado que la energía eléctrica responde a la temporada académica como se observa en la **Figura 6-16**. Las estrategias de gestión deben estar enfocadas en comprender el funcionamiento interno de todas las instalaciones al interior del Campus Robledo, de cada edificio y de cada laboratorio, ya que los consumos pueden estar relacionados con equipos de consumo elevado debido al uso excesivo, mal uso, obsolescencia del equipo, entre otras situaciones que deben ser diagnosticadas con mayor profundidad y especificidad.

Figura 6-16: Energía eléctrica mensual.



En este sentido, se propone que se realicen campañas de concientización al interior de la universidad para realizar un consumo hídrico más consciente por parte de toda la comunidad universitaria que incluye a los estudiantes, docentes, administrativos, personal de servicios y visitantes ocasionales. Estas estrategias deben realizarse con enfoque hacia la sostenibilidad del campus.

Si bien existen nuevas estrategias con mayor especificidad y acompañadas de la implementación de nuevas tecnologías, no se detallan aquí debido a que las medidas recomendadas se dan de manera genérica dándole la posibilidad al ente gestor de tomar las decisiones que consideren más pertinentes, sin que las acciones a ejecutar aquí recomendadas sean una camisa de fuerza. Por lo cual, se detallan los resultados permitiendo identificar los puntos clave donde se debe tomar acción y que el ente gestor establezca la toma de decisiones.

Finalmente, se recomienda implementar mecanismos o sistemas de medición continua y anual que permitan calcular la huella hídrica, estableciendo metas internas de mejora continua para fortalecer el enfoque de sostenibilidad presente en el campus universitario.

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

La huella hídrica es un indicador de consumo y contaminación hídrica de gran importancia para la gestión del recurso hídrico que puede ser calculado por medio de diferentes métodos. Sin embargo, las metodologías reconocidas a nivel internacional para realizar el análisis de la huella hídrica de manera integral son la Evaluación de la Huella Hídrica (WFA) y la norma técnica ISO-14046:2014, "Gestión ambiental – Huella hídrica – Principios, requisitos y directrices. Si bien ambas metodologías pueden ser ampliamente aplicadas, para establecer la adaptación metodológica se escogió la metodología WFA, ya que representa mejor el uso y la degradación hídrica generada por un campus universitario como una evaluación de un grupo de consumidores.

Luego de establecer el marco teórico, se realizó una búsqueda de literatura en Science Direct, Springer Link y Scopus de los estudios que calcularon la huella hídrica para diferentes sectores económicos y para campus universitarios. De esta búsqueda bibliográfica se obtuvieron 51 artículos asociados al cálculo de la huella hídrica en diferentes sectores económicos y 12 artículos de investigación del cálculo de la huella hídrica específicos para los campus universitarios.

Los resultados obtenidos de los análisis bibliográficos de la huella hídrica calculada para diferentes sectores económicos muestran que, el año donde se realizó el mayor número de publicaciones fue el 2019 y que la base de datos que más publicaciones realizó fue Science Direct. Así mismo, el continente que más publicaciones relacionadas desarrolló fue Asia con el 43% de las publicaciones realizadas y el país que más desarrollos generó fue China con 8 publicaciones. Por otra parte, se estableció que el sector agrícola y pecuario fueron los más importantes dentro de estas investigaciones, con un 29% y un

20% del total de los estudios realizados para diferentes sectores económicos siendo el trigo, el maíz y la producción animal los temas específicos de mayor interés.

De acuerdo con esto, la huella hídrica directa azul fue la más calculada, seguida por la huella hídrica directa gris, verde y finalmente la huella hídrica indirecta por consumo de alimentos. De esta manera, el único sector económico que no realizó variaciones a las ecuaciones de la metodología de la WFA fue el sector agrario, siendo la huella hídrica verde la única ecuación constante en las publicaciones. Por otra parte, el cálculo de la huella hídrica azul presentó variaciones en las variables calculadas, pero siempre se mantuvo el balance hídrico realizado para el cálculo. Mientras que para la huella hídrica gris se modificó la ecuación intercambiando algunas variables para satisfacer las necesidades de cada artículo de investigación específico.

En correspondencia con lo anterior, las publicaciones que aplicaron la huella hídrica en campus universitario fueron desarrolladas principalmente en el año 2019 y 2021 con cuatro publicaciones en cada uno. En contraste con la otra búsqueda de literatura, Science Direct y Scopus realizaron la misma cantidad de publicaciones, con 5 cada uno. Por otra parte, el continente americano realizó el 50% de las publicaciones en el sector de campus universitario y así el 42%, evidenciando el interés latente en estos dos continentes por realizar desarrollos en el campo de la huella hídrica. Así mismo el país que más publicaciones realizó fue Brasil con 3 seguido por Tailandia con 2 publicaciones realizadas.

En este sentido, y a diferencia de la búsqueda para diferentes sectores económicos, la huella hídrica indirecta fue la más calculada para el sector de campus universitarios. Donde los temas de interés fueron los alimentos, el consumo de energía eléctrica, el consumo de energía fósil y el consumo de papel. Si bien, la mayoría de los estudios que realizaron el cálculo de la huella hídrica para campus universitarios no presentaron ecuaciones, los análisis desarrollados iban entorno a integrar a los estudiantes dentro del concepto de sostenibilidad y cambio climático para reducir sus huellas ambientales; y el producto del nexo entre la energía, la alimentación y el consumo hídrico por medio de la huella de uso de suelo, huella de carbono, huella energética y la huella hídrica.

Si bien la huella hídrica establecida por la WFN es una herramienta muy útil para determinar el uso, consumo y degradación de las fuentes hídricas de agua dulce, es una

metodología muy general y no presenta una metodología de cálculo específica para el sector académico por consiguiente establecieron adaptaciones.

A partir del estudio bibliográfico, la metodología WFA y la metodología para América Latina, se establecieron las adaptaciones metodológicas para aplicar la WFA en los campus universitarios de manera integral y homogénea. Es así como, la adaptación metodológica es coherente con la metodología WFA, y los artículos de investigación analizados tanto para diversos sectores económicos como para campus universitarios. Adicionalmente, presenta alternativas para la recolección de la información requerida para los cálculos y se adapta a las condiciones reales en los campus universitarios.

De esta manera, se presentaron las consideraciones a tener en cuenta para realizar la adaptación metodológica del cálculo de huella hídrica para campus universitario, donde para la huella hídrica azul se establecieron múltiples opciones de cálculo a partir de datos primarios y secundarios. Para la huella hídrica verde se recomienda utilizar CROPWAT siempre y cuando se tenga acceso a la mayor parte de los datos requeridos, en caso contrario se presentan alternativas de cálculo por medio de datos secundarios. Estas alternativas son herramientas útiles para desarrollar el cálculo de la huella hídrica verde, el cual debe ejecutar en todos los casos de estudio, sin importar el caso de estudio en curso.

La huella hídrica gris puede ser, dentro de la huella hídrica directa, la que más cambios presenta, ya que se sugiere realizar el cálculo teniendo en cuenta todos los parámetros fisicoquímicos establecidos y no solo uno. A la ecuación se añade un condicional al denominador, para tener siempre en cuenta la degradación hídrica generada y se considera la concentración real en la fuente receptora y no la concentración natural.

El cálculo de la sostenibilidad de la huella hídrica azul y gris se debe considerar cual va a ser el límite a tener en cuenta si es a escala de cuenca abastecedora o fuente hídrica abastecedora más cercana (microcuenca, tanque de abastecimiento, sector económico u otros). Adicionalmente se modificó la ecuación para el cálculo de NCA, teniendo en cuenta la importancia del caudal ecológico cambiando el denominador de la ecuación, donde antes solo se consideraba el caudal total ahora se tiene en cuenta la oferta hídrica real.

Al aplicar la adaptación metodológica de la WFA para campus universitario en el Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, se encontró que la huella hídrica gris es la que mayor representación tiene en la huella hídrica directa con un porcentaje del 74% por lo que las estrategias de mejora a ejecutar deben estar enfocadas en reducir las fuentes de contaminación y neutralizar los vertimientos antes de realizar las descargas. A su vez, la huella hídrica directa representa el 94% de la huella hídrica total. Lo que implica que la huella hídrica gris representa el mayor reto, ya que al reducir esta huella hídrica, se logrará reducir considerablemente toda la huella hídrica del campus universitario.

La huella hídrica verde a pesar de ser representativa dentro de los cálculos realizados permite comprender las necesidades hídricas de las zonas verdes del campus Robledo y no deben ser eliminadas, ya que los servicios ecosistémicos que prestan son de gran relevancia e importancia.

En cuanto a la sostenibilidad de la huella hídrica tanto azul como gris se concluye que es de gran importancia determinar los límites de estudio que van a ser evaluados para aplicar estos conceptos, ya que de esto depende si se genera o no una afectación al recurso hídrico. Para el Campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín se decidió calcular bajo todos los escenarios propuestos con la intención de que las áreas involucradas de la universidad para las cuales este resultado es relevante tomen decisiones pertinentes según los objetivos que ellos tengan establecidos.

Por otra parte, se pueden ver las diferencias existentes entre la metodología WFA y su adaptación para campus universitario al comparar la aplicación de ambas metodologías, donde se encontró que la huella hídrica azul y verde calculadas a partir de datos primarios generan el mismo resultado para ambas metodologías. Sin embargo, la metodología adaptada propone otras fuentes de información secundaria para realizar estos cálculos. Si bien en el presente estudio se generó una sobrestimación para el cálculo de la huella hídrica azul bajo estas consideraciones y para la huella hídrica verde se generó una subestimación, los cálculos realizados fueron aproximados a los datos generados por información primaria.

Respecto a la huella hídrica gris, la metodología adaptada mostro un resultado mayor al generado por medio de la metodología WFA, lo cual se debe a que por medio de la WFA se realiza una subestimación de la huella hídrica generada porque considera condiciones idóneas en la fuente receptora, lo cual no se asemeja a la realidad actual.

Por su parte, existe una gran diferencia entre las universidades donde se realizó el cálculo de la huella hídrica y el estudio realizado para el campus Robledo de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Esta radica en que la huella hídrica más alta en la mayoría de las otras universidades es la huella hídrica indirecta. Sin embargo, estas universidades no calculaban la huella hídrica gris y por consiguiente no se puede comparar la huella hídrica obtenida por medio de la metodología adaptada con los resultados de otros campus universitarios, ya que no se realizaron bajo las mismas consideraciones. Para que los resultados sean comparables se deben calcular bajo las mismas condiciones y considerar comparar los resultados de la huella hídrica por persona dentro del campus universitario, para reducir la brecha dada por las diferentes dimensiones de los campus universitarios.

Es importante comprender que cada caso de aplicación es diferente y debe tener condiciones específicas. Sin embargo, las adaptaciones aquí planteadas permiten tener unas bases sólidas para su aplicación futura en otras instituciones educativas y así poder llegar a comparar los resultados obtenidos entre las universidades donde se aplique la metodología.

Finalmente se concluye que la adaptación metodológica realizada para el cálculo de la huella hídrica y la sostenibilidad de la huella hídrica es una herramienta que permite establecer y realizar una gestión adecuada para el uso eficiente del recurso hídrico. De esta manera, la adaptación metodológica de la WFA y su aplicación en campus universitarios representa una oportunidad valiosa para fomentar la sostenibilidad y reducir el impacto ambiental y social del uso del recurso hídrico. Con este estudio, se busca contribuir a la generación de estrategias que permitan un uso más responsable y eficiente del agua en el ámbito universitario. Así mismo, es importante aclarar que las estrategias de gestión hídrica más adecuadas para el caso de estudio a partir de los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología adaptada serán tomadas por el ente gestor a

partir de las recomendaciones realizadas. De esta manera, para otros casos de aplicación dependerá de cada análisis y cálculo particular, todas las estrategias responden a necesidades y tomadores de decisión diferentes y por consiguiente solo se pueden dar recomendaciones aplicables. Todo esto debe estar alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los esfuerzos globales para mitigar los efectos del cambio climático.

Asimismo, se espera sentar las bases para futuras investigaciones que exploren y promuevan prácticas sostenibles en otros ámbitos y sectores, fortaleciendo así la construcción de un futuro más próspero y equitativo para las generaciones presentes y futuras.

7.2 Recomendaciones

Para futuras investigaciones realizadas en la sede Medellín de la Universidad Nacional de Colombia, se recomienda realizar la investigación a nivel de toda la sede para que los cálculos obtenidos sean comparables con los datos existentes de otras universidades y evitar las subestimaciones o sobrestimaciones que se puedan generar con los cálculos realizados.

Así mismo, se recomienda apropiar medidores hídricos en los bloques que consideren más relevantes en cuanto a consumo y contaminación hídrica. Esto con la intención de poder calcular con mayor detalle los puntos de interés.

En este sentido se pueden tener en cuenta un mayor número de parámetros para calcular la huella hídrica gris junto con otras huellas hídricas indirectas que puedan ser relevantes para el campus universitario y no hayan sido contemplados como la huella hídrica por consumo de combustible fósil.

En cuanto a la aplicación de la metodología adaptada se recomienda generar más estudios y aplicaciones que permitan afianzar las adaptaciones realizadas o corregirlas de ser necesario. Ya que su efectividad solo podrá ser corroborada al realizar múltiples aplicaciones de la misma en diferentes campus universitarios sometidos a condiciones completamente diferentes y posteriormente comparar los resultados obtenidos. De esta

manera, los futuros desarrollos en campus universitarios deben ir enfocados a homogenizar un mismo método adaptado para la aplicación integral de la huella hídrica.

En este sentido, los puntos principales a tener en cuenta deben estar en el cálculo de la huella hídrica gris y los indicadores de sostenibilidad de la huella hídrica tanto para la escasez de agua azul como para el nivel de contaminación del agua. Orientando con mayor precisión los límites que se deben considerar en el momento de evaluar la sostenibilidad. Esto permitirá comparar los resultados obtenidos entre las diferentes universidades que apliquen la metodología adaptada.

Si bien el desarrollo presentado en este documento investigativo permitió un gran avance en el campo, aún quedan varios vacíos e inquietudes que deben ser atendidas enfocados en estandarizar la metodología para el cálculo de la huella hídrica y la sostenibilidad de la huella hídrica para otros sectores económicos para establecer y garantizar la trazabilidad, aplicabilidad y comparación de los resultados obtenidos evitando sesgos, subestimaciones o sobrestimaciones.

Así mismo, los enfoques aquí presentados de los diferentes escenarios para el cálculo de la sostenibilidad de la huella hídrica evidencian la necesidad de tener un mayor desarrollo en esta fase tan importante de la evaluación de la huella hídrica teniendo la posibilidad de establecer de manera adecuada los impactos generados en el recurso hídrico.

Bibliografía

- Al-Bahouh, M., Osborne, V., Wright, T., Dixon, M., Zaag, A. Vander, & Gordon, R. (2021). Blue water footprints of ontario dairy farms. *Water (Switzerland)*, 13(16), 1–10. <https://doi.org/10.3390/w13162230>
- Al-Muaini, A., Sallam, O. M., Green, S., Kennedy, L., Kemp, P., & Clothier, B. (2019). The blue and grey water footprints of date production in the saline and hyper-arid deserts of United Arab Emirates. *Irrigation Science*, 37(5), 657–667. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00642-6>
- Aleksandrowicz, L., Green, R., Joy, E. J. M., Harris, F., Hillier, J., Vetter, S. H., Smith, P., Kulkarni, B., Dangour, A. D., & Haines, A. (2019). Environmental impacts of dietary shifts in India: A modelling study using nationally-representative data. *Environment International*, 126, 207–215. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2019.02.004>
- Arboleda Tabares, D. A., Reyes Talero, J. E., Quijano Pérez, S. A., Alvear Rodríguez, C. A., Arboleda Tabares, D. A., Reyes Talero, J. E., Quijano Pérez, S. A., & Alvear Rodríguez, C. A. (2022). La Huella Hídrica como estrategia educativa para el consumo responsable del agua en la Universidad Santiago de Cali. *Estudios Pedagógicos (Valdivia)*, 48(2), 131–158. <https://doi.org/10.4067/S0718-07052022000200131>
- Bai, X., Ren, X., Khanna, N. Z., Zhang, G., Zhou, N., Bai, Y., & Hu, M. (2018). A comparative study of a full value-chain water footprint assessment using two international standards at a large-scale hog farm in China. *Journal of Cleaner Production*, 176, 557–565. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.11.248>
- Barco, J., Cuartas, A., Mesa, O., Poveda, G., Vélez, J. I., Hoyos, C., Mejía, J. F., & Botero, B. (2000). *ESTIMACIÓN DE LA EVAPORACIÓN EN COLOMBIA*. 43–51.
- Becker, L., & Gondhalekar, D. (2022). Estimating the Water and Carbon Footprints of Growing Avocados in the Munich Metropolitan Region Using Waste Heat as a Water-Energy-Food Nexus Potential. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6(April), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.857650>

- Bong, P. X. H., Malek, M. A., Mardi, N. H., & Hanafiah, M. M. (2020). Cradle-to-gate water-related impacts on production of traditional food products in Malaysia. *Sustainability (Switzerland)*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/su12135274>
- Campuzano Ochoa, C. P., González Valencia, J. E., Guzán Cabrera, A. C., Rodríguez Ortiz, C. M., Arévalo Uribe, D., Parada Puig, E., & Kuiper, D. (2015). Evaluación multisectorial de la huella hídrica en Colombia. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).
- Cantonati, M., Stevens, L. E., Segadelli, S., Springer, A. E., Goldscheider, N., Celico, F., Filippini, M., Ogata, K., & Gargini, A. (2020). Ecohydrogeology: The interdisciplinary convergence needed to improve the study and stewardship of springs and other groundwater-dependent habitats, biota, and ecosystems. *Ecological Indicators*, 110(November 2019), 105803. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105803>
- Castillo Valencia, M. (2016). *Huella Hídrica del campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú en el 2014*.
- Chang, I. C. (2020). A case study for identifying the potential challenges of water resources in the Yilan area of Taiwan: using an adaptive water footprint approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(11), 12725–12745. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07656-0>
- Chavarría-Solera, F., Gamboa-Venegas, R., Rodríguez-Flores, J., Chinchilla-González, D., Herrera-Araya, A., & Herra-Solís, A. C. (2020a). Medición de la huella hídrica azul de la Universidad Nacional en Costa Rica, del 2012 al 2016. *Uniciencia*, 34(1), 189–203. <https://doi.org/10.15359/ru.34-1.11>
- Chen, B., Qian, W., Yang, Y., Liu, H., & Wang, L. (2021). Carbon footprint and water footprint of cashmere fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 29(4), 94–99. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.8235>
- Chen, D. M., Tucker, B., Badami, M. G., Ramankutty, N., & Rhemtulla, J. M. (2016). A multi-dimensional metric for facilitating sustainable food choices in campus cafeterias. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1351–1362. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.06.143>
- Chini, C. M., Konar, M., & Stillwell, A. S. (2017). Direct and indirect urban water footprints of the United States. *Water Resources Research*, 53(1), 1–12. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1969.tb04897.x>
- Clarke, D., Smith, M., & El-Askari, K. (2000). CropWat for Windows : User guide. FAO. Roma, October, 43. <http://eprints.soton.ac.uk/73992/>

- Condezo, J. J. (2019). Huella hídrica directa en las instalaciones administrativas de la Universidad Continental - 2018. In *Repositorio Institucional Continental*. Continental.
- Corantioquia. (2022). *Piragua. Programa integral - red de agua*.
<https://geopiragua.corantioquia.gov.co/>
- Corantioquia, & Alcaldía de Medellín. (2007). *Formulación del Plan Integral de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas Altavista* (Issue 4700024033).
- Corantioquia, & Universidad Nacional de Colombia. (2017). Aunar esfuerzos para la actualización de la Huella Ecológica en la Región Central de Antioquia como aporte a la gestión de planificación y el ordenamiento ambiental. *Corantioquia, Unal*, 322.
- Corporación CuencaVerde. (2018). *CuencaVerde*.
- Cruz-Pérez, N., Rodríguez-Martín, J., García, C., Ioras, F., Christofides, N., Vieira, M., Bruccoleri, M., & Santamarta, J. C. (2021). Comparative study of the environmental footprints of marinas on European Islands. *Scientific Reports*, 11(1), 1–10.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-88896-z>
- D'Ambrosio, E., De Girolamo, A. M., & Rulli, M. C. (2018). Assessing sustainability of agriculture through water footprint analysis and in-stream monitoring activities. *Journal of Cleaner Production*, 200, 454–470.
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.07.229>
- D'Ambrosio, E., Gentile, F., & De Girolamo, A. M. (2020). Assessing the sustainability in water use at the basin scale through water footprint indicators. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118847. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.118847>
- DNP. (2018). CONPES 3918. Estrategia para la Implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia. In *Consejo Nacional de Política Económica y Social República De Colombia. Departamento Nacional De Planeación (DNP)* (pp. 1–267).
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3918.pdf>
- Empresas Públicas de Medellín. (2022). *Geoportal - Redes de Acueducto y Alcantarillado*.
<https://grupoepm.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=591f5234f4a544e38bfef36d564320e0>
- Estrada Restrepo, O. A. (2009). *Modelación acoplada de aguas superficiales y subterráneas para la gestión conjunta del recurso hídrico*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Facultad de Minas. (n.d.-a). *Nuestro campus*. <https://minas.medellin.unal.edu.co/campus->

sostenible/campus-sostenible/nuestro-campus.html

Facultad de Minas. (n.d.-b). *Programas académicos*.

<https://minas.medellin.unal.edu.co/comunicaciones/15-programas>

FAO. (n.d.). *CLIMWAT*. Fao Water Development and Management Unit.

<https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/climwat-for-cropwat/en/>

FAO. (2018). *Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar Introducción a la Evapotranspiración del Cultivo (ET c)*. <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>

Fernández, E. F., & Malwé, C. (2019). The emergence of the 'planetary boundaries' concept in international environmental law: A proposal for a framework convention. *Review of European, Comparative and International Environmental Law*, 28(1), 48–56. <https://doi.org/10.1111/reel.12256>

Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y., & van der Meer, T. H. (2008). Water footprint of bio-energy and other primary energy carriers. *Value*, 29(29), 44.

Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. Y., & Van Der Meer, T. H. (2009). The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(25), 10219–10223. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812619106>

Gjorgievski, V. Z., Markovska, N., Pukšec, T., Duić, N., & Foley, A. (2021). Supporting the 2030 agenda for sustainable development: Special issue dedicated to the conference on sustainable development of energy, water and environment systems 2019. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110920. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110920>

Grieser, G. M. and J. (2006). CLIMWAT 2.0 for CROPWAT. *Fao Water Development and Management Unit*, September.

http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html

Gu, Y., Wang, H., Robinson, Z. P., Wang, X., Wu, J., Li, X., Xu, J., & Li, F. (2018). Environmental footprint assessment of green campus from a food-water-energy nexus perspective. *Energy Procedia*, 152, 240–246. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2018.09.109>

Gu, Y., Wang, H., Xu, J., Wang, Y., Wang, X., Robinson, Z. P., Li, F., Wu, J., Tan, J., & Zhi, X. (2019). Quantification of interlinked environmental footprints on a sustainable university campus: A nexus analysis perspective. *Applied Energy*, 246, 65–76. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.04.015>

Gush, M., Dzikiti, S., van der Laan, M., Steyn, M., Manamathela, S., & Pienaar, H. (2019). Field quantification of the water footprint of an apple orchard, and extrapolation to

- watershed scale within a winter rainfall Mediterranean climate zone. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 135–147.
<https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2019.02.042>
- Haggard, E. L., Sheridan, C. M., & Harding, K. G. (2015). Quantification of water usage at a South African platinum processing plant. *Water SA*, 41(2), 279–286.
<https://doi.org/10.4314/wsa.v41i2.14>
- Harley, C. D. G., Anderson, K. M., Demes, K. W., Jorve, J. P., Kordas, R. L., Coyle, T. A., & Graham, M. H. (2012). Effects Of Climate Change On Global Seaweed Communities. *Journal of Phycology*, 48(5), 1064–1078.
<https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01224.x>
- Hatjiathanassiadou, M., de Souza, S. R. G., Nogueira, J. P., de Medeiros Oliveira, L., Strasburg, V. J., Rolim, P. M., & Seabra, L. M. A. J. (2019). Environmental impacts of university restaurant menus: A case study in Brazil. *Sustainability (Switzerland)*, 11(19), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su11195157>
- Herrero, M. S., Herrera Araújo, F., Ardila Lara, M. A., Gutiérrez Gil, E., & Herrera Téllez, D. (2018). ODS en Colombia: Los retos para el 2030. In *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo -PNUD-*.
https://www.undp.org/content/dam/colombia/docs/ODS/undp_co_PUBL_julio_ODS_en_Colombia_los_retos_para_2030_ONU.pdf
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. In *Social and Environmental Accountability Journal* (Vol. 31, Issue 2).
<https://doi.org/10.1080/0969160x.2011.593864>
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2010). The Green, Blue and Grey Water Footprint of Crops and Derived Crop Products. Volume 1 : Main Report. *Value of Water Research Report Series No. 47*, 1(16), 80. <http://wfn.project-platforms.com/Reports/Report47-WaterFootprintCrops-Vol1.pdf>
- Hosseinian, S. M., & Ghahari, S. M. (2021). The relationship between structural parameters and water footprint of residential buildings. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123562. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123562>
- Hurley, I., & Tittensor, D. P. (2020). The uptake of the biosphere integrity planetary boundary concept into national and international environmental policy. *Global Ecology and Conservation*, 22, e01029. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01029>

- Ibidhi, R., & Ben Salem, H. (2019). Water footprint assessment of sheep farming systems based on farm survey data. *Animal*, 13(2), 407–416.
<https://doi.org/10.1017/S1751731118001593>
- IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua 2014. In *Estudio Nacional del Agua 2014*.
- IDEAM. (2018). *Estudio Nacional del Agua 2018*.
http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf
- IDEAM. (2022). *Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos*.
<http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- IDEAM & UNAL. (2018). *Variabilidad Climática y el cambio climático en Colombia*.
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2022). *Datos Abiertos Cartografía y Geografía*.
<https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>
- International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14044. Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*.
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14046:2014 Environmental management — Water footprint — Principles, requirements and guidelines*.
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14046:ed-1:v1:es>
- Izquierdo, M., & Madroñero, S. (2014). Ecological flow regimen , management tool to preserve aquatic biota. *Ecol, Gimn D E Caudal Gestí, Herramienta D E Conservar, Para Biota, L A*, 77–94.
- Ji, X., Xie, D., Zhuo, L., Liu, Y., Feng, B., & Wu, P. (2022). Water Footprints, Intra-National Virtual Water Flows, and Associated Sustainability Related to Pork Production and Consumption: A Case for China. *Water Resources Research*, 58(1).
<https://doi.org/10.1029/2021WR029809>
- Kalya, E., & Alver, A. (2022). Determining the contribution of the wastewater treatment plant to the sustainable environment with water footprint indicators. *Environment, Development and Sustainability*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02600-3>
- Kandananond, K. (2019a). The application of water footprint and six-sigma method to reduce the water consumption in an organization. *International Journal of GEOMATE*, 17(61), 21–27. <https://doi.org/10.21660/2019.61.4535>
- Kandananond, K. (2019b). The Energy Related Water Footprint Accounting of A Public Organization: The Case of A Public University in Thailand. *Energy Procedia*, 156, 149–153. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2018.11.120>

- Kilian, L., Triches, R. M., & Ruiz, E. N. F. (2021). Food and sustainability at university restaurants: analysis of water footprint and consumer opinion. *Sustentabilidade Em Debate*, 12(2), 79–89. <https://doi.org/10.18472/SUSTDEB.V12N2.2021.37939>
- Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability (Switzerland)*, 7(5), 5875–5895. <https://doi.org/10.3390/su7055875>
- Lares-Michel, M., Housni, F. E., & Aguilera Cervantes, V. G. (2021). A quantitative estimation of the water footprint of the Mexican diet, corrected for washing and cooking water. *Food Security*, 13(4), 849–874. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01160-0>
- le Roux, B., van der Laan, M., Vahrmeijer, T., Annandale, J. G., & Bristow, K. L. (2016). Estimating water footprints of vegetable crops: Influence of growing season, solar radiation data and functional unit. *Water (Switzerland)*, 8(10), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w8100473>
- Leal-Echeverri, J. C., & Tobón, C. (2021). The water footprint of coffee production in Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(3), 9685–9697. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n3.91461>
- Lovarelli, D., Ingrao, C., Fiala, M., & Bacenetti, J. (2018). Beyond the Water Footprint: A new framework proposal to assess freshwater environmental impact and consumption. *Journal of Cleaner Production*, 172, 4189–4199. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.12.067>
- Machin Ferrero, L. M., Araujo, P. Z., Valdeón, D. H., Nishihara Hun, A. L., & Mele, F. D. (2022). Water footprint of lemon production in Argentina. *Science of The Total Environment*, 816, 151614. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.151614>
- MADS, Corantioquia, AMVA, CORNARE, CPA INGENIERÍA SAS, & Fondo Adaptación. (2019). *Actualización POMCA Río Aburrá. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica*. https://www.metro-pol.gov.co/ambiental/recurso-hidrico/pomca/2018/Documento_POMCA/DOCUMENTO_POMCA_dic.pdf
- Manzardo, A., Loss, A., Fialkiewicz, W., Rauch, W., & Scipioni, A. (2016). Methodological proposal to assess the water footprint accounting of direct water use at an urban level: A case study of the Municipality of Vicenza. *Ecological Indicators*, 69, 165–175. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2016.04.016>
- Manzardo, A., Mazzi, A., Loss, A., Butler, M., Williamson, A., & Scipioni, A. (2016). Lessons learned from the application of different water footprint approaches to

- compare different food packaging alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4657–4666. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.08.019>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577–1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). The blue water footprint of electricity from hydropower. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), 179–187. <https://doi.org/10.5194/hess-16-179-2012>
- Mekonnen, M. M., Neale, C. M. U., Ray, C., Erickson, G. E., & Hoekstra, A. Y. (2019). Water productivity in meat and milk production in the US from 1960 to 2016. *Environment International*, 132, 105084. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2019.105084>
- Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial. (2004). *Resolución 865 de 2004*.
- Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial. (2010). Decreto 3930 del 2010. *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*, 29. <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf-Resolución 610 de 2010 - Calidad del Aire.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 0631*.
- Ministerio de la Protección Social. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). *Resolución número 2115*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo. (2014). *Guía técnica para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico* (Issue January).
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, & Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2013). *Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren Licencia Ambiental*. 66.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2017). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS. Título "B" Sistema de acueducto*. <http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULOB 030714.pdf>
- Mohlotsane, P. M., Owusu-Sekyere, E., Jordaan, H., Barnard, J. H., & van Rensburg, L. D. (2018). Water footprint accounting along the wheat-bread value chain: Implications for sustainable and productive water use benchmarks. *Water (Switzerland)*, 10(9), 1–16. <https://doi.org/10.3390/w10091167>
- Mourad, R., Jaafar, H. H., & Dagher, N. (2019). New estimates of water footprint for animal products in fifteen countries of the Middle East and North Africa (2010–2016). *Water*

- Resources and Industry*, 22, 100113. <https://doi.org/10.1016/J.WRI.2019.100113>
- Mu, L., Liu, Y., Wang, C., Qu, X., & Yu, Y. (2021). Enhancing capacity building to climate adaptation and water conservation among Chinese young people. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(22), 27614–27628.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-12427-6>
- Muratoglu, A. (2020a). Assessment of wheat's water footprint and virtual water trade: a case study for Turkey. *Ecological Processes*, 9(1), 1–16.
<https://doi.org/10.1186/s13717-020-0217-1>
- Muratoglu, A. (2020b). Grey water footprint of agricultural production: An assessment based on nitrogen surplus and high-resolution leaching runoff fractions in Turkey. *Science of The Total Environment*, 742, 140553.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140553>
- Muratoglu, A., Iraz, E., & Ercin, E. (2022). Water resources management of large hydrological basins in semi-arid regions: Spatial and temporal variability of water footprint of the Upper Euphrates River basin. *Science of The Total Environment*, 846, 157396. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.157396>
- NASA. (2022). *ASF Data Serch Vertex*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi
- Natzak, J. L., Castner, E. A., D'Odorico, P., & Galloway, J. N. (2017). Virtual Water as a Metric for Institutional Sustainability. *Sustainability (United States)*, 10(4), 237–245.
<https://doi.org/10.1089/sus.2017.0004>
- Nezamoleslami, R., & Hosseinian, S. M. (2020). An improved water footprint model of steel production concerning virtual water of personnel: The case of Iran. *Journal of Environmental Management*, 260, 110065.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.110065>
- Noya, I., González-García, S., Berzosa, J., Baucells, F., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2018). Environmental and water sustainability of milk production in Northeast Spain. *Science of The Total Environment*, 616–617, 1317–1329.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.10.186>
- Okutan, P., & Akkoyunlu, A. (2021). Identification of water use behavior and calculation of water footprint: a case study. *Applied Water Science*, 11(7), 1–13.
<https://doi.org/10.1007/s13201-021-01459-5>
- Oliver, T. H., & Morecroft, M. D. (2014). Interactions between climate change and land use change on biodiversity: Attribution problems, risks, and opportunities. *Wiley*

Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 5(3), 317–335.

<https://doi.org/10.1002/wcc.271>

Ono, Y., Motoshita, M., & Itsubo, N. (2015). Development of water footprint inventory database on Japanese goods and services distinguishing the types of water resources and the forms of water uses based on input-output analysis. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(10), 1456–1467.

<https://doi.org/10.1007/s11367-015-0928-1>

Ortiz Sarango, C. A. (2018). Medición de la huella hídrica de la Universidad Politécnica Salesiana campus Sur. In *Tesis*.

<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>

Osorio-Tejada, J. L., Varón-Hoyos, M., & Morales-Pinzón, T. (2022). Comprehensive Water Footprint of a University Campus in Colombia: Impact of Wastewater Treatment Modeling. *Water, Air, and Soil Pollution*, 233(5).

<https://doi.org/10.1007/s11270-022-05644-3>

Owusu-Sekyere, E., Jordaan, H., & Chouchane, H. (2017). Evaluation of water footprint and economic water productivities of dairy products of South Africa. *Ecological Indicators*, 83, 32–40. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2017.07.041>

Palhares, J. C. P., & Pezzopane, J. R. M. (2015). Water footprint accounting and scarcity indicators of conventional and organic dairy production systems. *Journal of Cleaner Production*, 93, 299–307. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.01.035>

Petpongpan, C., Ekkawatpanit, C., & Kositgittiwong, D. (2020). Climate change impact on surface water and groundwater recharge in northern Thailand. *Water (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/W12041029>

Poveda, G., Vélez, J. I., Mesa, O. J., Cuartas, A., Barco, J., Mantilla, R. I., Mejía, J. F., Hoyos, C. D., Ramírez, J. M., Ceballos, L. I., Zuluaga, M. D., Arias, P. A., Botero, B. A., Montoya, M. I., Giraldo, J. D., & Quevedo, D. I. (2007). Linking Long-Term Water Balances and Statistical Scaling to Estimate River Flows along the Drainage Network of Colombia. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(1), 4–13.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2007\)12:1\(4\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2007)12:1(4))

Ranchod, N., Sheridan, C. M., Pint, N., Slatter, K., & Harding, K. G. (2015). Assessing the blue-water footprint of an opencast platinum mine in South Africa. *Water SA*, 41(2), 287–293. <https://doi.org/10.4314/wsa.v41i2.15>

Ratchawat, T., Panyatona, S., Nopchinwong, P., Chidthaisong, A., & Chiarakorn, S. (2020). Carbon and water footprint of Robusta coffee through its production chains in

- Thailand. *Environment, Development and Sustainability*, 22(3), 2415–2429.
<https://doi.org/10.1007/s10668-018-0299-4>
- Reis, A., Dos Santos, A. C., Anache, J. A. A., Mendiando, E. M., & Wendland, E. C. (2020). Water footprint analysis of temporary crops produced in São Carlos (SP), Brazil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 25, 1–17.
<https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020200017>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. (2009). Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 14(2). <https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232>
- Romero, M., Quintero, M., & Monserrate, F. (2016). *Elementos técnicos para la medición de huella hídrica en sistemas agrícolas*.
- Schyns, J. F., Booij, M. J., & Hoekstra, A. Y. (2017). The water footprint of wood for lumber, pulp, paper, fuel and firewood. *Advances in Water Resources*, 107, 490–501. <https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2017.05.013>
- Skouteris, G., Ouki, S., Foo, D., Saroj, D., Altini, M., Melidis, P., Cowley, B., Ells, G., Palmer, S., & O'Dell, S. (2018). Water footprint and water pinch analysis techniques for sustainable water management in the brick-manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 172, 786–794. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.213>
- Song, S., Wang, S., Wu, X., Huang, Y., & Fu, B. (2022). Decreased virtual water outflows from the Yellow River basin are increasingly critical to China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(8), 2035–2044. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2035-2022>
- Souissi, A., Chebil, A., Mtimet, N., & Thabet, C. (2019). Virtual water flows and water value in Tunisia: The case of wheat and olive. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(14). <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4589-4>
- Souissi, A., Mtimet, N., Thabet, C., Stambouli, T., & Chebil, A. (2019). Impact of food consumption on water footprint and food security in Tunisia. *Food Security*, 11(5), 989–1008. <https://doi.org/10.1007/s12571-019-00966-3>
- Strasburg, V. J., & Jahno, V. D. (2017). Application of eco-efficiency in the assessment of raw materials consumed by university restaurants in Brazil: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 161, 178–187. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.05.089>
- Tian, X., Sarkis, J., Geng, Y., Qian, Y., Gao, C., Bleischwitz, R., & Xu, Y. (2018).

- Evolution of China's water footprint and virtual water trade: A global trade assessment. *Environment International*, 121, 178–188.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2018.09.011>
- Trezza, R. (2014). *Cropwat Para Windows*. 1–29.
- UN. (2016). *TRANSFORMING OUR WORLD: THE 2030 AGENDA FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT* (pp. 1–41).
[https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030 Agenda for Sustainable Development web.pdf](https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf)
- UNAL Medellín. (2021). *Dos años sumando esfuerzos para consolidar a la UNAL Medellín como un Campus Sostenible*.
<https://unimedios.medellin.unal.edu.co/bitacora/la-unal-cuenta/975-dos-anos-sumando-esfuerzos-para-consolidar-a-la-unal-medellin-como-un-campus-sostenible.html>
- UNESCO. (1982). *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. Estudios e informes en hidrología, UNESCO/ ROSTLAC, Montevideo, 130 p.*
- Universidad Nacional de Colombia. (n.d.). *Ubicación y mapa*. Facultad de Minas.
<https://minas.medellin.unal.edu.co/~procesosyenergia/index.php/component/phocagallery/1-crudos/detail/2-crudos?tmpl=component&Itemid=1>
- Vaidya, B., Shrestha, S., & Ghimire, A. (2021). Water footprint assessment of food-water-energy systems at Kathmandu University, Nepal. *Current Research in Environmental Sustainability*, 3, 100044. <https://doi.org/10.1016/J.CRSUST.2021.100044>
- van der Wiel, K., & Bintanja, R. (2021). Contribution of climatic changes in mean and variability to monthly temperature and precipitation extremes. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00077-4>
- van Oel, P. R., & Hoekstra, A. Y. (2012). Towards Quantification of the Water Footprint of Paper: A First Estimate of its Consumptive Component. *Water Resources Management*, 26(3), 733–749. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9942-7>
- Vélez, J. . (2001). Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de crecidas. In *Tesis doctoral - Universidad Politécnica de Valencia*.
- Vélez, J. I., Vélez, J. J., & Francés, F. (2002). *Modelo distribuido para la simulación hidrológica de crecidas en grandes cuencas. En congreso: XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana, Cuba. Octubre. Publicado en CD. Octubre.*
- Vergé, X., VanderZaag, A., Smith, W., Grant, B., & Gordon, R. (2017). The consideration

- of time step in calculating grey water footprints of agricultural cropping systems. *Ecological Indicators*, 78, 31–36. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2017.03.006>
- Water Footprint Network, Fundación Futuro Latinoamericano, Carbon Feel, & Servicios Ambientales S.A. (2012). *Manual para la evaluación de huella hídrica* (p. 44). <http://waterfootprint.org/media/downloads/ManualEvaluacionHH.pdf>
- Weiland, S., Hickmann, T., Lederer, M., Marquardt, J., & Schwindenhammer, S. (2021). The 2030 agenda for sustainable development: Transformative change through the sustainable development goals? *Politics and Governance*, 9(1), 90–95. <https://doi.org/10.17645/PAG.V9I1.4191>
- Wilson, W., Leipzig, T., & Griffiths-Sattenspiel, B. (2012). Burning Our Rivers The Water Footprint of Electricity. *A River Network Report*.
- Xia, J., Duan, Q.-Y., Luo, Y., Xie, Z.-H., Liu, Z.-Y., & Mo, X.-G. (2017). Climate change and water resources: Case study of Eastern Monsoon Region of China. *Advances in Climate Change Research*, 8(2), 63–67. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.accre.2017.03.007>
- Xing, H., Zheng, W., Li, B., Liu, Z., & Zhang, Y. (2019). Water footprint assessment of eggs in a parent-stock layer breeder farm. *Water (Switzerland)*, 11(12), 1–11. <https://doi.org/10.3390/w11122546>
- XM. (2022). 203.80 GWh-día fue la generación de energía en Colombia en diciembre. XM. <https://www.xm.com.co/noticias/4568-20380-gwh-dia-fue-la-generacion-de-energia-en-colombia-en-diciembre>
- Yapıcıoğlu, P. (2020). Grey water footprint assessment for a dye industry wastewater treatment plant using Monte Carlo simulation: influence of reuse on minimisation of the GWF. *International Journal of Global Warming*, 21(2), 199. <https://doi.org/10.1504/ijgw.2020.10030266>
- Yapıcıoğlu, P. S. (2019). Grey water footprint of a dairy industry wastewater treatment plant: A comparative study. *Water Practice and Technology*, 14(1), 137–144. <https://doi.org/10.2166/wpt.2018.114>
- Yawson, D. O. (2022). Balancing water scarcity, food production, and trade imperatives in the Caribbean: Could virtual water analysis help? *Journal of Cleaner Production*, 376, 134285. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.134285>
- Yu, D., & Ding, T. (2021). Assessment on the flow and vulnerability of water footprint network of Beijing city, China. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126126.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126126>

Zhang, Y., Huang, K., Ridoutt, B. G., & Yu, Y. (2018). Comparing volumetric and impact-oriented water footprint indicators: Case study of agricultural production in Lake Dianchi Basin, China. *Ecological Indicators*, 87, 14–21.

<https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2017.12.045>

Zucchinelli, M., Spinelli, R., Corrado, S., & Lamastra, L. (2021). Evaluation of the influence on water consumption and water scarcity of different healthy diet scenarios. *Journal of Environmental Management*, 291, 112687.

<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112687>

Zucchinelli, M., Sporchia, F., Piva, M., Thomsen, M., Lamastra, L., & Caro, D. (2021). Effects of different Danish food consumption patterns on Water ScarcityFootprint. *Journal of Environmental Management*, 300, 113713.

<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113713>

Anexos

A. ISO 14046:2014

La norma técnica ISO-14046:2014, “Gestión ambiental – Huella hídrica – Principios, requisitos y directrices” busca generar una herramienta con alcance internacional que permita realizar una evaluación de la huella hídrica o huella de agua de productos, procesos y organizaciones (International Organization for Standardization, 2015); esto debido a la preocupación actual por el aumento progresivo en la escasez y contaminación de las fuentes hídricas a nivel mundial (International Organization for Standardization, 2015). Sin embargo, el análisis realizado bajo esta solo tendrá un enfoque ambiental, el enfoque social y económico están fuera del alcance de la evaluación de la huella de agua (International Organization for Standardization, 2015)

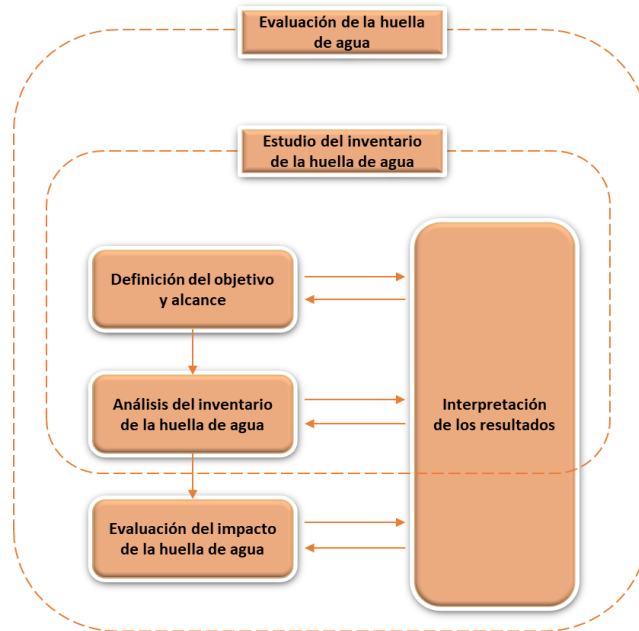
Por otra parte, la ISO 14046:2014 nace a partir de una norma previa, la ISO 14044:2006 “Gestión ambiental – Análisis de ciclo de vida – Requisitos y directrices”, la cual busca calcular los impactos ambientales generados por los diferentes procesos en las etapas de un sistema de producto (International Organization for Standardization, 2006). La ISO 14046:2015 al igual que la ISO 14044:2006 debe ser integral al considerar todos los aspectos que puedan afectar la salud humana, el medio ambiente y los recursos naturales (International Organization for Standardization, 2015). A partir de esto, la evaluación de la huella de agua detalla las entradas, salidas e impactos ambientales potenciales generados por el uso, consumo y afectación del recurso hídrico a causa del proceso, producto u organización que se esté evaluando (International Organization for Standardization, 2015).

De esta manera, si se realiza una evaluación de la huella de agua de un producto debe considerar todas las etapas asociadas al análisis de ciclo de vida (ACV) donde se incluyen

todas las etapas desde la cuna (obtención de materias primas) hasta la tumba (disposición final) (International Organization for Standardization, 2015). Sin embargo, cuando se va a realizar la huella de agua de una organización, se tiene en cuenta todas se debe realizar el análisis a partir de todas las actividades que la empresa realice (International Organization for Standardization, 2015). Es así como dependiendo de los objetivos y el alcance que se desee lograr, la evaluación de la huella de agua se puede restringir a una o varias etapas del análisis de ciclo de vida, ya sea la etapa de un proceso productivo dentro de una organización, la huella de agua de toda la organización o de un producto (International Organization for Standardization, 2015).

De esta manera, para realizar la evaluación de la huella de agua se deben ejecutar cuatro fases las cuales son: **1) definición de objetivos y alcance**; **2) análisis del inventario de la huella de agua**; **3) evaluación del impacto de la huella de agua**; **4) interpretación de los resultados** (ver **Figura 7-1**).

Figura 7-1: Fases de la evaluación de la huella de agua.



Fuente: (International Organization for Standardization, 2015)

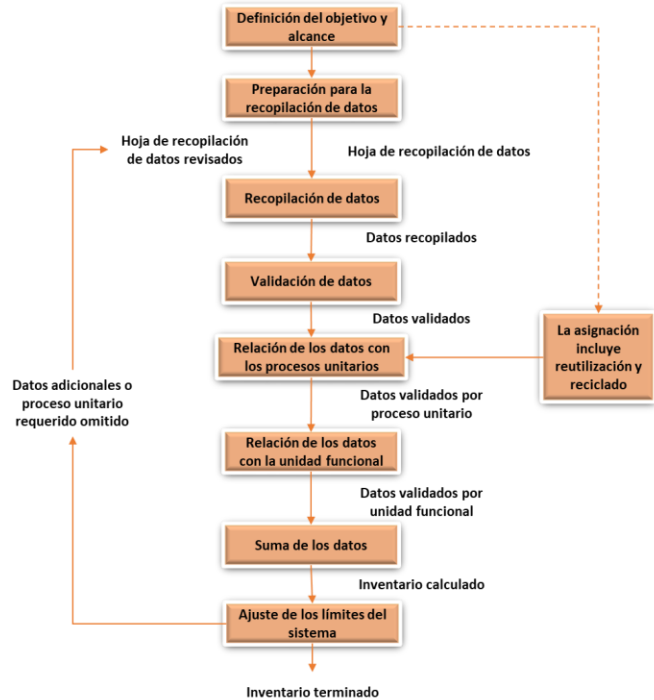
Definición de objetivos

- **Objetivos del estudio:** en esta fase se debe dejar claro cuál va a ser la aplicación final del estudio, cuáles son las razones para realizarlo, cuál será el público objetivo, y si la evaluación es individual o hace parte de un ACV. (International Organization for Standardization, 2015)
- **Alcance del estudio:** teniendo en cuenta la coherencia con los objetivos planteados, se debe establecer cuáles serán los límites del sistema estudiado, junto con la ubicación geográfica y la temporalidad; también la unidad funcional y las categorías de impacto a desarrollar; así mismo, se deben justificar las exclusiones. (International Organization for Standardization, 2015)

Análisis del inventario de la huella de agua

Todas las subfases que se encuentran dentro del análisis del inventario de la huella de agua deben seguir los procedimientos descritos en la ISO 14044 aplicada a la huella de agua como se puede observar en la **Figura 7-2**. (International Organization for Standardization, 2015)

Figura 7-2: Procedimiento para el análisis del inventario de la huella de agua.



Fuente: (International Organization for Standardization, 2015)

- **Cálculo del inventario de la huella de agua:** para esta etapa, todos los datos calculados deben estar detallados junto con sus respectivas ecuaciones, suposiciones, explicaciones pertinentes, y validación de dichos datos. Adicionalmente, se deben establecer los flujos de entradas y salidas entre los procesos unitarios dentro del sistema. Luego se deben sumar todos los datos resultantes de las relaciones anteriores y de acuerdo a los análisis y resultados obtenidos en esta fase, se pueden ajustar los límites del sistema en caso de ser necesario. (International Organization for Standardization, 2015)
- **Flujos elementales:** en esta etapa se recopilan los datos de los flujos de los procesos unitarios teniendo en cuenta la cantidad de agua utilizada, el tipo de recursos hídrico usado (pluvial, marina, superficial, subterránea, salobre o agua fósil); los parámetros y las características fisicoquímicas relacionadas con los recursos hídricos; las formas del uso del agua donde se incluyen los procesos de evapotranspiración, integración al producto y la zona donde se realiza el vertimiento (cuenca hidrográfica o mar); y la ubicación geográfica del uso o afectación del recurso hídrico. (International Organization for Standardization, 2015)
- **Asignación:** esta se usa cuando en los procesos unitarios existe más de un producto o servicio, por lo que asignarle toda la afectación ambiental a uno solo de los productos daría como resultado una sobreestimación debido a un mal cálculo. Por consiguiente, se debe asignar acorde a la relación física entre los productos o servicios generados en ese proceso unitario, de no ser posible, se debe buscar otro tipo de relación para hacer la asignación.

Evaluación del impacto de la huella de agua

Al igual en la etapa anterior, la evaluación del impacto de la huella de agua debe cumplir todos los parámetros establecidos en la ISO 14044. Adicionalmente, se debe realizar la evaluación integral de todos los impactos (categorías de impacto) asociados al proceso, producto o empresa que se esté evaluando para considerar el análisis como huella de agua. De lo contrario la huella de agua debe tener un indicativo adicional al tipo de huella que se midió como la escasez. (International Organization for Standardization, 2015)

La selección de las categorías de impacto a evaluar dependerá de los objetivos y el alcance planteado para el estudio que se está realizando (International Organization for

Standardization, 2015). De esta manera el método o los métodos de caracterización y los factores seleccionados para evaluar las categorías de impacto deberán ser ampliamente explicadas y justificadas (International Organization for Standardization, 2015).

Las categorías de impacto asociadas a la degradación hídrica generada por los procesos, productos o por una empresa son la eutrofización acuática, ecotoxicidad acuática, contaminación térmica y acidificación acuática (International Organization for Standardization, 2015).. Por otra parte, la categoría de impacto que mayormente se suele asociar a la huella hídrica según la disponibilidad es la escasez de agua, sin embargo se pueden incluir otras categorías de impacto asociadas a la disponibilidad hídrica; esto se debe a que la disponibilidad hídrica bajo esta Norma puede incluir otros tipos de agua distintos al agua dulce (International Organization for Standardization, 2015).

Interpretación de los resultados

La interpretación de los resultados obtenidos del cálculo de la huella de agua debe incluir un análisis detallado de cuáles fueron las etapas dentro de los procesos productivos o las áreas dentro de la empresa que generaron los mayores impactos, cuales fueron los impactos más significativos, cuales podrían ser los ecosistemas o zonas medioambientales más impactadas (International Organization for Standardization, 2015). Adicionalmente, se deben incluir las consideraciones espaciotemporales que se tuvieron en cuenta, las conclusiones de los cálculos y análisis realizados, junto con las limitaciones del estudio realizado.

B. Comparación de las metodologías

La WFA y la ISO 14046:2015 permiten evaluar la huella hídrica o huella de agua desde diferentes enfoques y así poder ejecutar una gestión del recurso hídrico lo más eficientemente posible. A partir de esto y el desarrollo ejecutado en las **Sección 2** y en el **Anexo A**, se elabora la **Tabla 7-1** donde se compara desde diferentes perspectivas ambas metodologías.

Tabla 7-1: Comparación de las metodologías WFA e ISO 14046.

Ítem	WFA	ISO 14046:2015	Comparación
Objeto de estudio	Producto, proceso productivo, empresa, consumidor, grupo de consumidores o zona regional específica (país, ciudad, global, etc.).	Producto, proceso productivo o empresa.	La diferencia entre ambas metodologías en el objeto de estudio radica en que la WFA tiene una aplicación más amplia al incluir análisis más particulares como el de un consumidor y análisis más amplios a nivel regional.
Enfoque	En el cálculo el enfoque es ambiental. Mientras que en el análisis de sostenibilidad el enfoque es ambiental, social y económico.	Enfoque ambiental.	El enfoque en ambas metodologías se centra en el desarrollo a nivel ambiental, debido a que analiza factores que afecta un recurso ambiental específico. Sin embargo, la WFA permite incluir el enfoque social y económico siendo más integral en cuanto a la evaluación de la sostenibilidad.
Límites del sistema	Definido por el objetivo de estudio.	Los procesos unitarios seleccionados.	El límite del sistema en ambas metodologías aunque parezca diferente, tiene el mismo alcance y es evaluar todos los procesos y consumos directos e indirectos relacionados con el objeto de estudio.
Tipo de agua (uso o degradación)	Solo agua dulce (pluvial, superficial y subterránea)	Pluvial, marina, superficial, subterránea, salobre o agua fósil.	La diferencia entre los recursos hídricos en estas metodologías es bastante claro, mientras que la WFA solo

Ítem	WFA	ISO 14046:2015	Comparación
			considera las afectaciones sobre el agua dulce, la ISO 14046 considera todo el recurso hídrico en su totalidad, incluyendo agua salobre y de mar.
Alcance geográfica	Se establece acorde al límite del sistema. Puede ser desde una zona reducida en el análisis para un consumidor; hasta un alcance global.	Acorde a la ubicación de los procesos unitarios, ya sea un cultivo, las diferentes sucursales de la empresa o el área geográfica cubierta durante cada proceso unitario que participa en la fabricación de un producto.	La metodología WFA tiene un mayor alcance geográfico que la ISO 14046. Esto se debe a que por medio de la metodología WFA se pueden hacer análisis inclusive a nivel global, situación que no se presenta bajo la metodología de la ISO que el máximo alcance geográfico de manera directa que podría tener es el análisis de un proceso de distribución extenso.
Etapas desarrolladas	<ol style="list-style-type: none"> 1) Definición de objetivo y alcance. 2) Contabilidad de la huella hídrica. 3) Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica. 4) Formulación de respuestas a la huella hídrica. 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Definición de objetivo y alcance. 2) Análisis del inventario de la huella de agua. 3) Evaluación del impacto de la huella de agua. 4) Interpretación de los resultados. 	Si bien la primera fase es igual, las fases siguientes difieren casi por completo. Es así como en la WFA se realiza una interpretación de los resultados en las tres primeras fases, lo cual se encuentra implícito en cada una; mientras que en la ISO es una fase específica a pesar de ser aplicada de la fase 1 a la 3. La WFA mide el impacto en la fase 2 y 3, la ISO solo lo mide en la 3. Finalmente, la ISO no pide establecer acciones de mejora para reducir los impactos, la WFA si lo establece en la fase 4 de manera específica.
Ecuaciones desarrolladas	Se desarrollan diferentes ecuaciones acorde al objetivo de estudio como se observa en la sección 2.	No se desarrollan ecuaciones, se deja libre para que el usuario aplique las ecuaciones que considere pertinentes.	En la metodología de la ISO 14046 no se especifican las ecuaciones necesarias para los cálculos, permite que el usuario establezca las ecuaciones pertinentes. Por otra parte, la WFA establece un serie de opciones de ecuaciones para su aplicación.
Componentes evaluados	Huella hídrica azul (HHazul), huella hídrica verde (HHverde), huella hídrica gris (HHgris), escasez de agua verde (EAverde), escasez de agua azul (EAazul) y nivel de	Degradación hídrica (eutrofización acuática, acidificación acuática, ecotoxicidad acuática y contaminación térmica). Disponibilidad hídrica (escasez).	La ISO 14046 establece un mayor número de categorías de impacto asociadas a la degradación y disponibilidad hídrica frente a las establecidas por la WFA.

Ítem	WFA	ISO 14046:2015	Comparación
	contaminación del agua (NCA).		
Análisis de impacto	Establece el nivel de impacto por medio de indicadores de escasez (EAazul y EAverde), junto con el indicador de contaminación (NCA), asociados a las categorías evaluadas (HHazul, HHverde, HHgris). De esta manera permite determinar si las huellas hídricas evaluadas superan los límites ecosistémicos presentes en el área de influencia.	En la evaluación del impacto de la huella de agua considera la presión generada por los flujos de entrada y salida sobre el medio ambiente en los procesos unitarios expresados por medio de las categorías de impacto. Adicionalmente, si se decide realizar un análisis de punto final, se puede establecer el nivel de afectación a la salud humana, al ecosistema y a los recursos.	La WFA establece por medio de los indicadores de escasez y contaminación de las categorías evaluadas el nivel máximo de impacto que se puede ejercer sobre los recursos hídricos dentro del área de influencia del estudio que se está realizando. Por otro lado la ISO 14046 solo puede indicar la magnitud del impacto es decir la cantidad de contaminación o uso que se está ejerciendo, pero no puede establecer si ese impacto frente al ecosistema circundante es muy significativo o poco significativo.

Fuente: Elaboración propia.

Tanto la metodología de evaluación de la huella hídrica (WFA) de la WFN como la metodología para la evaluación de la huella de agua de la norma ISO 14046:2015 son enfoques válidos y reconocidos para evaluar y cuantificar el uso del agua a nivel internacional. Ambas metodologías tienen sus propias fortalezas, limitaciones y enfoques particulares. La elección de la metodología a utilizar dependerá de los objetivos específicos del estudio, el contexto en el que se aplique y la disponibilidad de recursos y expertos en el tema.

De esta manera, la metodología de estudio bajo la cual se desarrolla principalmente este documento es la WFA, ya que esta metodología puede representar mejor el uso y la degradación hídrica generada por un campus universitario como una evaluación de un grupo de consumidores, junto con ecuaciones, análisis e indicadores específicos que permiten comprender mejor el contexto local y específico asociado a las actividades relacionadas con los campus universitarios.

C. Artículos del estudio bibliográfico

Tabla 7-2: Publicaciones de aplicación de la huella hídrica en diferentes sectores.

Referencia	Año de publicación	Base de datos	País de elaboración	Huella hídrica aplicada	Metodología de cálculo	Sector económico
(Palhares & Pezzopane, 2015)	2015	Science Direct	Brasil	HH directa azul, verde, gris. HH indirecta por alimentos. Indicador de escasez de agua verde y azul.	WFA	Pecuario - lácteos convencionales y orgánicos
(Ono et al., 2015)	2015	Springer Link	Japón	Agua virtual	Modelo input-output	Geográfico - bienes y servicios
(Haggard et al., 2015)	2015	Scopus	Sudáfrica	HH directa azul, verde, gris	WFA	Industrial - Minería de platino
(Ranchod et al., 2015)	2015	Scopus	Sudáfrica	HH directa azul e indirecta por energía y químicos de procesamiento	WFA	Industrial - Minería de platino
(Manzardo, Mazzi, et al., 2016)	2016	Science Direct	Estados Unidos	HH azul, verde y gris. Disponibilidad de agua, Eutrofización, ecotoxicidad y acidificación	WFA / ISO 14046	Industrial - Empaque de salsa de tomate (vidrio o cartón)
(le Roux et al., 2016)	2016	Scopus	Sudáfrica	HH directa azul, verde y gris	WFA	Agrícola - ortalizas (zanahoria, remolaha, col, brocoli, lechuga, maíz, trigo)
(Vergé et al., 2017)	2017	Science Direct	Canadá	HH directa gris	WFA	Agrícola - Maíz y soya.
(Owusu-Sekyere et al., 2017)	2017	Science Direct	Sudáfrica	HH directa azul, verde y gris	WFA	Pecuario - lácteos
(Chini et al., 2017)	2017	Scopus	Estados Unidos	HH directa azul y agua virtual	WFA	Geográfico - país
(Bai et al., 2018)	2018	Science Direct	China	HH directa azul, verde y gris. Escasez del agua y degradación del agua	WFA / ISO 14046	Pecuario - Porcicola
(Lovarelli et al., 2018)	2018	Science Direct	Italia	HH directa azul, verde y gris. Eutrofización y ecotoxicidad de agua dulce	WFA / ACV	Agrícola - maíz
(Noya et al., 2018)	2018	Science Direct	España	HH directa azul, verde y gris. HH indirecta Eutrofización de agua dulce, Agotamiento de agua.	ACV / WFA	Pecuario - lácteos
(Zhang et al., 2018)	2018	Science Direct	China	HH directa azul, verde y gris. Huella de escasez de agua y huella de degradación del agua.	WFA	Agrícola trigo, tabaco, legumbres, cereales
(Tian et al., 2018)	2018	Science Direct	China	Agua virtual	Modelo input-output	Regional - Comercio
(D'Ambrosio et al., 2018)	2018	Science Direct	Italia	HH directa azul, verde y gris.	WFA	Agrícola - Cultivos a escala de cuenca
(Mohlotsane et al., 2018)	2018	Scopus	Sudáfrica	HH directa azul, verde y gris. HH indirecta alimentos	WFA	Industrial - pan de trigo

Referencia	Año de publicación	Base de datos	País de elaboración	Huella hídrica aplicada	Metodología de cálculo	Sector económico
(Gush et al., 2019)	2019	Science Direct	Sudáfrica	HH directa azul, verde y gris	WFA	Agrícola -Geográfico - Manzanos
(Aleksandro wicz et al., 2019)	2019	Science Direct	India	HH azul y verde	WFA	Alimentación - Cambio de hábitos alimenticios
(Ibidhi & Ben Salem, 2019)	2019	Science Direct	Túnez	HH directa azul y gris. HH indirecta alimento y bebida.	WFA	Pecuario - producción ovina
(Mekonnen et al., 2019)	2019	Science Direct	Estados Unidos	HH directa azul, verde y gris. HH indirecta alimento.	WFA	Pecuario - producción animal y leche
(Mourad et al., 2019)	2019	Science Direct	Oriente medio y África del Norte (MENA)	HH indirecta alimento, bebida y servicios.	WFA	Pecuario - producción animal
(Souissi, Mtimet, et al., 2019)	2019	Springer Link	Túnez	HH directa azul, verde y gris. HH indirecta por producción	WFA	Alimentación - hábitos alimenticios
(Al-Muaini et al., 2019)	2019	Springer Link	Emiratos Árabes Unidos	HH directa azul, verde y gris.	WFA	Agrícola - dátiles
(Xing et al., 2019)	2019	Scopus	China	HH directa azul. HH indirecta alimento, bebida y servicios. Huella de escasez de agua y huella de degradación del agua.	WFA	Pecuario - huevos
(Souissi, Chebil, et al., 2019)	2019	Scopus	Túnez	Huella hídrica directa azul y verde.	WFA	Agrícola - trigo y olivo
(P. S. Yapıcıoğlu, 2019)	2019	Scopus	Turquía	HH directa gris	WFA	Industrial - Tratamiento de aguas de la industria láctea
(D'Ambrosio et al., 2020)	2020	Science Direct	Italia	HH directa azul, verde y gris. Huella de escasez y degradación del agua.	WFA	Geográfico - Agrícola uso de agua
(Nezamolestami & Hosseinian, 2020)	2020	Science Direct	Irán	HH directa azul y agua virtual	ACV / WFA	Industrial - Producción de acero
(Muratoglu, 2020b)	2020	Science Direct	Turquía	HH directa gris y huella de degradación del agua.	WFA	Geográfico - Agrícola contaminación
(Muratoglu, 2020a)	2020	Springer Link	Turquía	HH directa azul y verde. Agua virtual	WFA	Agrícola - trigo
(Chang, 2020)	2020	Springer Link	Taiwán	HH directa azul, verde y gris	WFA	Agrícola - varios
(Bong et al., 2020)	2020	Scopus	Malasia	HH directa azul, verde y gris. HH indirecta por producción. Huella de escasez y degradación del agua.	ACV / WFA	Industria - Alimentos tradicionales
(Ratchawat et al., 2020)	2020	Scopus	Tailandia	HH directa azul (proceso) verde y gris.	WFA	Agrícola - café
(P. Yapıcıoğlu, 2020)	2020	Scopus	Turquía	HH directa gris	WFA	Industrial - tintas
(Reis et al., 2020)	2020	Scopus	Brasil	HH directa azul, verde y gris.	WFA	Agrícola - azúcar, tomate, arroz, maní
(Hosseinian & Ghahari, 2021)	2021	Science Direct	Irán	HH directa azul. Agua virtual.	ACV / WFA	Construcción - Edificios residenciales
(Yu & Ding, 2021)	2021	Science Direct	China	Agua virtual	Modelo input-output	Geográfico - Ciudad

Referencia	Año de publicación	Base de datos	País de elaboración	Huella hídrica aplicada	Metodología de cálculo	Sector económico
(Zucchinelli, Spinelli, et al., 2021)	2021	Science Direct	Italia	HH indirecta azul, verde y gris de alimentos. Huella de escasez de agua.	WFA	Alimentación - patrones dietarios (omnívoro, vegetariano, vegano).
(Zucchinelli, Sporchia, et al., 2021)	2021	Science Direct	Dinamarca	HH idirecta azul, verde y gris de alimentos.	WFA	Alimentación - patrones dietarios (vegana, carnívora, vegetariana, estandar)
(Lares-Michel et al., 2021)	2021	Springer Link	México	HH idirecta azul, verde y gris de alimentos.	WFA	Alimentación - Habitos alimenticios
(Cruz-Pérez et al., 2021)	2021	Springer Link	islas europeas	HH AZUL	WFA	Construcción - puertos deportivos
(Al-Bahouh et al., 2021)	2021	Scopus	Canadá	HH azul	WFA	Pecuario - Leche
(Leal-Echeverri & Tobón, 2021)	2021	Scopus	Colombia	HH directa azul, verde y gris.	WFA	Agrícola - Café
(B. Chen et al., 2021)	2021	Scopus	China	HH directa azul y gris. Escasez de agua, eutrofización de agua dulce, ecotoxicidad	WFA / ISO 14046	Industrial - textil
(Muratoglu et al., 2022)	2022	Science Direct	Turquía	HH directa azul, verde y gris.	WFA	Geográfica - cuenca
(Yawson, 2022)	2022	Science Direct	Caribe	Agua virtual	WFA	Regional - comercio de maiz
(Machin Ferrero et al., 2022)	2022	Science Direct	Argentina	HH directa azul, verde y gris.	WFA	Agrícola - limón
(Kalya & Alver, 2022)	2022	Springer Link	Turquía	HH directa azul y gris. HH indirecta azul (químicos, energía y tratamiento de lodos).	WFA	Industrial - Tratamiento de aguas residuales
(Song et al., 2022)	2022	Scopus	China	Agua virtual	Modelo input-output	Geográfico- cuenca
(Becker & Gondhalekar, 2022)	2022	Scopus	Alemania	HH indirecta azul y gris	WFA	Agrícola - aguacate
(Ji et al., 2022)	2022	Scopus	China	HH directa azul, verde y gris. HH indirecta en alimentos. Agua virtual .	WFA	Pecuario -Producción porcicola

Tabla 7-3: Ecuaciones de huella hídrica utilizadas en diferentes sectores.

Referencia	Metodología de cálculo	Ecuaciones	Variables	Numeración	Anotaciones
(Palhares & Pezzopane, 2015)	WFA	(2-18)	(2-18)	N/A	Análisis de producción animal - Hídrica gris sección 2.1.3 Índice de escasez de agua azul y verde sección 2.1.1 y 2.1.2
		$BW = (W_{irr}) + (W_{ani-drinking}) + (W_{prod}) [volumen/tiempo]$	BW = agua azul. W _{irr} = consumo de agua de riego. W _{ani-drinking} = consumo de agua potable. W _{prod} = Cantidad de agua en la leche.	(7-1)	
		(2-27)	(2-27)	N/A	
		(2-39)	(2-39)	N/A	
(Ono et al., 2015)	Modelo input-output	$e_{input} = d_{input}(I - A)^{-1}F$	e = vector sectorial de entrada o consumo de agua debido a la compra d. I = matriz unitaria. A = matriz económica input-output. d = vector de compras. F = matriz entrada y consumo de agua por dólar de producción para cada sector.	(7-2)	Huella hídrica nacional
		$e_{consumption} = d_{consumption}(I - A)^{-1}F$		(7-3)	
(Haggard et al., 2015)	WFA	(2-11), (2-27) y (2-18)	(2-11), (2-27) y (2-18)	N/A	Huella hídrica de una mina de platino
(Ranchod et al., 2015)	WFA	(2-11)	(2-11)	N/A	Huella hídrica azul de una mina de platino
		$V_{ent} = \frac{m_{solids} \times W}{\rho_{water}}$	V _{ent} = M _{solids} = W = P _{water} =	(7-4)	Realizaron un balance para la huella
		$V_{evap} = PE \times SA_{storage} \times f_{pan}$	V _{evap} = PE = SA _{storage} = f _{pan} =	(7-5)	
(Manzardo et al., 2016)	WFA / ISO 14046	Sin ecuaciones presentadas	N/A	N/A	Huella hídrica de empaques de salsa Compara la ISO y la WFA, pero no evidencia ecuaciones de cálculo.
(le Roux et al., 2016)	WFA	(2-12), (2-19) Y (2-25)	(2-12), (2-19) Y (2-25)	N/A	Huella hídrica de cultivo de vegetales
(Vergé et al., 2017)	WFA	$GW_{anual} = GW_{anual}^L + GW_{anual}^R$	GW= huella hídrica gris. L = lixiviación. R = escorrentía.	(7-6)	Huella hídrica gris por nitrógeno de un cultivo de maíz y soja.

Referencia	Metodología de cálculo	Ecuaciones	Variables	Numeración	Anotaciones
		$GW_{anual}^{L o R} = \frac{(C_N - C_{standard})}{C_{standard}} \times V_{L o R}$	C_N = concentración de N en el agua L o R. $C_{standard}$ = estándar de la calidad del agua. V = volumen de agua L o R.	(7-7)	Altera la ecuación de huella hídrica gris de la WFA
(Owusu-Sekyere et al., 2017)	WFA	(2-12), (2-19), (2-29) y (2-2)	(2-12), (2-19), (2-29) y (2-2)	N/A	Huella hídrica de productos lácteos
(Chini et al., 2017)	WFA	$VWC_{c,s} = \frac{\sum_{iec}^l (GreenVWC_{i,s} + BlueVWC_{i,s}) \times Production_s}{\sum_{iec}^l Production_s}$	VWC = contenido virtual de agua. GreenVWC = contenido virtual de agua verde. BlueVWC = contenido virtual de agua azul. c = grupo de productos. i = indica artículo. l = número de artículos dentro de C. s = estado de producción.	(7-8)	Huella hídrica urbana El agua indirecta = agua virtual y agua por energía
(Bai et al., 2018)	WFA / ISO 14046	Sin ecuaciones presentadas	N/A	N/A	Huella hídrica granja porcícola Compara la ISO y la WFA, pero no evidencia ecuaciones de cálculo.
(Lovarelli et al., 2018)	WFA / ACV	Sin ecuaciones presentadas	N/A	N/A	Huella hídrica de cultivo de maíz Aplica las dos metodologías de manera complementaria pero no evidencia ecuaciones de cálculo
(Noya et al., 2018)	ACV / WFA	Sin ecuaciones presentadas	N/A	N/A	Producción de leche Incluye la WFA en un ACV.
(Zhang et al., 2018)	WFA	(2-10)(2-12)(2-19) y (2-29)	(2-10)(2-12)(2-19) y (2-29)	N/A	Huella hídrica de producción agrícola a nivel de cuenca
(Tian et al., 2018)	Modelo input-output	$X^r = Z^{rr} + y^{rr} + \sum_{s \neq r} e^{rs} = A^{rr} X^r + y^{rr} + \sum_{s \neq r} A^{rs} X^s + \sum_{s \neq r} y^{rs}$	X^r = producción total de la región R. Z^{rr} = consumo interno intermedio en la región R Y^{rr} = vector de consumo final A^{rr} = matriz de coeficientes compuesta entre diferentes sectores de la región r. A^{rs} = matriz de coeficientes exportados de la región r y s.	(7-9)	Huella hídrica nación Usa modelo MRIO
(D'Ambrosio et al., 2018)	WFA	(2-12)(2-19)(2-29)(2-38)(2-40) y (2-42)	(2-12)(2-19)(2-29)(2-38)(2-40) y (2-42)	N/A	Huella hídrica agrícola regional Aplica la WFA completa con los índices de escasez y contaminación.
(Mohlotsane et al., 2018)	WFA	(2-12), (2-19), (2-29) y (2-2)	(2-12), (2-19), (2-29) y (2-2)	N/A	Huella hídrica fabricación de pan (desde cultivo de trigo hasta producción de pan)

Referencia	Metodología de cálculo	Ecuaciones	Variables	Numeración	Anotaciones
(Gush et al., 2019)	WFA	(2-10)(2-12)(2-19) y (2-29)	(2-10)(2-12)(2-19) y (2-29)	N/A	Huella hídrica de huerto de manzanas
(Aleksandrowicz et al., 2019)	WFA	Sin ecuaciones presentadas	N/A	N/A	Huella hídrica del cambio dietario Cálculo de huella de agua y uso de suelo.
(Ibidhi & Ben Salem, 2019)	WFA	$WF_{animal} = WF_{feed} + WF_{drink} + WF_{serv}$	WF_{animal} = huella hídrica de un animal WF_{feed} = huella hídrica de la alimentación WF_{drink} = consumo de agua potable WF_{serv} = consumo de agua de servicio.	(7-10)	Huella hídrica de cría de ovejas
		(2-29)	(2-29)	N/A	
(Mekonnen et al., 2019)	WFA	(7-10)	(7-10)	N/A	Huella hídrica en la producción de carne y leche
(Mourad et al., 2019)	WFA	(7-10)	(7-10)	N/A	Huella hídrica de producción animal
		(7-11)	(7-12)	N/A	Ecuación adaptada de la (2-9)
(Souissi, Mtimet, et al., 2019)	WFA	(2-2)(2-12)(2-19) y (2-29)	(2-2)(2-12)(2-19) y (2-29)	N/A	Hábitos de alimentación
(Al-Muaini et al., 2019)	WFA	(2-12)(2-18) y (2-29)	(2-12)(2-18) y (2-29)	N/A	Huella hídrica de producción de dátiles.
(Xing et al., 2019)	WFA	(2-38)(2-40) Y (7-10)	(2-38)(2-40) Y (7-10)	N/A	Huella hídrica de producción de huevo Calcula la escasez de agua azul y verdes
(Souissi, Chebil, et al., 2019)	WFA	(2-12) y (2-19)	(2-12) y (2-19)	N/A	Agua virtual para cultivos de trigo y olivo Confusión del concepto de agua virtual con huella hídrica
(P. S. Yapicioğlu, 2019)	WFA	$HH_{proc,gris} = \frac{C_{efl} - C_{max}}{C_{max} - C_{nat}} \times Qe \left[\frac{volumen}{tiempo} \right]$	Mismas variables de (2-27)	(7-13)	Huella hídrica gris de una PTAR Modifica la ecuación (2-27)
(D'Ambrosio et al., 2020)	WFA	$CWU_{gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \times K \left[\frac{volumen}{área} \right]$	CWU_{gris} = requerimiento de agua de dilución (agricultura). L = carga de contaminación difusa C_{max} = concentración máxima permitida. C_{nat} = concentración natural en la masa de agua. K = factor de conversión entre las diferentes unidades.	(7-14)	Huella hídrica geográfica Uso de modelo SWAT para balance hídrico a escala de cuenca. Calcula la HH azul y la HH verde pero no evidencia ecuación. Modificación en la huella hídrica gris.
		$WF_{gris} = \frac{V_{efl} \times C_{efl}}{C_{max} - C_{nat}} \left[volumen \right]$	WF_{gris} = requerimiento de agua de dilución puntual por PTAR. V_{efl} = volumen del efluente de la PTAR. C_{efl} = concentración de TN y TP en el efluente.	(7-15)	

Referencia	Metodología de cálculo	Ecuaciones	Variables	Numeración	Anotaciones
(Nezamoleslami & Hosseinian, 2020)	ACV / WFA	$WF = DW + VW$	WF = huella hídrica DW = huella hídrica directa VW = agua virtual	(7-16)	Huella hídrica de la producción de acero El agua indirecta = agua virtual modificando la ecuación (2-1)
		$VW = \sum_{i=1}^n WVP_i = A_{pi} \times WCI_p$	VW = agua virtual WVP _i = agua virtual del parámetro P. A _{pi} = cantidad de P. WCI _{pi} = es la intensidad de consumo de agua de P.	(7-17)	Similar a la ecuación (2-37)
(Muratoglu, 2020b)	WFA	(2-25)	(2-25)	N/A	Huella hídrica gris geográfica agrícola.
(Muratoglu, 2020a)	WFA	$VWC = VWC_{verde} + VWC_{azul}$ $= \frac{UAC_{verde}}{R} + \frac{UAC_{azul}}{R}$ [volumen/área]	VWC = contenido de agua virtual VWC _{verde} o azul = contenido de agua virtual verde o azul. UAC _{azul} o verde = uso del agua azul y verde del cultivo.	(7-18)	Huella hídrica agrícola Huella hídrica = agua virtual Suma de las ecuaciones (2-12) y (2-19)
		(2-4)	(2-4)	N/A	Balance de agua virtual (comercio virtual)
(Chang, 2020)	WFA	(2-12), (2-19) y (2-30)	(2-12), (2-19) y (2-30)	N/A	Huella hídrica agrícola regional
(Bong et al., 2020)	ACV / WFA	(2-38) y (2-40)	(2-38) y (2-40)	N/A	Huella hídrica de productos de alimentación tradicional No presenta las ecuaciones para HHazul, HHverde o HHgris. Si la sostenibilidad.
(Ratchawat et al., 2020)	WFA	(2-19) y (2-30)	(2-19) y (2-30)	N/A	Huella hídrica de la producción de café La HH azul corresponde al procesamiento del café hasta la tostión, no se requiere riego.
(P. Yapicioğlu, 2020)	WFA	(4-21)	(4-21)	N/A	Huella hídrica gris industrial tintes Modifica la ecuación (2-27)
(Reis et al., 2020)	WFA	(2-12), (2-19) y (2-30)	(2-12), (2-19) y (2-30)	N/A	Huella hídrica agrícola
(Hosseinian & Ghahari, 2021)	ACV / WFA	(7-16)	(7-16)	N/A	Huella hídrica de edificios residenciales
		$DW = \sum_{i=1}^n DWP_i = A_{pi} \times WCI_p$	VW = consumo directo de agua WVP _i = consumo directo de agua del parámetro P. A _{pi} = cantidad de P. WCI _{pi} = es la intensidad de consumo de agua de P.	(7-19)	Altera la ecuación (7-17). Tiene un proceso erróneo menciona la ecuación para cálculo de huella hídrica directa pero para el desarrollo lo genera para huella hídrica indirecta.
(Yu & Ding, 2021)	Modelo input-output	(7-9)	(7-9)	N/A	Huella hídrica de una ciudad Usa modelo MRIO

Referencia	Metodología de cálculo	Ecuaciones	Variables	Numeración	Anotaciones
(Zucchinelli, Spinelli, et al., 2021)	WFA	(2-7)	(2-7)	N/A	Huella hídrica de patrones dietarios
(Zucchinelli, Sporchia, et al., 2021)	WFA	(2-7)	(2-7)	N/A	Huella hídrica de patrones dietarios
(Lares-Michel et al., 2021)	WFA	$WF_{food} = Green\ WF + Blue\ WF + Grey\ WF + WF_w + WF_c$	WF Food = huella hídrica total de alimentos. GreenWF = huella hídrica verde. BlueWF = huella hídrica azul. GreyWF = huella hídrica gris. WF _w = agua para lavar los alimentos. WF _c = agua para cocinar los alimentos.	(7-20)	Huella hídrica de patrones dietarios
		$WF_{dish} = \sum_{j=1}^n (Green\ WF_j + Blue\ WF_j + Grey\ WF_j + WF_{w_j} + WF_{c_j})$	n = número de alimentos en un plato. j = corresponde a alimentos.	(7-21)	
		$WF_{diet} = \sum_m WF_{dish} + \sum_k WF_{food}$	WF _{diet} = huella hídrica de una dieta m = número de platos k = número de alimentos en la dieta	(7-22)	
(Cruz-Pérez et al., 2021)	WFA	Sin ecuaciones presentadas	N/A	N/A	Huella hídrica de puertos deportivos
(Al-Bahouh et al., 2021)	WFA	$Blue\ WF = \frac{(W_{drinking} + W_{washing} + W_{spray})}{FPCM}$	Blue WF = huella hídrica azul W _{drinking} = consumo de agua. W _{washing} = agua de lavado de leche generada W _{spray} = agua pulverizada para refrigeración. FPCM = producción de leche corregida por proteínas grasas.	(7-23)	Huella hídrica de granjas lecheras
(Leal-Echeverri & Tobón, 2021)	WFA	(2-10), (2-11), (2-19) y (2-27)	(2-10), (2-11), (2-19) y (2-27)	N/A	Huella hídrica de la producción de café
(Chen et al., 2021)	WFA / ISO 14046	(2-25)	(2-25)	N/A	Huella hídrica de fabricación de cachmire
		$WF_{blue} = \sum_{i=1}^n Q_i$	WF _{blue} = huella hídrica azul. Q = es el agua consumida en el proceso i. I = proceso productivo.	(7-24)	Calcula solo la parte directa de la ecuación (2-2)
(Muratoglu et al., 2022)	WFA	(2-10), (2-12), (2-19) y (2-25)	(2-10), (2-12), (2-19) y (2-25)	N/A	Huella hídrica de una región semiárida

Referencia	Metodología de cálculo	Ecuaciones	Variables	Numeración	Anotaciones
(Yawson, 2022)	WFA	(7-18)	(7-18)	N/A	Huella hídrica del comercio de alimentos (maíz) de una región
(Machin Ferrero et al., 2022)	WFA	(2-12), (2-19) y (2-27)	(2-12), (2-19) y (2-27)	N/A	Huella hídrica agrícola del limón
(Kalya & Alver, 2022)	WFA	$HH_{gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{real}}$	Variables de la ecuación (2-25)	(7-25)	Huella hídrica industrial de PTAR Modifica de Cnat a Creal en el denominador en la ecuación (2-25)
		$HH_{gris,sin\ tratamiento} = \frac{C_{aft} - C_{max}}{C_{max}} \times Q_{aft}$	Variables de la ecuación (2-27)	(7-26)	Modifica de Cnat a Creal en el denominador en la ecuación (2-25)
		$HH_{gris,con\ tratamiento} = \frac{C_{eft} - C_{max}}{C_{max}} \times Q_{eft}$	Variables de la ecuación (2-27)	(7-27)	
		$\Delta WF_{gris} = WF_{sin\ tratamiento} - WF_{con\ tratamiento}$	WF = huella hídrica gris WF _{sin tratamiento} = huella hídrica antes del tratamiento WF _{con tratamiento} = huella hídrica después del tratamiento	(7-28)	Variación del balance de masa
		$WF_{azul} = WF_{azul,directa} + WF_{azul,indirecta}$	WF _{azul} = huella hídrica azul WF _{azul, directa} = huella hídrica azul directa WF _{azul, indirecta} = huella hídrica azul indirecta	(7-29)	Variación del balance de masa
		$WF_{azul,directa} = WF_{azul,proceso} + WF_{actividades\ residenciales} + WF_{azul,evaporación} + WF_{azul,lodos} + WF_{azul,perdida}$	WF _{azul,proceso} = huella hídrica del proceso WF _{actividades residenciales} = huella hídrica de actividades residenciales WF _{azul,lodos} = huella hídrica de procesamiento de lodos WF _{azul, perdida} = consumo hídrico perdido.	(7-30)	Variación del balance de masa
$WF_{azul,indirecta} = WF_{azul,quimicos} + WF_{azul,energia} + WF_{azul,tratamiento\ de\ lodos}$	WF _{azul,quimicos} = huella hídrica azul por consumo de químicos WF _{azul,energia} = huella hídrica azul de consumo de energía WF _{azul, tratamiento de lodos} = agua consumida en el tratamiento e lodos.	(7-31)	Variación del balance de masa		
(Song et al., 2022)	Modelo input-output	$D_{ij} = D_{ij}^{producción} - D_{ij}^{consumo}$	D _{ij} = volumen anual de flujo de agua virtual. D _{ij} ^{producción} = agua virtual integrada a la producción cultivos. D _{ij} ^{consumo} = agua virtual integrada al consumo de cultivos. i = provincia específica. j = cultivo particular.	(7-32)	Huella hídrica de una cuenca
(Becker & Gondhalekar, 2022)	WFA	Sin ecuaciones presentadas	N/A	N/A	Huella hídrica de un cultivo de aguacates Nexo agua-energía-alimentos
(Ji et al., 2022)	WFA	(2-2), (2-37) y (7-10)	(2-2), (2-37) y (7-10)	N/A	Huella hídrica de la producción y consumo de carne de cerdo

Tabla 7-4: Publicaciones de aplicación de la huella hídrica en campus universitario.

Referencia	Año	Base de datos	País	Universidad	Huella hídrica aplicada	Metodología de cálculo	Áreas de enfoque
-(D. M. Chen et al., 2016)	2016	Science Direct	Canadá	Universidad McGill en Montreal	Huella indirecta	WFA	Alimentación - dieta
-(Strasburg & Jahno, 2017)	2017	Science Direct	Brasil	Universidad pública federal brasileña	Huella indirecta	WFA	Alimentación - dieta
(Natzak et al., 2017)-	2017	Scopus	Estados Unidos	Universidad de Virginia (UVA)	Huella hídrica directa azul. Huella hídrica indirecta.	WFA	alimentos, combustible, papel, animales de investigación y compras hospitalarias
-(Kandanano nd, 2019b)	2019	Science Direct	Tailandia	Universidad Valaya Alonkon Rajabhat	Huella hídrica indirecta	WFA	Energía, combustible
-(Gu et al., 2019)	2019	Science Direct	Reino Unido	Universidad de Keele	Huella hídrica directa azul. Huella hídrica indirecta	WFA	Energía y Alimentación
(Kandanano nd, 2019a)-	2019	Scopus	Tailandia	Universidad Valaya Alongkorn Rajabhat	Huella hídrica directa azul, verde y gris. Huella hídrica indirecta.	WFA	Energía, combustible
-(Hatjiathana ssiadou et al., 2019)	2019	Scopus	Brasil	Universidad Federal de Rio Grande do Norte (UFRN)	Huella hídrica indirecta	WFA	Alimentos
(Vaidya et al., 2021)-	2021	Science Direct	Nepal	Universidad de Kathmandú	Huella hídrica directa azul. Huella hídrica indirecta	WFA	Energía, combustible y Alimentación
(Okutan & Akkoyunlu, 2021)-	2021	Springer Link	Turquía	Universidad de Boğaziçi	Huella hídrica directa azul. Huella hídrica indirecta	WFA	Energía, combustible y Alimentación
(Kilian et al., 2021)-	2021	Scopus	Brasil	Federal University of the Southern Frontier (UFFS) y; Federal University of Technology – Paraná (UTFPR)	Huella hídrica indirecta	WFA	Alimentos
(Mu et al., 2021)-	2021	Scopus	China	tres universidades de la provincia de Shaanxi	Huella hídrica directa azul. Huella hídrica indirecta	WFA	alimento, compras, ropa y papel
(Osorio-Tejada et al., 2022)-	2022	Springer Link	Colombia	Universidad Tecnológica de Pereira	Eutrofización de agua dulce, eutrofización marina, ecotoxicidad de agua dulce y ecotoxicidad marina.	ISO 14046	Energía eléctrica - combustible- extintores-gas refrigerante - transporte - papel - infraestructuras - residuos sólidos

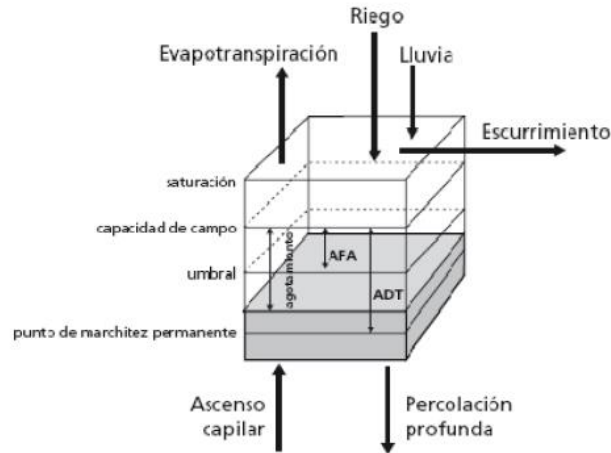
D. Software Cropwat

CROPWAT es un modelo de balance hídrico que desarrolla de manera sistemática la ecuación de la FAO Penman Monteith que simula la evapotranspiración de agua verde en condiciones óptimas de un cultivo o un área con superficie vegetal indiscriminado (Clarke et al., 2000; Hoekstra et al., 2011). La ecuación que se desarrolla dentro del software CROPWAT, por esta razón es la mejor opción de cálculo donde se tienen en cuenta todas estas condiciones que describen la complejidad del sistema.

Para desarrollar este modelo se pueden obtener datos específicos para la zona por medio de análisis de suelos, caracterización de suelos y datos climáticos locales o se puede utilizar una base de datos climática como CLIMWAT 2.0 que proporciona datos agroclimáticos específicos para cada región del mundo, desarrollada por la FAO (FAO, n.d.; Grieser, 2006).

Para el cálculo por medio de CROPWAT se puede hacer uso de datos locales y específicos de la zona de estudio (que es lo más recomendado), se puede utilizar CLIMWAT 2.0 o se puede hacer una mezcla de datos, esto dependerá de los datos disponibles.

CROPWAT desarrolla los cálculos teniendo en cuenta un balance de masa y energía de las condiciones del suelo, las condiciones hidroclimáticas en relación con la vegetación como se ve en la **Figura 7-3**.

Figura 7-3: Balance de materia y energía de CRPWAT.

Fuente: (Clarke et al., 2000; Trezza, 2014).

Al interior del modelo de COPWAT se encuentran submodelos y ecuaciones asociadas al cálculo de la evapotranspiración, radiación solar, crecimiento de un cultivo o de una cobertura vegetal específica. Los datos asociados a los cálculos internos giran en torno a la relación suelo – planta – condiciones climáticas, donde se obtiene el contenido de humedad de la zona radicular a partir de la precipitación, la escurrimiento superficial, movimiento y flujos de agua en el suelo asociados a las propiedades intrínsecas de este (Clarke et al., 2000; Mekonnen & Hoekstra, 2011; Trezza, 2014).

También se calcula el coeficiente de estrés hídrico teniendo en cuenta el agua disponible total, el agotamiento de la zona radicular, el agua fácilmente aprovechable, la capacidad de campo, la textura y el tipo de suelo, los rendimientos alcanzables bajo condiciones reales y el rendimiento o las tasas de crecimiento del cultivo o la cobertura vegetal (Clarke et al., 2000; Mekonnen & Hoekstra, 2011; Trezza, 2014).

Todos estos son factores de alta influencia dentro del modelo, sin embargo los datos que el modelo solicita para calcular la evapotranspiración potencial del cultivo (ET_0) y la radiación de absorción son factor de horas de radiación solar, temperatura media y máxima del aire a dos metros de altura, velocidad del viento a dos metros de altura, humedad relativa (puede ser tomado de CLIMWAT) cómo se observa en la **Figura 7-4** (Clarke et al., 2000; Mekonnen & Hoekstra, 2011; Trezza, 2014). Estos datos requeridos son promedios

mensuales acorde a lo solicitado por el software, son datos de estaciones de monitoreo hidrometeorológico que pueden ser obtenidos con facilidad.

Figura 7-4: Datos de entrada para el cálculo de la ETo.

Month	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidity %	Wind km/day	Sun hours	Rad MJ/m ² /day	ETo mm/day
January							
February							
March							
April							
May							
June							
July							
August							
September							
October							
November							
December							
Average							

Fuente: CROPWAT

Para realizar el cálculo de la precipitación efectiva, se requiere de los datos de precipitación específicos para el punto de análisis como se puede observar en la **Figura 7-5**. Para obtener esta información se recomienda tomar datos de campo por medio de pluviómetros para tener mayor precisión (Clarke et al., 2000; Hoekstra et al., 2011; Romero et al., 2016; Trezza, 2014). Sin embargo, si no se cuenta con esta posibilidad se puede hacer uso de información disponible en estaciones de monitoreo climáticas cercanas.

Figura 7-5: Datos de entrada para el cálculo de la precipitación.

The screenshot shows the 'Monthly rain - untitled' window in the CROPWAT software. The window title is 'Monthly rain - untitled'. It has a 'Station' input field and an 'Eff. rain method' dropdown menu set to 'USDA S.C. Method'. Below this is a table with the following structure:

	Rain	Eff rain
	mm	mm
January		
February		
March		
April		
May		
June		
July		
August		
September		
October		
November		
December		
Total		

The background window shows various input fields for 'Country', 'Station', 'Altitude', 'Latitude', and 'Longitude'. A sidebar on the left contains icons for 'Climate/ETo', 'Rain', 'Crop', 'Soil', 'CWR', 'Schedule', 'Crop Pattern', and 'Scheme'.

Fuente: CROPWAT

Los parámetros asociados a los cultivos se encuentran en la **Figura 7-6**, donde se pide el tiempo de desarrollo del cultivo en días transcurridos desde el inicio, hasta el tiempo de cosecha, estos son los datos correspondiente al factor “Stage” solicitado (Clarke et al., 2000; Hoekstra et al., 2011; Trezza, 2014). En el caso de que la cobertura vegetal no sea un cultivo, se debe tomar un tiempo aproximado de un año.

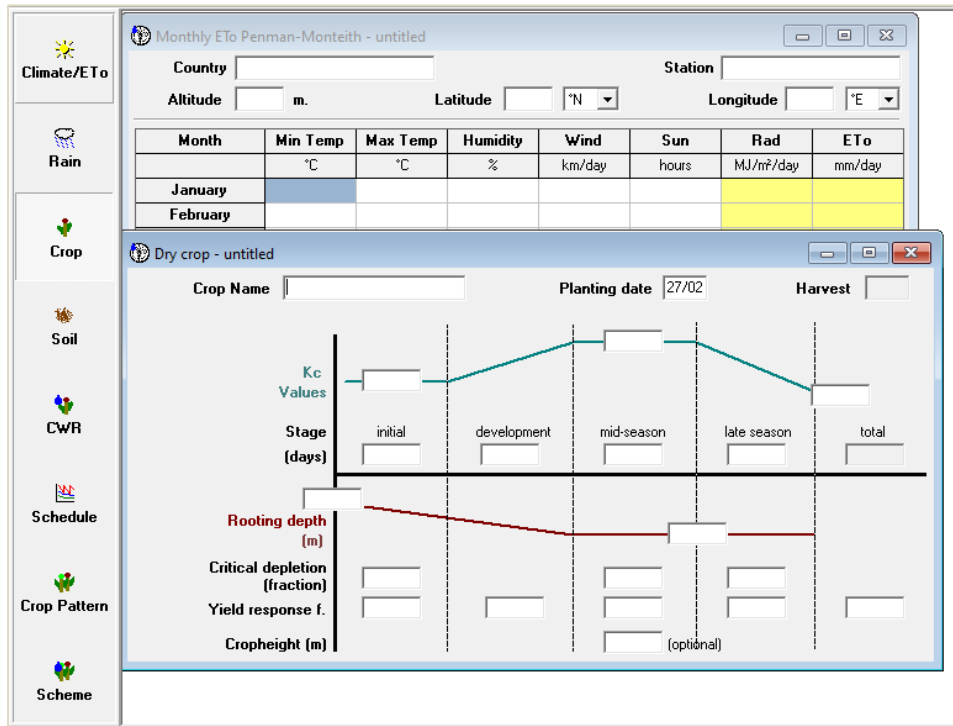
El coeficiente de cultivo (K_c) hace referencia a la diferencia existente entre la evapotranspiración y transpiración de un cultivo comparado con una cobertura (Clarke et al., 2000; Hoekstra et al., 2011; Romero et al., 2016; Trezza, 2014). Este parámetro varía entre 0 y 1.2, el cual tiende a aumentar de acuerdo con el tamaño del cultivo (Clarke et al., 2000; Hoekstra et al., 2011; Romero et al., 2016; Trezza, 2014).

Adicionalmente se piden datos específicos del cultivo como la profundidad de las raíces que puede ser estimado de acuerdo a estudios previos del tipo de cultivo o cobertura vegetal específica y el umbral o “Critical depletion” asociada a la humedad del suelo, cuando este se encuentra a capacidad de campo su valor es 0% porque cuenta con la

humedad suficiente para desarrollar el cultivo, si el suelo se encuentra seco, su valor es de 100% ya que le falta el volumen total de este recurso (Clarke et al., 2000; Hoekstra et al., 2011; Romero et al., 2016; Trezza, 2014).

Otro dato importante es la reducción de la producción del cultivo debido a estrés hídrico el cual es “Yield response”, respecto a este factor es muy difícil de conocer si el cultivo es nuevo, por lo cual esta información, de no contar con ella, se puede consultar en la base de datos de CROPWAT, en el caso de que la cobertura vegetal no sea del tipo productiva, los valores serán cero (Clarke et al., 2000; Hoekstra et al., 2011; Romero et al., 2016; Trezza, 2014). Finalmente la última variable que se solicita para los cultivos es la altura de los mismo.

Figura 7-6: Datos de entrada para el cálculo de los cultivos.



Fuente: CROPWAT

Sin embargo la posibilidad de obtener los datos específicos para el cultivo es complejo, ya que se puede dañar el cultivo en la zona de referencia al tomar los datos si se invade el mismo, y si desde un inicio no se ejecuta de tal forma que los datos puedan ser medidos la mejor opción es hacer uso de la base de datos de CLIMWAT.

Los datos de suelo (**Figura 7-7**) se requieren para conocer las dinámicas hídricas al interior del mismo teniendo en cuenta características como la textura del mismo que es el primer dato solicitado. Los datos que se solicitan posteriormente como la humedad disponible total, la tasa máxima de infiltración, la profundidad radicular y el agotamiento de la humedad del suelo son datos que se pueden obtener a través de análisis físicos del suelo, por medio de revisión bibliográfica o con ayuda de la base de datos que tiene este software (Clarke et al., 2000; Hoekstra et al., 2011; Romero et al., 2016; Trezza, 2014). Siendo la mejor opción la toma de datos directos, pero para evitar datos en el cultivo o la zona vegetal la siguiente opción es usar la CLIMWAT.

Figura 7-7: Requerimiento de datos de propiedades del suelo.

The screenshot displays the CROPWAT software interface. On the left is a vertical menu with icons for 'Clima/ETo', 'Prec.', 'Cultivo', 'Suelo', 'RAC', 'Programación', 'atrón de Cultiv', and 'Sistema'. The main window is titled 'Eto PenMon Mensual' and contains a form for entering station data (País, Estación, Altitud, Latitud, Longitud) and a table of monthly climate data. The table has columns for Month, Min Temp, Max Temp, Humidity, Wind, Sun, Rad, and ETo. Below this, a 'Formulario de cultivo' window is open, and a 'Suelo - untitled' dialog box is in the foreground, prompting for soil properties:

Month	Min Temp	Max Temp	Humidity	Wind	Sun	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/day	hours	MJ/m ² /day	mm/day
January							
February							

The 'Suelo - untitled' dialog box contains the following fields:

- Nombre del suelo:
- Datos generales de suelo:
 - Humedad de suelo disponible total (CC-PMP): mm/metro
 - Tasa maxima de infiltración de la precipitación: mm/día
 - Profundidad radicular máxima: centímetros
 - Agotamiento inicial de hum. de suelo (como % de ADT): %
 - Humedad de suelo inicialmente disponible: mm/metro
- Agotam. crítico (fracción):
- F. respuesta rend.:
- Altura de cult. (m): (opcional)

Fuente: CROPWAT

Con estos datos de ingreso el software calcula los requerimientos hídricos de las plantas y por ende los datos necesarios para el cálculo de la huella hídrica verde con las variables de ETc y precipitación efectiva y verde por riego en la columna de requerimiento de riego, todo esto en la pestaña de Requerimiento de agua de cultivo (RAC) (**Figura 7-8**).

Figura 7-8: Requerimiento de agua de cultivo (RAC).

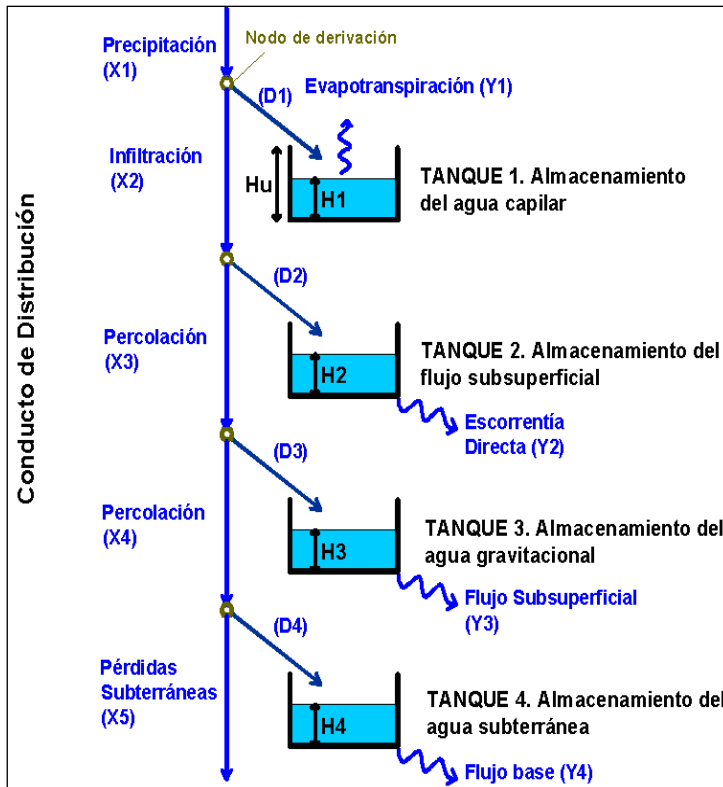
Requerimiento de Agua del Cultivo							
Estación ETo Torre Siata			Cultivo Turf grass warm				
Est. de lluvia Torre Siata			Fecha de siembra 01/03				
Mes	Decada	Etapa	Kc	ETc	ETc	Prec. efec	Req.Riego
			coef	mm/día	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Mar	1	Inic	0.80	4.38	43.8	51.7	0.0
Mar	2	Des	0.81	4.48	44.8	52.3	0.0
Mar	3	Des	0.82	4.56	50.2	47.0	3.2
Abr	1	Des	0.83	4.64	46.4	39.0	7.4
Abr	2	Med	0.85	4.72	47.2	33.3	13.9
Abr	3	Med	0.85	4.74	47.4	36.4	11.0
May	1	Med	0.85	4.74	47.4	40.2	7.2
May	2	Med	0.85	4.73	47.3	42.2	5.2
May	3	Med	0.85	4.62	50.8	45.6	5.2
Jun	1	Med	0.85	4.50	45.0	53.2	0.0
Jun	2	Med	0.85	4.38	43.8	58.5	0.0
Jun	3	Med	0.85	4.49	44.9	45.2	0.0
Jul	1	Med	0.85	4.59	45.9	25.9	20.0
Jul	2	Med	0.85	4.70	47.0	12.7	34.3
Jul	3	Med	0.85	4.75	52.2	17.4	34.8
Ago	1	Med	0.85	4.79	47.9	24.9	23.1
Ago	2	Med	0.85	4.84	48.4	28.0	20.4
Ago	3	Fin	0.85	4.87	53.6	27.6	26.0
Sep	1	Fin	0.86	4.91	49.1	26.9	22.2
Sep	2	Fin	0.86	4.93	49.3	26.9	22.4
Sep	3	Fin	0.86	4.89	48.9	26.9	22.0
Oct	1	Fin	0.86	4.84	48.4	26.9	21.6

Fuente: CROPWAT

E. Modelo lluvia escorrentía

El método lluvia – escorrentía de (Vélez, 2001) o modelo de tanques se basa en el balance hídrico donde simula los flujos de agua en cuatro tanques de almacenamiento (almacenamiento capilar, almacenamiento de flujo superficial, almacenamiento de agua gravitacional en la capa superior del suelo y almacenamiento subterráneo) interconectados que asemejan las interacciones de captación en cada capa del suelo como se puede observar en la **Figura 7-9** (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

La producción de escorrentía se basa en el balance hídrico en la cuenca, asumiendo que el agua se distribuye en cuatro tanques o niveles de almacenamiento conectados entre sí, en donde cada uno de estos tanques representan las diferentes partes del suelo y subsuelo que aportan a la escorrentía (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001)..

Figura 7-9: Esquematación modelo de tanques.

Tomado de: (Vélez, 2001)

En cada intervalo de tiempo, la precipitación (X_1), se distribuye a los distintos almacenamientos (o tanques), donde en función del volumen almacenado en cada uno de ellos (H_i), se determina su contribución a la escorrentía Y_i (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). El modelo realiza el balance de agua en cada tanque y actualiza los volúmenes almacenados en cada uno de ellos (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001)..

La cantidad de agua que se deriva en cada nodo (D_i), y la que continúa hacia los niveles inferiores (X_i) por el conducto distribuidor depende de la cantidad de agua disponible, del estado de almacenamiento del tanque y de la capacidad del conducto distribuidor aguas abajo del nodo, la cual se puede relacionar con la conductividad hidráulica en el subsuelo (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001)..

La descarga (Y_i) en cada uno de los tanques está en función del volumen almacenado y de las características de la cuenca que se pueden asociar con el tiempo de permanencia

del agua en un elemento de almacenamiento temporal (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

- **Tanque 1:** Almacenamiento Capilar en el Suelo: Representa el agua que transita por la cuenca y que sólo sale de ella por evapotranspiración, por lo tanto, no hace parte de la escorrentía. Este almacenamiento se refiere a la interceptación, la detención de agua en charcos y el agua que se retiene en el suelo debido a fuerzas capilares (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

De acuerdo con la configuración del modelo, la precipitación (X_1) se estima según los registros de las estaciones más cercanas, empleando un método de interpolación espacial (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

El valor obtenido de lluvia entra a un conducto del que se deriva una cantidad D_1 para el almacenamiento o tanque T1 (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). La capacidad máxima (H_u) se supone igual a la suma de la capacidad de almacenamiento de “agua útil” en el suelo y la capacidad de la cobertura de la superficie para almacenar agua (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

La capacidad de almacenamiento de “agua útil” está relacionada con la cantidad de agua que hay que agregar a una columna de suelo muy seco hasta alcanzar el mayor almacenamiento capilar posible sin que el agua fluya por la acción de la gravedad (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). La capacidad de la cobertura de la superficie por lo general está relacionada con la cobertura vegetal (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

La cantidad de agua que se deriva (D_1) (ecuación **(7-33)**) y entra al almacenamiento estático, corresponde de una forma muy elemental (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001); al mínimo entre el agua existente en el conducto distribuidor (X_1), el que se requiere para llenar el tanque de

almacenamiento capilar ($H_u - H_1$), y el máximo (H_u) (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). Que puede ingresar al suelo durante un intervalo de tiempo (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

Así, a menos que se llene el almacenamiento capilar, no se deja pasar nada a la escorrentía (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). En la realidad puede haber escorrentía sin que necesariamente se haya llenado el almacenamiento capilar en el suelo (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). Entonces se utiliza un coeficiente φ (ecuación **(7-34)**) para lograr que la cantidad de agua que se deje pasar corresponda a una fracción de la lluvia que está relacionada con el estado del almacenamiento capilar tal que, cuando este almacenamiento esté muy lleno deje pasar mucho, y cuando está muy vacío deje pasar poco (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). En este caso D_1 corresponde a:

$$D_1 = \text{Min} \left\{ \varphi \cdot X_1, H_u - H_1 \right\} \quad (7-33)$$

$$\varphi = 1 - \left(\frac{H_1}{H_u} \right)^a \quad (7-34)$$

La cantidad de agua que representa la evapotranspiración real (Y_1) (ecuación **(7-35)**) es función del agua disponible en el tanque H_1 y de la evapotranspiración potencial ETP (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). La ETR depende de la cantidad de agua disponible, así cuando hay déficit de agua en el suelo la evapotranspiración es menor que la evapotranspiración potencial ETP (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). Se ha utilizado una expresión en la que se obtiene un estimado de la evapotranspiración real a partir de la evapotranspiración potencial y de la relación entre la humedad del suelo y la humedad del suelo a la capacidad de campo (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). En el modelo esto equivale a la relación entre el agua que se encuentra en el almacenamiento estático y la capacidad máxima para ese almacenamiento, así (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001):

$$Y_1 = ETP \cdot \left(\frac{H_1}{H_u} \right)^b \quad (7-35)$$

Además, en el modelo se tiene en cuenta que el valor de la evapotranspiración real no puede ser mayor que el agua disponible para evaporar en este almacenamiento estático, así (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001):

$$Y_1 = \text{Min}\left\{ ETP \cdot \left(\frac{H_1}{H_u} \right)^b, H_1 \right\} \quad (7-36)$$

Para estimar la evapotranspiración potencial se recomienda utilizar la ecuación de regionalización de Cenicafé (Barco et al., 2000). De acuerdo con lo propuesto en el modelo, el agua que no ingresa al almacenamiento estático T_1 , sigue su camino por la zona capilar del suelo hacia abajo (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

$$X_2 = X_1 - D_1 \quad (7-37)$$

- **Tanque 2:** Almacenamiento del Flujo Superficial: En este almacenamiento se representa el agua que es susceptible a infiltrarse a un nivel inferior o que fluye por la ladera (escorrentía directa) (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). Se supone que la capa superior del suelo tiene una conductividad hidráulica K_s representativa o característica y que se asocia al tipo de suelo y a su estructura, lo cual está relacionado con la cobertura vegetal, el uso y manejo del suelo (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

Por lo tanto, la cantidad de agua que entra al almacenamiento T_2 , está relacionada con la capacidad del suelo para dejar pasar el agua a su interior K_s (una conductividad hidráulica de la capa superior del suelo asociada a la cobertura en condiciones de saturación) y con el flujo excedente del almacenamiento capilar X_2 según la siguiente relación (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001):

$$D_2 = \text{Max}\{0, X_2 - Ks\Delta t\} \quad (7-38)$$

Para el flujo superficial en la cuenca, suponiendo velocidad constante y aplicando la ecuación de continuidad, la escorrentía directa se puede representar mediante un embalse lineal (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001):

$$D_2 = \text{Max}\{0, X_2 - Ks\Delta t\} \quad (7-39)$$

$$D_2 = \text{Max}\{0, X_2 - Ks\Delta t\} \quad (7-40)$$

En donde el coeficiente de descarga α es función del tiempo de residencia del agua en el interior del suelo (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

$$\alpha = \frac{1}{\text{tiempode residencia}} \quad (7-41)$$

El agua que no ingresa al almacenamiento estático T_2 , sigue su camino por la zona de la capa superior del suelo hacia la capa inferior (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

$$X_3 = X_2 - D_2 \quad (7-42)$$

- **Tanque 3:** Almacenamiento de Agua Gravitacional en la Capa Superior del Suelo (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). Este almacenamiento representa al agua almacenada en la capa superior del suelo mientras fluye lentamente hacia la red de drenaje, se desarrolla inicialmente sobre una capa delgada que fluye lateralmente hacia abajo por el interior de esta capa hasta que sale a los elementos de la red de drenaje (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

De acuerdo con lo propuesto en el modelo, durante el intervalo de tiempo, se tiene una cantidad de agua gravitacional X_3 que se mueve verticalmente hacia el interior del

suelo (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). De esta cantidad, una parte, podrá percolar o seguir hacia la zona inferior del suelo, mientras que el resto del agua se deriva al almacenamiento superior del suelo donde se convertirá en flujo subsuperficial (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

Se supone igualmente que la capa inferior del suelo tiene una capacidad de percolación representativa que se asocia al tipo de subsuelo y su estructura, lo cual está estrechamente relacionado con las características geológicas (litológicas y estructurales) y geomorfológicas de las capas inferiores del suelo (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). En algunos casos la capacidad de percolación y su variabilidad espacial se pueden inferir por características del relieve, algunos rasgos morfológicos, el desarrollo de la vegetación, el uso y manejo del suelo y la producción de flujo base aguas abajo (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

La cantidad de agua que ingresa al almacenamiento durante el intervalo de tiempo se puede asociar con el flujo excedente del almacenamiento del flujo superficial en ladera X_3 y la conductividad hidráulica en la capa inferior del suelo (subsuelo) en condiciones de saturación que se conoce como capacidad de percolación K_p y que se expresa (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001):

$$D_3 = \text{Max}\{0, X_3 - K_p \Delta t\} \quad (7-43)$$

Para la producción de escorrentía subsuperficial en la ladera se hace una formulación análoga a la presentada en el almacenamiento T_2 para obtener la siguiente relación lineal (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001):

$$Y_3 = \alpha \cdot H_3 \quad (7-44)$$

- **Tanque 4:** Almacenamiento Subterráneo: se representa por un tanque donde se considera el almacenamiento del agua gravitacional mientras fluye a través del interior del suelo hacia la red de drenaje, en lo que se podría considerar como el acuífero, y

donde sale a formar el flujo base (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

El volumen de agua que durante el intervalo de tiempo ingresa por percolación X_3 tiene la posibilidad de que una cantidad de agua siga hacia las pérdidas subterráneas X_5 y que el resto sea derivado hacia el almacenamiento subterráneo T_4 (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001). La cantidad de agua que se deriva para el flujo subterráneo depende de la cantidad de agua que ha percolado y de la cantidad que pasa a las pérdidas (aporte a las reservas de los acuíferos) (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

$$D_4 = \text{Min}\{0, X_4 - K_{pp}\} \quad (7-45)$$

Para la representación del flujo a través del almacenamiento subterráneo, se utiliza la ecuación de continuidad y una ecuación que relaciona la tasa de flujo que sale de este almacenamiento con la cantidad de agua almacenada (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001):

$$Y_4 = \alpha \cdot H_4 \quad (7-46)$$

La importancia de la representación del flujo subterráneo en la modelación de crecidas está en reproducir adecuadamente las recesiones del flujo en los cauces y que esto sea coherente con el volumen de agua que ha ingresado al almacenamiento subterráneo (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

Finalmente, el caudal promedio diario total en la cuenca para cada intervalo de tiempo es la suma del flujo producido en cada tanque o almacenamiento (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

$$Q = Y_2 + Y_3 + Y_4 \quad (7-47)$$

Al igual que en el balance hidrológico de largo plazo, el modelo de tanques no incluye la cuantificación de flujos por intervenciones antrópicas, ni aportes de otras fuentes como la del manantial Cañaverales, por tanto, se reitera que los resultados corresponden al régimen natural (Corantioquia & Alcaldía de Medellín, 2007; Estrada Restrepo, 2009; Vélez, 2001).

Este modelo de lluvia esorrentía cuenta con varios parámetros hidráulicos mencionados los cuales son el almacenamiento capilar del suelo, la conductividad del suelo en su capa superficial e inferior; el tiempo medio de residencia del flujo superficial, subterráneo y del flujo base (Vélez, 2001; Vélez et al., 2002). Cada uno de estos parámetros tiene un intervalo de variación (**Tabla 7-5**), el rango de variación de estos parámetros se ha definido con base en trabajos previos y los reportes de la literatura científica (Vélez, 2001; Vélez et al., 2002).

Tabla 7-5: Valores sugeridos para los parámetros hidráulicos del modelo de tanques.

Parámetros Hidráulicos	Mínimo	Máximo
Almacenamiento capilar (mm)	20,0	600,0
Conductividad capa superior (mm/día)	1,0	100,0
Conductividad capa inferior (mm/día)	0,01	10,0
Perdidas subterráneas (mm)	0,0	10,0
Tiempo medio de residencia flujo superficial (días)	1,0	10,0
Tiempo medio de residencia flujo subsuperficial (días)	1,0	10,0
Tiempo medio de residencia flujo base (días)	50,0	200,0

Fuente: (Vélez, 2001; Vélez et al., 2002).

Otros parámetros del modelo son los parámetros correspondientes a la evaporación real y a la infiltración de la cuenca que son el exponente de infiltración y evaporación. A diferencia de los parámetros hidráulicos del modelo, los exponentes de evaporación y de infiltración han sido explorados de manera más amplia por los autores (Jaramillo et al., 2003) y el rango de variación de cada uno de éstos no es tan amplio, tal como se observa en la **Tabla 7-6** y de los cuales ya algunos autores recomiendan dichos valores (Vélez, 2001; Vélez et al., 2002).

Tabla 7-6: Valores sugeridos para otros parámetros del modelo de tanques.

Otros parámetros del modelo	Mínimo	Máximo
Exponente infiltración	1	3
Exponente evaporación	0,25	1,5

Fuente: (Vélez, 2001; Vélez et al., 2002).

F. Calibración del modelo lluvia escorrentía

Para la estimación y calibración del modelo lluvia escorrentía fue necesario reconstruir las series de precipitación obtenidas de las estaciones meteorológicas (ver **Tabla 5-6**). También calcular la evapotranspiración por medio de la ecuación de Cenicafé (**ecuación (4-18)**) para la cuenca, junto con el caudal diario y el área de la cuenca tal y como se describe a continuación.

- La reconstrucción de las series de precipitación se realiza con el fin de aumentar la consistencia de los registros de precipitación diaria de las estaciones a ser usadas en la modelación hidrológica, se realiza la reconstrucción de los datos faltantes mediante el método de razones promedio (UNESCO, 1982), se parte de estaciones vecinas, utilizando la precipitación media anual como estándar de comparación. El método estima los datos faltantes en el registro de una estación, a partir de la ecuación 0, donde P_x es el dato faltante, N_x es el promedio de la precipitación anual en la estación dada, P_n es el registro existente en la fecha faltante de cada una de las estaciones vecinas, N_m , la media correspondiente a cada estación vecina y M es el número de estaciones que se utilizan para realizar la reconstrucción.

$$P_x = \frac{N_x}{M} \left(\frac{P_1}{N_1} + \frac{P_2}{N_2} + \dots + \frac{P_m}{N_m} \right) \quad (7-48)$$

El período de reconstrucción depende; de la simultaneidad de los registros de las estaciones y del periodo que es de interés para ser reconstruido. Para este estudio se analizan los registros de las meteorológicas (ver **Tabla 5-6**) y se obtiene un periodo coincidente de **1990 a 2022**.

- El modelo hidrológico (modelo de tanques (Jaramillo, Vélez, & Vélez, 2003)) requiere de una caracterización del agua evaporada de la cuenca. La evapotranspiración es uno de los componentes más importantes del balance hídrico, y se define como la suma de la evaporación física de agua desde la superficie y la transpiración de las plantas y los seres vivos (Jaramillo-Robledo, 2005) En el balance de masas se representa la cantidad de agua saliente del volumen de control hacia la atmósfera en forma de vapor de agua.

La dinámica de la evapotranspiración está condicionada por tres factores fundamentales: disponibilidad de agua, disponibilidad de energía para el cambio de estado del agua y condiciones atmosféricas propicias para el almacenamiento y transporte de vapor de agua (Jaramillo-Robledo, 2005).

Dada la dificultad para realizar mediciones directas de esta variable, se han obtenido diferentes fórmulas en condiciones climáticas diferentes a las tropicales. A partir del estudio realizado por (Barco et al., 2000) demostró que los cálculos más confiables para estimar esta variable en Colombia eran Cenicafé y Turc, lo cual se ha ratificado en múltiples trabajos que se han desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (Mesa S et al., 1999).

- El caudal diario es una de las variables más importantes en conjunto con la precipitación en la etapa de la calibración del modelo. Aunque para calibrar el modelo no se exige una cantidad mínima de años, cuanto más largo sea el período de calibración serán más confiables las calibraciones. Para realizar la calibración no se requiere completar los datos faltantes en la serie de caudales.

Con todos los datos obtenidos se requiere seleccionar cual va a ser la cuenca de calibración para obtener los caudales desconocidos por la inexistente disponibilidad de información por falta de instrumentación para la quebrada la Iguaná de acuerdo con la red hidrográfica trazada y el punto de vertimiento de la PTAR Aguas Claras. Para esto se debe seleccionar cual va a ser esa cuenca de interés que permite obtener la información.

De esta manera, al realizar un análisis de similitud hidrológica, se encontró que la cuenca de la quebrada Doña María, en el municipio de Itagüí, es la que presenta mayor similitud con la quebrada la Iguaná, debido a su cercanía, similar área de cuenca y además están

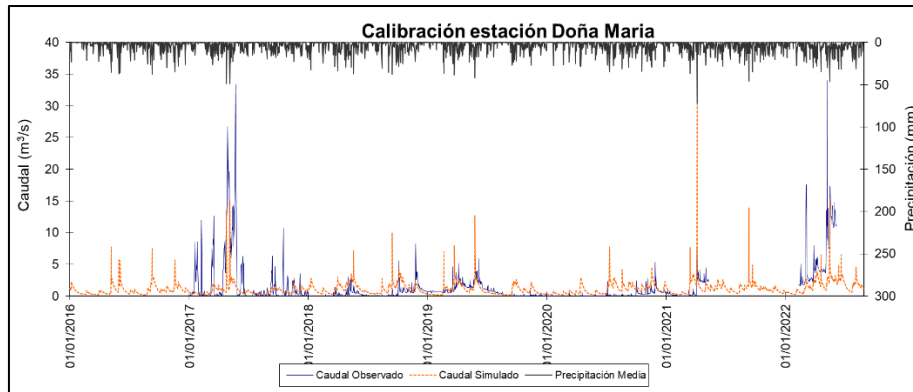
en la misma vertiente (izquierda) del Valle de Aburrá, donde pueden ser comparables sus regímenes de precipitación.

Para la cuenca del río Aburrá, se encontró que esta posee un medidor de caudal, perteneciente a la red Piragua, de la CAR Corantioquia, a la altura del municipio de Copacabana, con el cual es posible realizar la simulación hidrológica de caudales para la cuenca de estudio. Con los resultados de esta calibración, se realizarán las simulaciones de caudales para las cuencas del Río Aburrá a la altura de la PTAR aguas claras, y para las cuencas abastecedoras del Río Grande y Río Chico.

Teniendo los datos y las cuencas o puntos de referencia se procede a ejecutar el modelo de lluvia – escorrentía de (Velez et al., 2002) para estos y así obtener los parámetros necesarios para modelar las cuencas de interés desconocidas.

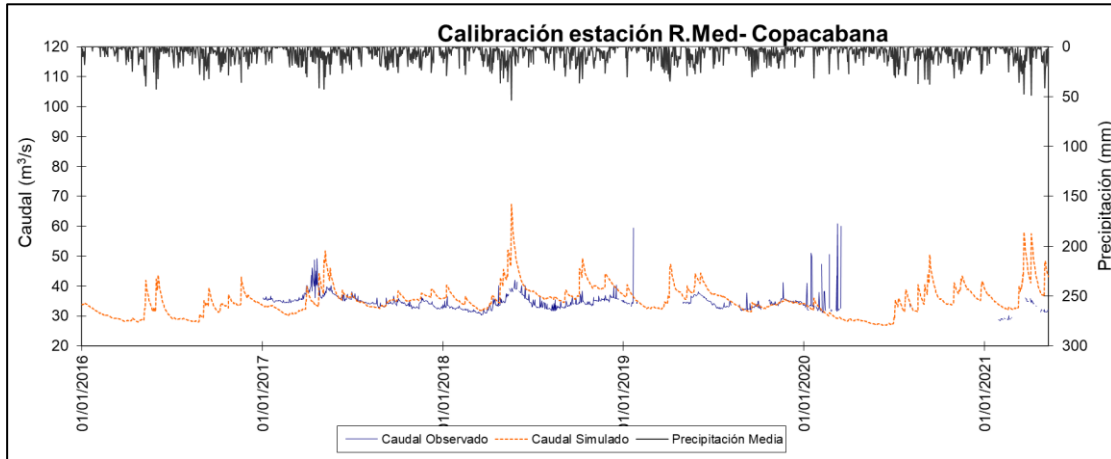
Se aplicó el modelo de tanques a la cuenca de la quebrada Doña María (**Figura 7-10** y **Tabla 7-7**) y al río Aburrá en la estación Piragua a la altura de Copacabana (**Figura 7-11** y **Tabla 7-8**) se obtuvieron los siguientes resultados para la calibración del modelo de tanques.

En la **Figura 7-10** se puede observar para la quebrada Doña María que la serie de caudales simulados por el método de tanques de lluvia escorrentía presenta una gran similitud con la serie de datos reales de caudal. A partir de esta simulación se obtuvieron los parámetros asociados al modelo calibrado (**Tabla 7-7**) que serán parte de los insumos necesarios para obtener los caudales sintéticos para la quebrada la Iguaná.

Figura 7-10: Calibración quebrada Doña Maria.**Tabla 7-7:** Parámetros resultado del modelo de la quebrada Doña María.

Parámetro	Valor
Estación	Piragua-Doña María
Corriente	Quebrada Doña María
Periodo de Calibración	2017-2022
Años de calibración	5
Área de la Cuenca [km ²]	64,86
Parámetros de calibración	
Almacenamiento Capilar [mm/día]	15
Conductividad Capa Superior [mm/día]	25
Conductividad Capa Inferior [mm/día]	6
Perdidas Subterráneas [mm]	3.5
Tiempo Medio de Residencia Flujo Superficial [días]	1
Tiempo Medio de Residencia Flujo Subsuperficial [días]	10
Tiempo Medio de Residencia Flujo Base [días]	70
Condiciones iniciales	
Almacenamiento Capilar – T1	9.278
Almacenamiento Agua superficial – T2	0.101
Almacenamiento Gravitacional Z Sup – T3	9.892
Almacenamiento Gravitacional Z Inf (acuífero) – T4	31.216
Otros parámetros del modelo	
Exponente infiltración	1.05
Exponente evaporación	1.4
Altura Media [msnm]	2133

En la **Figura 7-11** se puede observar para el Río Aburrá que la serie de caudales simulados por el método de tanques de lluvia escorrentía presenta una gran similitud con la serie de datos reales de caudal. A partir de esta simulación se obtuvieron los parámetros asociados al modelo calibrado (**Tabla 7-8**) que serán parte de los insumos necesarios para obtener los caudales sintéticos para la zona de descarga de la PTAR Aguas Claras.

Figura 7-11: Calibración río Aburrá- Copacabana.**Tabla 7-8:** Parámetros resultado del modelo del Río Aburrá a la altura de Copacabana.

Parámetro	Valor
Estación	Piragua-Río Aburrá-Copacabana
Corriente	Río Aburrá
Periodo de Calibración	2017-2022
Años de calibración	5
Área de la Cuenca [km ²]	709.5
Parámetros de calibración	
Almacenamiento Capilar [mm/día]	600
Conductividad Capa Superior [mm/día]	15
Conductividad Capa Inferior [mm/día]	35
Perdidas Subterráneas [mm]	-0.4
Tiempo Medio de Residencia Flujo Superficial [días]	10
Tiempo Medio de Residencia Flujo Subsuperficial [días]	20
Tiempo Medio de Residencia Flujo Base [días]	250
Condiciones iniciales	
Almacenamiento Capilar – T1	488.3
Almacenamiento Agua superficial – T2	0.1
Almacenamiento Gravitacional Z Sup – T3	0.0
Almacenamiento Gravitacional Z Inf (acuífero) – T4	1021.1
Otros parámetros del modelo	
Exponente infiltración	1.05
Exponente evaporación	1.4
Altura Media [msnm]	2098

Con estos parámetros resultantes de calibración, se procedió a simular los caudales de las cuencas estudio (quebrada Iguaná, Río Aburrá a la altura de la PTAR Aguas Claras) mediante la transposición de parámetros a estas nuevas cuencas, también se ajustan las entradas de precipitación correspondientes a las cuencas de estudio, así como su área y la altura media.

Luego de la simulación, se obtuvieron los caudales sintéticos medios diarios para el periodo comprendido entre los años 1991 y 2022, las cuales se representan mediante las curvas de duración de caudales mostradas en la **Figura 7-12** para la quebrada la Iguaná y **Figura 7-13** para el Río Aburrá.

Las curvas de duración de caudales (o FDC por sus siglas en ingles) son una de las herramientas mas utilizadas en la hidrologia, puesto que proveen información sobre el porcentaje de tiempo que un caudal excede un valor específico. Estas curvas se representan en escala Log Normal y se utilizan con frecuencia para resumir la información hidrológica de una cuenca, con la probabilidad de excedencia del caudal en el eje X y dicho caudal en el eje Y (Marín V., 2011).

Figura 7-12: Curva de duración de caudales quebrada Iguaná.

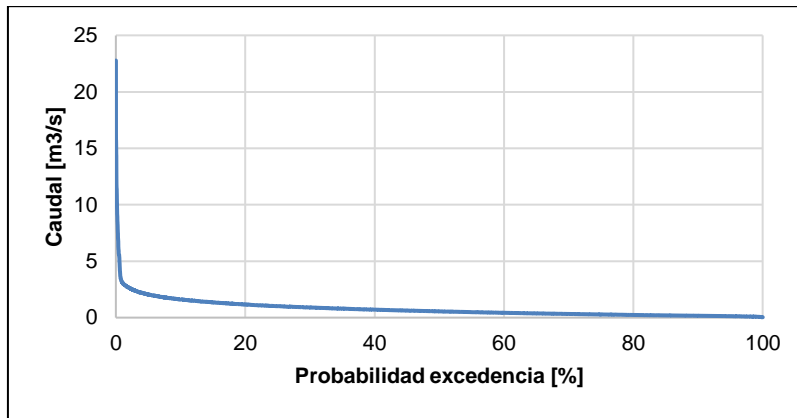
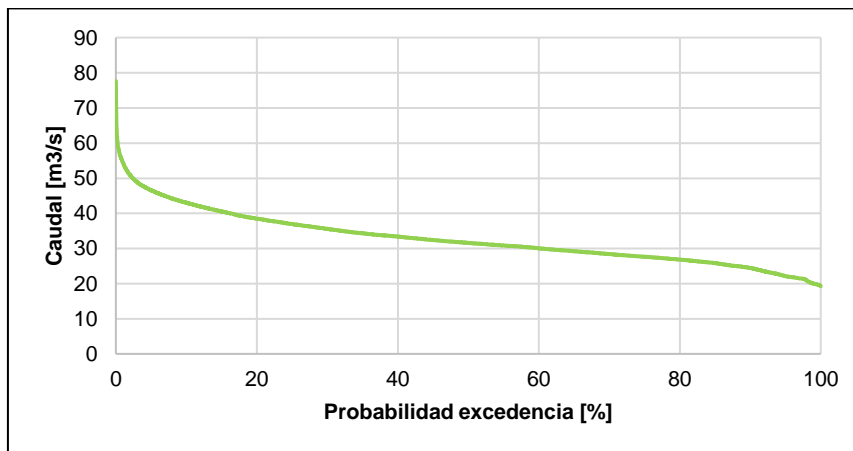


Figura 7-13: Curva de duración de caudales Río Aburrá.



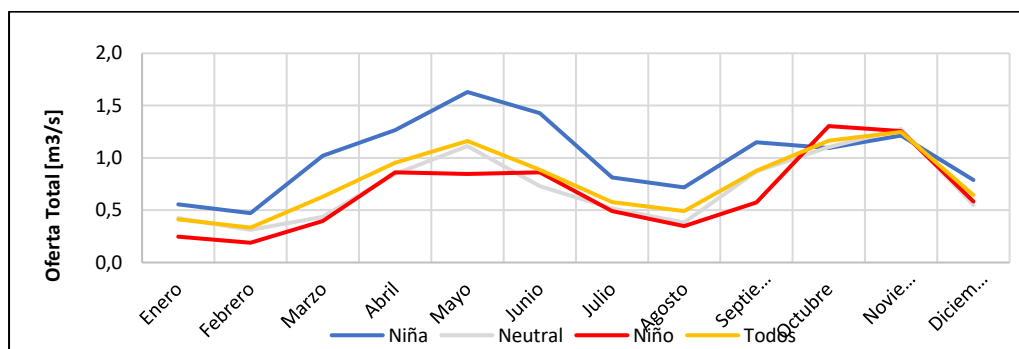
G. Oferta hídrica total

La oferta hídrica total se define como el “volumen de agua que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficial. Es el agua que fluye por la superficie del suelo que no se infiltra o se evapora y se concentra en los cauces de los ríos o en los cuerpos de agua lénticos” (IDEAM, 2014), dicho volumen se expresa en unidades consistentes con la demanda hídrica, es decir en $m^3/año$ o $Hm^3/año$.

El Estudio Nacional de Aguas de Colombia (IDEAM, 2014) dice que, la oferta hídrica total se obtiene de la condición promedio multianual o mensual (ciclo anual), ya sea por balance hídrico, modelos lluvia – escorrentía o espacialización de la escorrentía medida en estaciones.

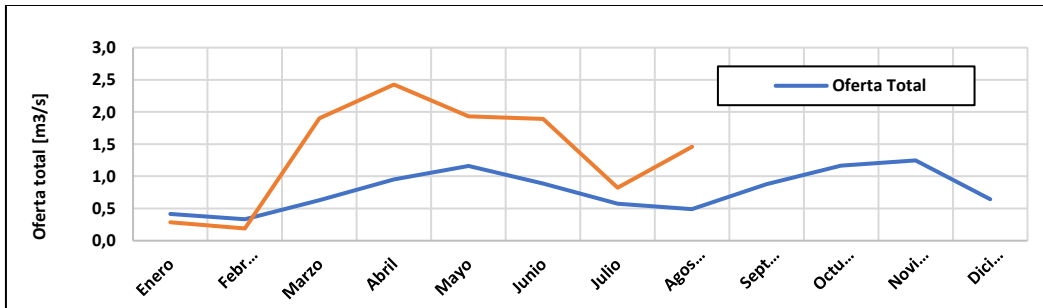
Para este estudio, fue usado el método de los modelos lluvia – escorrentía (modelo agregado de tanques), obteniéndose resultados consistentes. En las **Figura 7-14** y **Figura 7-15** se muestran las ofertas totales discriminadas por fases del fenómeno ENSO (Niña, Niño y Neutral) para la Quebrada la Iguaná y se comparan con la oferta total promedio sin separarla por condición hidrológica (es decir, estimada con todos los datos disponibles, línea amarilla), así como la comparación de la oferta promedio con la oferta total del 2022.

Figura 7-14: Oferta total para diferentes condiciones hidrológicas de la Quebrada Iguaná.



Se observa que la oferta suele ser mayor durante la fase húmeda del ENSO (La Niña) y tiende a disminuir durante su fase seca (El Niño). Para la Fase neutral, se observa que posee magnitudes similares a la oferta estimada con todos los datos disponibles (línea amarilla).

Figura 7-15: Oferta total promedio de la Quebrada la Iguaná.



Analizando la comparación de oferta total promedio (estimadas con todos los datos) y la oferta total del 2022, se aprecia un aumento en lo corrido del año, esto es atribuido a que, desde el segundo semestre del 2020 hasta la fecha, se ha presentado una fase húmeda prolongada del ENSO (La Niña).

En las **Figura 7-16** y **Figura 7-17** se muestran las ofertas totales para cada condición hidrológica y la comparación de la oferta promedio con la oferta del 2022 para la cuenca receptora del río Aburrá a la altura de la PTAR.

Figura 7-16: Ofertas totales Río Aburrá-PTAR.

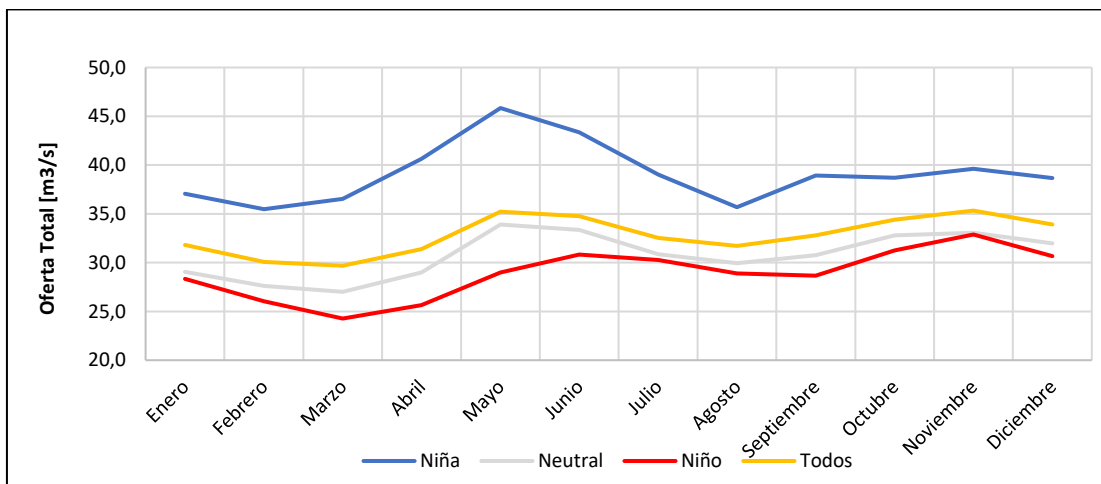
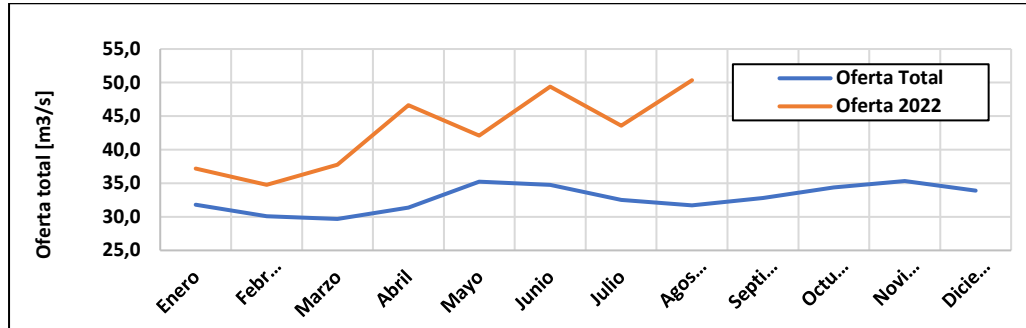


Figura 7-17: Comparación oferta total promedio vs oferta total 2022. Río Aburrá PTAR.



En la **Figura 7-18** se muestran las ofertas totales para cada condición hidrológica (húmeda, seca y neutral) para el embalse Río Grande (Río Chico y Río grande) así como la oferta estimada con todos los datos disponibles (sin discriminar por condiciones hidrológica). Además, nuevamente se muestra la comparación de ofertas totales promedio versus la oferta total del 2022 (**Figura 7-19**).

Este escenario contempla el abastecimiento real de la facultad de minas, la cual proviene del embalse rio Grande que es abastecido por el rio Grande y el rio Chico. Por esto las simulaciones de series sintéticas de caudales se hicieron por separado para cada cuenca, pero aquí, se unirán los valores para mostrar la disponibilidad de agua real del embalse Río Grande.

Figura 7-18: Oferta hídrica total para el embalse Río Grande.

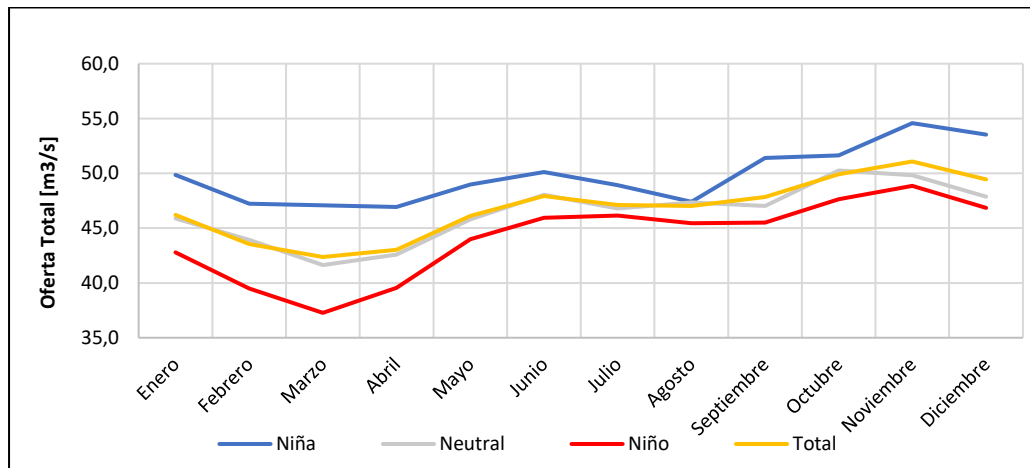
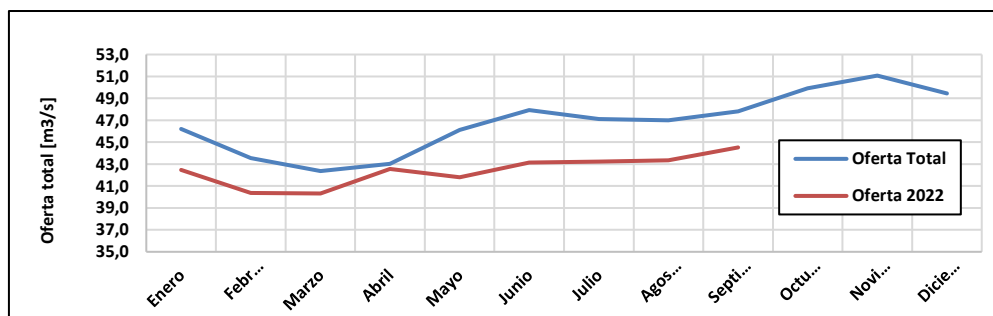


Figura 7-19: Comparación oferta total promedio vs oferta total 2022. Embalse Río Grande.

Se observa que para todos los escenarios, aquí la oferta suele ser mayor durante la fase húmeda del ENSO (La Niña) y tiende a disminuir durante su fase seca (El Niño). Para la Fase neutral, se observa que posee magnitudes similares a la oferta estimada con todos los datos disponibles (línea amarilla). Analizando las ofertas totales promedio (estimadas con todos los datos) comparadas con las del 2022, se aprecia un aumento en lo corrido del año para la cuenca receptora del Río Aburrá. Caso contrario del embalse del río Grande, donde la oferta total del 2022 es menor que la oferta total promedio esto insinúa que la cuenca abastecedora del Río Grande no ha sido tan influenciada por la ola invernal de los últimos dos años.

En la **Tabla 7-9** se muestra la oferta hídrica total para las cuencas de interés como promedios mensuales (ciclo anual) a partir de los resultados del modelo de tanques. Dicha oferta es representativa de la condición hidrológica promedio o normal y las establecidas para el año 2022.

Tabla 7-9: Oferta total de las cuencas de interés.

Mes	Quebrada La Iguaná		Río Aburrá		Embalse Río Grande	
	Oferta total [m3/s]	Oferta total 2022 [m3/s]	Oferta total [m3/s]	Oferta total 2022 [m3/s]	Oferta total [m3/s]	Oferta total 2022 [m3/s]
Enero	0.414	0.286	31.806	37.190	46.195	42.469
Febrero	0.333	0.190	30.067	34.770	43.559	40.359
Marzo	0.628	1.902	29.684	37.763	42.366	40.320
Abril	0.953	2.427	31.374	46.629	43.028	42.563
Mayo	1.160	1.933	35.222	42.098	46.114	41.794
Junio	0.886	1.890	34.756	49.399	47.937	43.142
Julio	0.576	0.824	32.540	43.582	47.112	43.237
Agosto	0.490	1.460	31.716	50.349	47.007	43.357
Septiembre	0.876	-	32.797	-	47.825	-
Octubre	1.164	-	34.395	-	49.910	-
Noviembre	1.248	-	35.332	-	51.075	-
Diciembre	0.646	-	33.923	-	49.443	-

H. Caudal ecológico

La consistencia encontrada en los resultados de las estimaciones de caudales (modelo de tanques de lluvia escorrentía), por lo cual se decide utilizar las series de caudales medios diarios simuladas para cada punto de interés, para las estimaciones de los caudales ecológicos.

Para la estimación de los caudales ecológicos, se aplican las tres metodologías sugeridas en la Guía Técnica para la Formulación de Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014), si bien este estudio, no tiene fines de ordenamiento, las metodologías expuestas en dicho documento son las de mayor uso en Colombia y se considera pertinente la aplicación de varias metodologías para tener mayores herramientas que permitan seleccionar una propuesta de caudales ecológicos en la zona.

- **Metodología 1:** Siguiendo la Resolución 865 del año 2004 (Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial, 2004) por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones, se acoge como primera aproximación al caudal ecológicos el valor máximo de caudal ecológico obtenido mediante la aplicación de los siguientes métodos:
 - **Mínimo histórico:** a partir de las curvas de duración de caudales medios diarios, se propone como caudal mínimo ecológico el único valor asociado al caudal promedio multianual que permanece el 97,5% del tiempo.
 - **Porcentaje de descuento:** se adopta como caudal mínimo ecológico un valor aproximado del 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente en estudio.

- **Reducción por caudal ecológicos:** el caudal ecológico en esta aproximación corresponde al 25% del caudal medio multianual en condiciones de oferta media.

En la **Tabla 7-10** se muestran el resultado al aplicar la metodología 1 a las series de caudales medios diarios de las cuencas estudio.

Tabla 7-10: Resultados metodología 1.

Cuenca	Mínimo histórico [m3/s]	Porcentaje descuento [m3/s]	Reducción por caudal ecológicos [m3/s]	Caudal seleccionado
Quebrada La Iguaná	0.103	0.083	0.195	0.195
Río Aburrá PTAR	21.355	7.421	8.199	21.355
Río Grande	23.154	7.315	8.098	23.154
Río Chico	9.835	3.276	3.604	9.835

- **Metodología 2:** El valor del caudal ecológico se determina en función del Índice de Retención y Regulación Hídrica, para valores de superiores a 0,7 (alta retención y regulación) se elige caudal ecológico el Q85% de la curva de duración. Para valores de inferiores a 0,7, se adopta el valor Q75% de la curva de duración de caudales medios diarios (IDEAM, 2018).

El Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH), mide la cantidad de humedad que pueden retener las cuencas (IDEAM, 2014). Valores bajos del índice de retención y regulación hídrica indican que la cuenca no tiene una capacidad significativa para retener humedad y regular los caudales, de modo que en épocas secas los caudales descienden considerablemente y en época de lluvias aumenta de forma considerable. Para determinar este indicador se utilizaron fundamentalmente las curvas de duración de caudales construidas para los puntos de interés.

La estimación del IRH resulta de la relación entre el volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio y el correspondiente al área total bajo la curva de duración de caudales diarios (IDEAM, 2015).

El cálculo del índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) está dado por la siguiente ecuación:

$$IRH = \frac{VP}{Vt} \quad (7-49)$$

Donde *IRH* es el Índice de Retención y Regulación Hídrica; *Vp* el volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio y *Vt* el volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diarios.

En la **Tabla 7-11** se presentan los resultados al aplicar la metodología 2 de caudales ecológicos.

Tabla 7-11: Resultados metodología 2.

Cuenca	IRH	Caudal Q75%	Caudal Q85%	Caudal seleccionado
Quebrada La Iguaná	0.67	0.280	0.198	0.280
Río Aburrá PTAR	0.91	27.655	25.841	25.841
Río Grande	0.93	28.233	26.670	26.670
Río Chico	0.92	12.260	11.628	11.628

Se aprecia que la mayoría de las cuencas de estudio presenta un índice de retención (IRH) mayor a 0.7, por lo que el caudal ecológico de la metodología 2 para estas, será el caudal que es excedido el 85% de las veces (Q85%), mientras que para la cuenca de la quebrada la Iguaná, que cuenta con IRH inferior a 0.7, se tomará como caudal ecológico para la metodología 2, el caudal que es excedido el 75% de las veces.

- **Método 3:** Resulta de la aplicación de la metodología hidrológica expuesta en (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible & Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2013), mediante la cual se aproxima el caudal ecológico en condiciones estacionales, es decir su cálculo se hace promedio mensual y no promedio multianual como las otras dos metodologías. Para cada mes se determina el valor 7Q10 y el valor Q95 de las series hidrológicas de interés, el caudal ecológico en cada mes será el mayor entre los dos valores obtenidos.

Para el cálculo del Q95, el insumo fundamental son las curvas de duración mensuales de los caudales diarios, discriminado por mes y, también se discriminará para cada una de las tres condiciones hidrológicas si es necesario (húmeda, promedio y seca), el Q95 representa el caudal medio diario que es excedido en el 95% para un mes y condición hidrológica específica.

Posteriormente se estima el 7Q10 discriminado por mes, pero no por condición hidrológica. Para su estimación se construye una serie de promedio móvil de 7 días sobre los registros diarios, a partir de la cual, se generan series mensuales del caudal mínimo en cada mes y finalmente, sobre dicha serie mensual se aplica una distribución de probabilidad Gumbel, para el análisis de frecuencia con periodo de retorno de 10 años.

En la **Tabla 7-12** se muestran los resultados para cada cuenca al aplicar esta metodología.

Tabla 7-12: Resultados metodología 3.

Mes	Caudal ecológico Quebrada la Iguaná [m3/s]		Caudal ecológico Río Aburrá [m3/s]		Caudal ecológico Río Grande [m3/s]		Caudal ecológico Río Chico [m3/s]	
	7Q10	Q95	7Q10	Q95	7Q10	Q95	7Q10	Q95
Enero	0.112	0.145	24.928	23.430	26.20	24.70	7Q10	Q95
Febrero	0.081	0.091	23.510	21.408	24.78	23.32	11.38	10.52
Marzo	0.040	0.065	22.444	20.206	23.88	23.03	10.74	9.80
Abril	0.083	0.167	22.539	20.391	24.12	23.17	10.32	9.75
Mayo	0.222	0.221	23.339	23.036	24.88	23.40	10.33	9.56
Junio	0.128	0.212	24.992	22.623	26.18	24.05	10.62	9.92
Julio	0.109	0.163	24.109	21.929	26.01	23.83	11.15	10.28
Agosto	0.080	0.123	23.681	21.813	26.18	25.19	11.27	10.62
Septiembre	0.000	0.104	23.895	23.742	26.51	24.63	11.39	11.14
Octubre	0.259	0.342	24.997	24.650	27.23	24.91	11.63	11.34
Noviembre	0.258	0.416	26.944	27.019	28.38	26.01	11.93	11.27
Diciembre	0.158	0.213	26.575	24.181	28.07	26.23	12.29	11.67

En las **Figura 7-20** se muestra la comparación grafica para una mejor selección de caudales ecológicos.

Figura 7-20: Resultados gráficos metodología 3. Quebrada Iguaná.

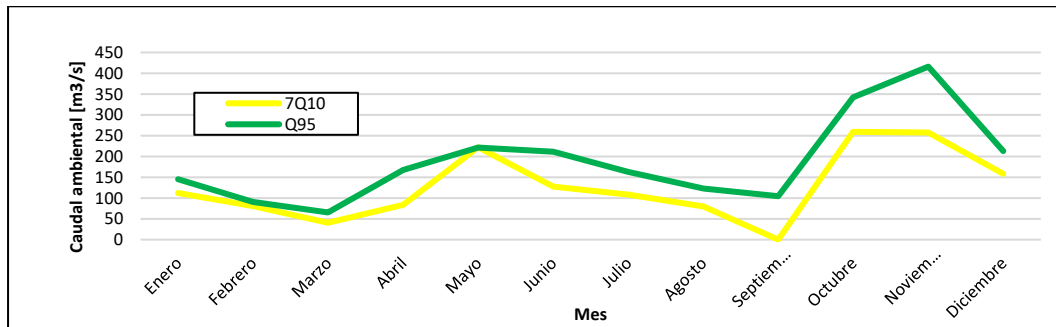


Figura 7-21: Resultados gráficos metodología 3. Río Aburrá PTAR.

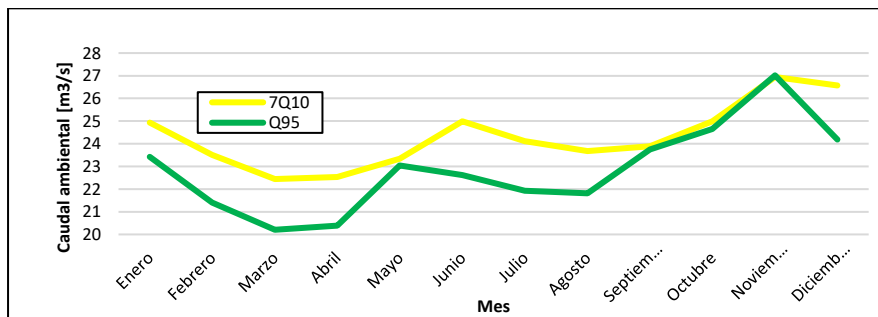


Figura 7-22: Resultados gráficos metodología 3. Río Grande.

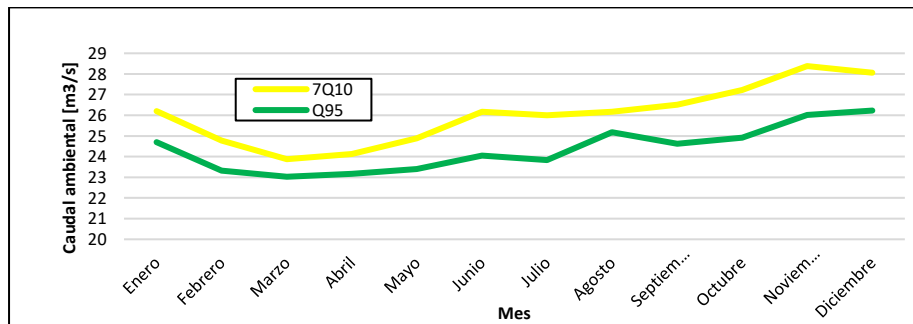
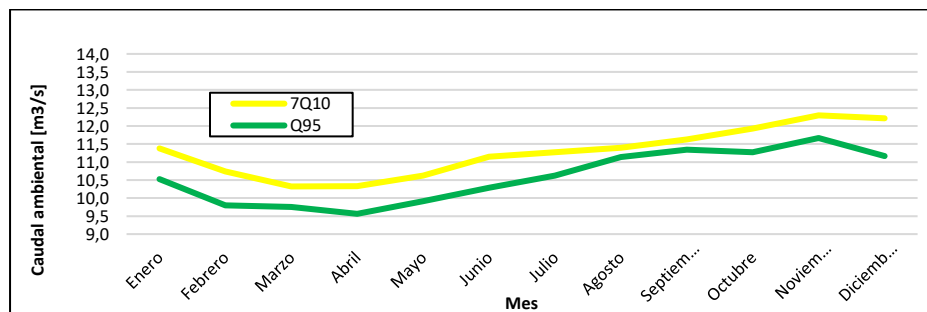


Figura 7-23: Resultados gráficos metodología 3. Río Chico.



Se aprecia que, para la mayoría de las cuencas, los valores mensuales de caudal ecológico son mayores al ser estimados con la metodología 7Q10, mientras que para quebrada La Iguaná son mayores los resultados obtenidos por la metodología de Q95. Por esto, se tomarán los resultados de la metodología Q95 para la quebrada La Iguaná y los resultados de caudal ecológico por la metodología 7Q10 para el resto de las cuencas estudio.

Así pues, se aplicaron satisfactoriamente las tres metodologías hidrológicas de mayor uso en Colombia (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo, 2014), dichos resultados muestran diferencias importantes, tanto en magnitud como en representatividad de condiciones estacionales, siendo la metodología 3, la única que define caudales ecológico con variación mensual.

Se considera que la metodología 1 y 2, sobre estiman los caudales ecológicos y se alejan de las condiciones mínimas históricas, siendo no representativos de las variaciones intra anuales de los caudales en la zona, mientras que la metodología 3, muestra variaciones intra anuales de los caudales ecológicos, acoplados al ciclo anual de los caudales medios en la zona, a su vez, dichos caudales son siempre mayores que el mínimo histórico, pero también, dicha excedencia no es desmesurada y es acorde con el régimen hidrológico que se puede evidenciar en campo.

Finalmente, los caudales ecológicos resultantes de la metodología Q95, asociada a la metodología 3, se consideran como los caudales ecológicos característicos de la condición hidrológica media, mientras que para una condición hidrológica seca el caudal ecológico es considerado igual al 7Q10 mensual, puesto que este, se asocia a un análisis de frecuencia de valores mínimos con un periodo de recurrencia de 10 años. Así se configuraron los caudales ecológicos para todas las cuencas de estudio.

I. Disponibilidad real

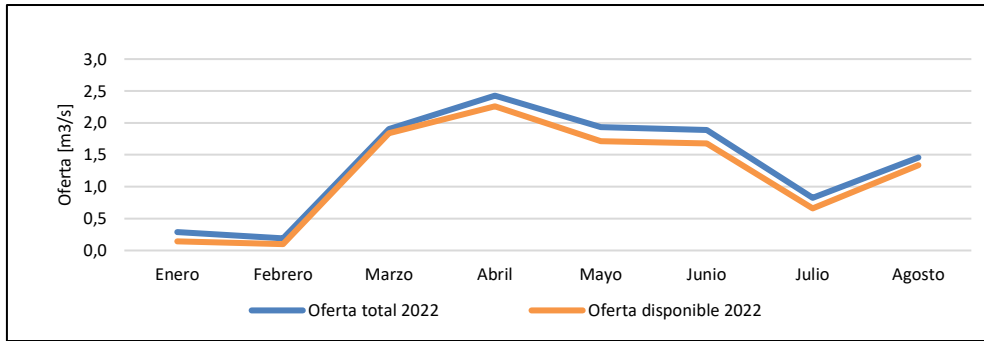
Oferta hídrica real se define como la oferta hídrica total (**Anexo G**) menos el caudal ecológico (**Anexo H**). Como se mencionó anteriormente, se tomarán los valores obtenidos con la metodología 3, los valores de la metodología Q95 se emplearon para obtener la oferta disponible en época promedio y los valores de la metodología 7Q10 para la condición seca. Con estos valores, se procedió a estimar la oferta hídrica disponible para las cuencas de interés.

la **Tabla 7-13** se muestran los resultados de todas las ofertas encontradas, así como de los caudales ecológicos empleados. Adicionalmente, en la **Figura 7-24** se comparan las ofertas total y disponible solo para lo corrido del año 2022 para la Quebrada la Iguaná.

Tabla 7-13: Resumen resultados ofertas de la quebrada La Iguaná.

Mes	Oferta total [m3/s]	Oferta total 2022 [m3/s]	Caudal ecológico condición Seca [m3/s]	Caudal ecológico condición Media [m3/s]	Oferta disponible condición normal [m3/s]	Oferta disponible condición seca [m3/s]	Oferta disponible condición normal 2022 [m3/s]
Enero	0.414	0.286	0.112	0.145	0.268	0.136	0.141
Febrero	0.333	0.190	0.081	0.091	0.243	0.108	0.100
Marzo	0.628	1.902	0.040	0.065	0.563	0.355	1.837
Abril	0.953	2.427	0.083	0.167	0.786	0.778	2.259
Mayo	1.160	1.933	0.222	0.221	0.939	0.625	1.712
Junio	0.886	1.890	0.128	0.212	0.674	0.735	1.679
Julio	0.576	0.824	0.109	0.163	0.413	0.384	0.661
Agosto	0.490	1.460	0.080	0.123	0.367	0.267	1.336
Septiembre	0.876	-	0.000	0.104	0.771	0.576	-
Octubre	1.164	-	0.259	0.342	0.823	1.045	-
Noviembre	1.248	-	0.258	0.416	0.832	0.998	-
Diciembre	0.646	-	0.158	0.213	0.433	0.427	-

Figura 7-24: Comparación ofertas 2022 Quebrada Iguaná.

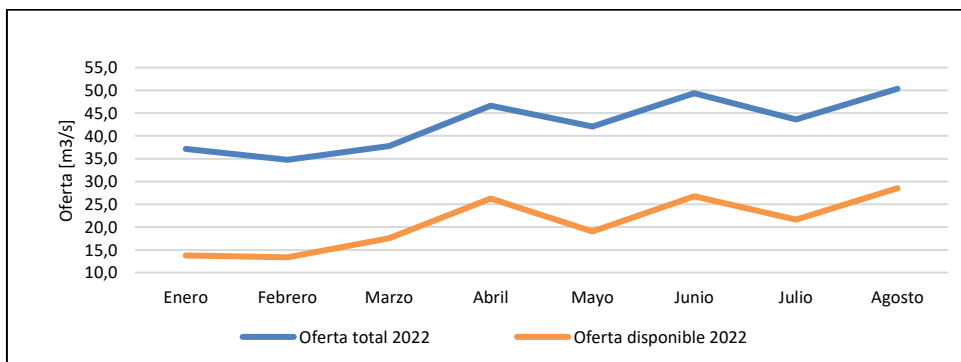


La oferta hídrica disponible para la cuenca de estudio del Río Aburrá, y los análisis comparativos entre la total y la disponible, se muestra el resumen de ofertas en la **Tabla 7-14**, además, se evidencia la oferta disponible estimada gráficamente en la **Figura 7-25**.

Tabla 7-14: Resumen ofertas Río Aburrá PTAR.

Mes	Oferta total [m3/s]	Oferta total 2022 [m3/s]	Caudal ecológico condición Seca [m3/s]	Caudal ecológico condición Media [m3/s]	Oferta disponible condición normal [m3/s]	Oferta disponible condición seca [m3/s]	Oferta disponible condición normal 2022 [m3/s]
Enero	31.806	37.190	24.928	23.430	8.376	3.407	13.760
Febrero	30.067	34.770	23.510	21.408	8.659	2.528	13.362
Marzo	29.684	37.763	22.444	20.206	9.479	1.826	17.558
Abril	31.374	46.629	22.539	20.391	10.983	3.108	26.237
Mayo	35.222	42.098	23.339	23.036	12.187	5.649	19.062
Junio	34.756	49.399	24.992	22.623	12.134	5.826	26.777
Julio	32.540	43.582	24.109	21.929	10.611	6.173	21.652
Agosto	31.716	50.349	23.681	21.813	9.903	5.206	28.536
Septiembre	32.797	-	23.895	23.742	9.054	4.779	-
Octubre	34.395	-	24.997	24.650	9.745	6.249	-
Noviembre	35.332	-	26.944	27.019	8.314	5.940	-

Figura 7-25: Comparación ofertas 2022 Río Aburrá PTAR.

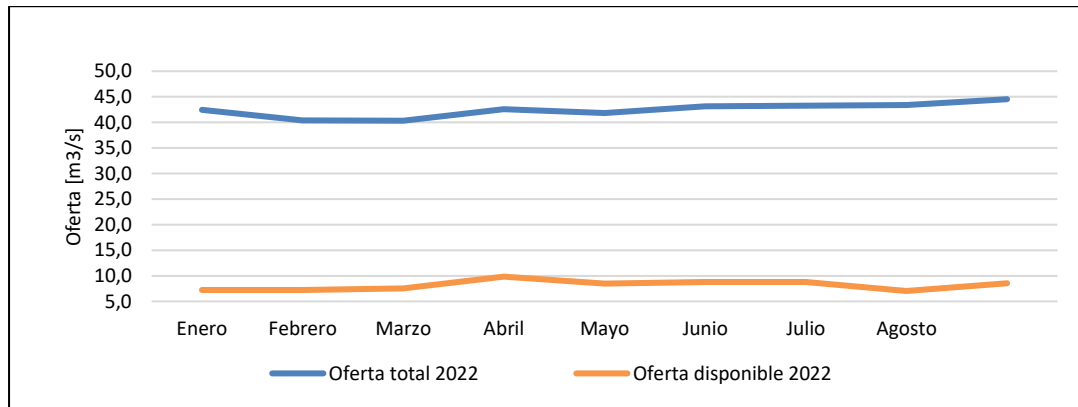


Por otra parte, la **Tabla 7-15** se muestran los resultados de todas las ofertas encontradas, así como de los caudales ecológicos empleados. Adicionalmente, en la **Figura 7-26** se comparan las ofertas total y disponible solo para lo corrido del año 2022 para el Embalse Río Grande.

Tabla 7-15: Resumen ofertas – Embalse Río Grande.

Mes	Oferta total [m3/s]	Oferta total 2022 [m3/s]	Caudal ecológicos condición Seca [m3/s]	Caudal ecológicos condición Media [m3/s]	Oferta disponible condición normal [m3/s]	Oferta disponible condición seca [m3/s]	Oferta disponible condición normal 2022 [m3/s]
Enero	46.195	42.469	37.577	35.222	10.973	5.215	7.247
Febrero	43.559	40.359	35.516	33.123	10.437	3.967	7.237
Marzo	42.366	40.320	34.199	32.782	9.585	3.071	7.538
Abril	43.028	42.563	34.451	32.732	10.296	5.106	9.831
Mayo	46.114	41.794	35.502	33.313	12.801	8.469	8.482
Junio	47.937	43.142	37.324	34.336	13.601	8.606	8.806
Julio	47.112	43.237	37.279	34.457	12.655	8.873	8.780
Agosto	47.007	43.357	37.570	36.327	10.679	7.873	7.030
Septiembre	47.825	-	38.134	35.969	11.856	7.376	8.552
Octubre	49.910	-	39.156	36.180	13.730	8.481	-
Noviembre	51.075	-	40.676	37.679	13.396	8.175	-
Diciembre	49.443	-	40.283	37.391	12.052	6.568	-

Figura 7-26: Comparación ofertas 2022 – Embalse Río Grande.



J.Resultados detallados huella hídrica gris

Tabla 7-16: Huella hídrica gris detallada.

Cálculos Bloque M1								
Mes	Parámetro	Concentración del efluente (mg/l)	Concentración máx.(mg/l)	Concentración afluente (mg/l)	Concentración real (mg/l)	Volumen del efluente (m3)	HH gris (m3) WFA	HH gris (m3) Adaptada.
Marzo	DBO	288,00	75,00	0,00	100,00	76,00	291,84	291,84
	DQO	308,00	225,00	0,00	192,00	76,00	104,04	709,33
	SST	51,00	75,00	0,00	328,00	76,00	51,68	51,68
	Hierro	5,38	1,00	0,30	0,00	76,00	385,78	385,78
Total Marzo							385,78	1.438,63
Abril	DBO	314,00	75,00	0,00	100,00	64,00	267,95	267,95
	DQO	425,00	225,00	0,00	192,00	64,00	120,89	824,24
	SST	75,00	75,00	0,00	328,00	64,00	64,00	64,00
	Hierro	2,36	1,00	0,30	0,00	64,00	131,97	131,97
Total Abril							267,95	1.288,16
Mayo	DBO	216,00	75,00	0,00	100,00	91,00	262,08	262,08
	DQO	328,00	225,00	0,00	192,00	91,00	132,66	904,48
	SST	37,30	75,00	0,00	328,00	91,00	45,26	45,26
	Hierro	0,78	1,00	0,30	0,00	91,00	44,04	44,04
Total Mayo							262,08	1.255,87
Junio	DBO	229,00	75,00	0,00	100,00	79,00	241,21	241,21
	DQO	418,00	225,00	0,00	192,00	79,00	146,76	1.000,67
	SST	38,00	75,00	0,00	328,00	79,00	40,03	40,03
	Hierro	1,42	1,00	0,30	0,00	79,00	88,24	88,24
Total Junio							241,21	1.370,15
Julio	DBO	86,80	75,00	0,00	100,00	35,00	40,51	40,51
	DQO	135,00	225,00	0,00	192,00	35,00	21,00	143,18
	SST	86,00	75,00	0,00	328,00	35,00	40,13	40,13
	Hierro	2,75	1,00	0,30	0,00	35,00	85,68	85,68
Total Julio							85,68	309,50
	DBO	215,00	75,00	0,00	100,00	66,00	189,20	189,20

Agosto	DQO	515,00	225,00	0,00	192,00	66,00	151,07	1.030,00
	SST	94,00	75,00	0,00	328,00	66,00	82,72	82,72
	Hierro	0,89	1,00	0,30	0,00	66,00	39,20	39,20
Total Agosto							189,20	1.341,12
Cálculos Facultad de Minas								
Mes	Parámetro	Concentración del efluente (mg/l)	Concentración máx.(mg/l)	Concentración afluente (mg/l)	Concentración real (mg/l)	Volumen del efluente (m3)	HH gris (m3) WFA	HH gris (m3) Adaptada.
Marzo	DBO	207,67	75,00	0,00	100,00	759,00	2.101,59	2.101,59
	DQO	281,43	225,00	0,00	192,00	759,00	949,37	6.472,97
	SST	89,50	75,00	0,00	328,00	759,00	905,74	905,74
	Hierro	5,94	1,00	0,30	0,00	759,00	4.276,97	4.276,97
Total Marzo							4.276,97	13.757,26
Abril	DBO	429,00	75,00	0,00	100,00	620,00	3.546,40	3.546,40
	DQO	515,00	225,00	0,00	192,00	620,00	1.419,11	9.675,76
	SST	202,00	75,00	0,00	328,00	620,00	1.669,87	1.669,87
	Hierro	2,86	1,00	0,30	0,00	620,00	1.585,96	1.585,96
Total Abril							3.546,40	16.477,98
Mayo	DBO	321,00	75,00	0,00	100,00	723,00	3.094,44	3.094,44
	DQO	755,00	225,00	0,00	192,00	723,00	2.426,07	16.541,36
	SST	266,00	75,00	0,00	328,00	723,00	2.564,24	2.564,24
	Hierro	2,58	1,00	0,30	0,00	723,00	1.646,99	1.646,99
Total Mayo							3.094,44	23.847,04
Junio	DBO	314,00	75,00	0,00	100,00	663,00	2.775,76	2.775,76
	DQO	476,00	225,00	0,00	192,00	663,00	1.402,61	9.563,27
	SST	120,00	75,00	0,00	328,00	663,00	1.060,80	1.060,80
	Hierro	1,41	1,00	0,30	0,00	663,00	734,60	734,60
Total Junio							2.775,76	14.134,44
Julio	DBO	311,00	75,00	0,00	0,00	473,00	1.961,37	1.961,37
	DQO	443,00	225,00	0,00	0,00	473,00	931,28	931,28
	SST	202,00	75,00	0,00	0,00	473,00	1.273,95	1.273,95
	Hierro	4,94	1,00	0,30	0,00	473,00	2.194,72	2.194,72
Total Julio							2.194,72	6.361,32
Agosto	DBO	125,00	75,00	0,00	100,00	451,00	751,67	751,67
	DQO	470,00	225,00	0,00	192,00	451,00	942,09	6.423,33
	SST	173,00	75,00	0,00	328,00	451,00	1.040,31	1.040,31
	Hierro	1,58	1,00	0,30	0,00	451,00	578,63	578,63

Total Agosto							1.040,3 1	8.793,94
Cálculos Ingeominas								
Mes	Parámetro	Concentración del efluente (mg/l)	Concentración máx.(mg/l)	Concentración afluente (mg/l)	Concentración real (mg/l)	Volumen del efluente (m3)	HH gris (m3) WFA	HH gris (m3) Adaptada.
Marzo	DBO	78,00	75,00	0,00	100,00	102,00	106,08	106,08
	DQO	94,40	225,00	0,00	192,00	102,00	42,79	291,78
	SST	39,00	75,00	0,00	328,00	102,00	53,04	53,04
	Hierro	7,02	1,00	0,30	0,00	102,00	685,24	685,24
Total Marzo							685,24	1.136,14
Abril	DBO	88,70	75,00	0,00	100,00	96,00	113,54	113,54
	DQO	138,00	225,00	0,00	192,00	96,00	58,88	401,45
	SST	46,50	75,00	0,00	328,00	96,00	59,52	59,52
	Hierro	0,52	1,00	0,30	0,00	96,00	20,93	20,93
Total Abril							113,54	595,44
Mayo	DBO	30,50	75,00	0,00	100,00	133,00	54,09	54,09
	DQO	75,60	225,00	0,00	192,00	133,00	44,69	304,69
	SST	20,70	75,00	0,00	328,00	133,00	36,71	36,71
	Hierro	0,65	1,00	0,30	0,00	133,00	46,68	46,68
Total Mayo							54,09	442,17
Junio	DBO	28,30	75,00	0,00	100,00	120,00	45,28	45,28
	DQO	45,60	225,00	0,00	192,00	120,00	24,32	165,82
	SST	22,00	75,00	0,00	328,00	120,00	35,20	35,20
	Hierro	0,39	1,00	0,30	0,00	120,00	10,80	10,80
Total Junio							45,28	257,10
Julio	DBO	88,00	75,00	0,00	100,00	140,00	164,27	164,27
	DQO	170,00	225,00	0,00	192,00	140,00	105,78	721,21
	SST	50,00	75,00	0,00	328,00	140,00	93,33	93,33
	Hierro	0,89	1,00	0,30	0,00	140,00	81,90	81,90
Total Julio							164,27	1.060,71
Agosto	DBO	55,80	75,00	0,00	100,00	111,00	82,58	82,58
	DQO	198,00	225,00	0,00	192,00	111,00	97,68	666,00
	SST	19,30	75,00	0,00	328,00	111,00	28,56	28,56
	Hierro	0,46	1,00	0,30	0,00	111,00	17,65	17,65
Total Agosto							97,68	794,80