

ANÁLISIS DE LA HUELLA HÍDRICA A LO LARGO DEL CICLO DE VIDA DE PRODUCCIÓN DE BIOPLÁSTICOS

IVÁN PATRICIO CERDA SOLÍS

UNIVERSIDAD EAN

BOGOTÁ D.C., COLOMBIA, MAYO DE 2020

1



UNIVERSIDAD EAN

**FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS**

**TÍTULO DEL PROYECTO DE GRADO
ANÁLISIS DE LA HUELLA HÍDRICA A LO LARGO DEL CICLO DE VIDA DE
PRODUCCIÓN DE BIOPLÁSTICOS**

AUTOR

IVÁN PATRICIO CERDA SOLÍS

DIRECTOR

PROF. DR. JEFFREY LEÓN PULIDO

BOGOTÁ, D.C., MAYO DE 2020

2

FIRMA DE LOS JURADOS Y DIRECTOR

DIRECTOR - Prof. Dr. Jeffrey León Pulido

JURADO 1 - Dra. Elizabeth León Velásquez

JURADO 2 - Dr. Enrique Edgardo Gilles Romero

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia quienes siempre me han apoyado en los retos que me he propuesto, aportando día a día con su tiempo y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad EAN, a sus distinguidos profesores y a sus directivos, quienes comparten día a día sus conocimientos y experiencia para contribuir con el desarrollo del país a través de su docencia, sus estudiantes y egresados.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1 OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL TRABAJO	19
1.1 Objetivos	19
1.1.1 Objetivo General.....	19
1.1.2 Objetivos Específicos.....	19
1.2 Justificación.....	19
1.3 Delimitación y Alcance.....	21
1.4 Metodología	22
1.5 Estructura del Trabajo	23
2 REVISIÓN DE LA LITERATURA	24
2.1 Plástico.....	24
2.2 Bioplásticos.....	25
2.2.1 Propiedades y aplicaciones	27
2.2.2 Clases de Bioplásticos	30
2.2.3 Proceso de producción	31
2.3 Huella Hídrica	37
2.4 Huella hídrica de un proceso.....	37
2.4.1 Huella Verde.....	38
2.4.2 Huella Azul.....	38
2.4.3 Huella Gris.....	38
2.4.4 Huella de Agua de un Producto.....	39
2.5 Indicadores de Evaluación e impacto de los recursos hídricos.....	39
2.6 Factores y limitaciones	44
2.7 Métodos y Herramientas para la medición del uso de agua.....	45
2.7.1 Comparación de los métodos.....	55
2.7.2 Comparación de las herramientas.....	59
2.8 Conclusión del capítulo.....	65
3 MÉTODO	66
3.1 Determinación del consumo de agua.....	71
3.2 Evaluación y cálculo de la Huella Hídrica Azul (HH _{azul}).....	71
3.3 Evaluación y cálculo de la Huella Hídrica Verde (HH _{verde}).....	71

3.4	Evaluación y cálculo de la Huella Hídrica Gris (HH _{gris})	72
3.5	Cálculo de la huella hídrica de un producto.....	72
3.6	Estructura de matriz de evaluación e impacto de uso del agua.....	75
3.6.1	Alternativa de evaluación.....	78
3.6.2	Evaluación de impacto.....	78
3.6.3	Propuesta metodológica de evaluación.....	79
3.7	Conclusión del Capítulo	81
4	RESULTADOS	82
4.1	Caso de Estudio	82
4.2	Descripción del proceso productivo	83
4.2.1	Fase 1: Cultivo y transporte de caña de azúcar.....	83
4.2.2	Fase 2: Producción de Bioetanol a partir de caña de azúcar.....	84
4.2.3	Fase 3: Producción de etileno a partir de bioetanol	86
4.2.4	Fase 4: Producción de polietileno.....	88
4.3	Aplicación de la metodología de evaluación.....	89
4.4	Resultados de la Evaluación e Impacto.....	95
4.5	Análisis Final.	98
4.6	Conclusiones.....	99
5	BIBLIOGRAFÍA	102
	Anexo A: Cálculo de la Huella Hídrica en la Fase 1	108
	Anexo B: Cálculo de la Huella Hídrica en la Fase 2.....	123
	Anexo C: Cálculo de la Huella Hídrica en la Fase 3.....	125
	Anexo D: Cálculo de la Huella Hídrica en la Fase 4	127
	Anexo E: Resumen de la Huella Hídrica del Proceso Completo	130
	Anexo F: Autorización de Publicación	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.- Producción global de bioplásticos desde 2017 y proyectado al 2023	20
Figura 1.2.- Capacidad Global de producción de Bioplásticos en 2016	21
Figura 2.1.- Capacidad global de producción de bioplásticos en 2018.....	29
Figura 2.2.- Tipos de bioplásticos	30
Figura 2.3.- Proceso de producción de PE biobasado	31
Figura 2.4.- Proceso de producción de PET biobasado.....	32
Figura 2.5.- Diagrama de flujo de la manufactura de biopolímeros	33
Figura 2.6.- Proceso de producción de PLA biobasado	34
Figura 2.7.- Producción de PUR biobasado	35
Figura 2.8.- Proceso de producción de Bio-Polipropileno	35
Figura 2.9.- Proceso de producción de PVC biobasado.....	36
Figura 2.10.- Pasos para la cuantificación de la HH	46
Figura 2.11.- Representación de la HH de proceso Bioplásticos	47
Figura 2.12.- Fases de un estudio de Huella de Agua	49
Figura 2.13.- Categorías de impacto y métodos de evaluación de punto medio.....	50
Figura 2.14.- Categorías de daño y métodos de evaluación de punto final.....	51
Figura 2.15.- Balance directo de agua en un proceso.....	52
Figura 2.16.- Fases de la evaluación de huella de agua NTC-ISO 14046.....	54
Figura 2.17.- Procedimiento para el análisis del inventario de huella de agua	55
Figura 2.18.- Comparación de las metodologías WFA y LCA	57
Figura 2.19.- Water Footprint Assessment Tool	60
Figura 2.20.- National water footprint explorer	61
Figura 2.21.- Calculadora Huella Hídrica	62
Figura 2.22.- Calculadora agua - web México	62
Figura 2.23.- Calculadora Huella Hídrica	63
Figura 2.24.- Apps - Huella Hídrica.....	64
Figura 3.1.- Evaluación del Impacto (Enfoque ACV)	67
Figura 3.2.- Análisis del Inventario para cuantificar la Huella Hídrica	68
Figura 3.3.- Proceso de producción del Bio-Polietileno	70
Figura 3.4.- Esquema de proceso de un sistema de producción de “p” productos.....	73
Figura 4.1.- Principales actividades de la Compañía Braskem	82
Figura 4.2.- Fase 1 - Flujos de entrada y salida para el cultivo de caña de azúcar	84
Figura 4.3.- Proceso de producción de bioetanol de caña de azúcar.....	85
Figura 4.4.- Proceso para la producción de etileno de bioetanol	86
Figura 4.5.- Proceso de fabricación de polietileno de baja densidad (Krupp-Uhde)	88
Figura 4.6.- Proceso simplificado de producción de PEBD.....	91
Figura 4.7.- Fases del proceso de producción de PE en base a caña de azúcar	91
Figura 4.8.- Porcentajes por tipo de HH	96
Figura B.1.- Fase 2 - Flujos de entrada y salida para la producción de bioetanol	123
Figura C.1.- Fase 3 - Producción de Etileno en base a etanol.....	125
Figura D.1.- Fase 4 - Proceso sintetizado de polimerización del etileno	127

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.- Tipos de plásticos más comúnmente utilizados	25
Tabla 2.2.- Características de los Bioplásticos.....	28
Tabla 2.3.- Indicadores generales según WFN	40
Tabla 2.4.- Categorías de daño y métodos de evaluación de punto medio.	42
Tabla 2.5.- Categorías de daño y métodos de evaluación de punto final.	42
Tabla 2.6.- Enfoques aplicados a estudios de agua en América Latina	59
Tabla 3.1.- Indicadores Matriz de Evaluación de impactos	77
Tabla 4.1.- Datos de partida para la evaluación de Huella Hídrica de Bio-PE	90
Tabla 4.2.- Resultados de la Fase 1	92
Tabla 4.3.- Resultados de la Fase 2.....	93
Tabla 4.4.- Resultado de la Fase 3	94
Tabla 4.5.- Resultado de la Fase 4	95
Tabla 4.6.- Resultados de Evaluación de HH del Proceso de producción de Bio-PE.....	96
Tabla 4.7.- Resultado general Energía - Huella Hídrica proceso.....	97
Tabla A.1.- Insumos - productos requeridos para el cultivo de caña de azúcar.....	109
Tabla A.2.- Fracción de producto de los principales derivados del petróleo en refinería..	111
Tabla A.3.- Cálculo de la fracción de valor	112
Tabla A.4.- Cálculo de la Huella Hídrica de los subproductos del petróleo	114
Tabla A.5.- Composición energética por tipo de fuente en Brasil	115
Tabla A.6.- Cálculo de la HH de la electricidad utilizada en el proceso	116
Tabla A.7.- Inventario de insumos para el cultivo de caña en Brasil.....	119
Tabla A.8.- Agua Azul y verde por insumo utilizado en la fase 1	120
Tabla A.9.- Cuantificación de Huellas Hídricas Fase 1 (cultivo de caña de azúcar).....	121
Tabla A.10.- Resumen de resultados de la Fase 1.....	122
Tabla B.1.- Huella Hídrica azul y verde - Fase 2.....	124
Tabla B.2.- Resumen de la Fase 2.....	124
Tabla C.1.- Insumos y productos Fase de producción de etileno.....	125
Tabla C.2.- HH total Fase 3 de producción de etileno en base a etanol de caña de azúcar	126
Tabla D.1.- Insumos de entrada para la Polimerización del etileno.....	127
Tabla D.2.- Insumos y productos Fase de producción de etileno	128
Tabla D.3.- Cálculo de la Huella Hídrica de la Fase 4 (Polimerización).....	129
Tabla E.1.- Huella Hídrica -Resultado del proceso completo.....	130
Tabla E.2.- Resultados totales por fase e impacto de coproductos	131

LISTA DE FLUJOGRAMAS

Flujograma 1.1.- Metodología de desarrollo de la investigación.....	22
Flujograma 3.1.- Metodología de Evaluación de Huella Hídrica - Proceso	80
Flujograma 4.1.- Producción de Biopolietileno	83
Flujograma 4.2.- Proceso de producción de etileno	87

GLOSARIO

Bioplásticos

Se define un material plástico como Bioplástico si es biobasado, biodegradable, o reúne ambas propiedades [traducción propia] (European Bioplastics, 2018).

Biobasado

El término biobasado significa que el material o producto se deriva (o es parte) de biomasa (plantas). La biomasa usada para Bioplásticos como maíz, caña de azúcar, o celulosa [traducción propia] (European Bioplastics, 2018).

Biodegradable

La biodegradación es un proceso químico durante el cual microorganismos que se encuentran en el ambiente convierten materiales en sustancias naturales como agua, dióxido de carbono y compost sin requerir aditivos artificiales. El proceso de biodegradación depende de las condiciones ambientales aledañas (ej. temperatura del lugar), del material y de la aplicación [traducción propia] (European Bioplastics, 2018).

Ciclo de vida

“Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final”(ISO - ICONTEC, 2007).

Huella hídrica

La huella hídrica es un indicador de uso de agua dulce que representa no solo el uso directo por un consumidor o productor, sino también el uso indirecto. Puede ser considerado como un indicador de apropiación del recurso. Para un producto, la huella hídrica es el agua que se necesita para producirlo, y se mide en toda la cadena de suministro (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011).

La huella de agua es una métrica o métricas basadas en un análisis de ciclo de vida con las que se cuantifican los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua (ISO 14046:2014, subcláusula 3.3.1) (ISO - ICONTEC, 2017).

Economía circular

La economía circular es un concepto económico que se interrelaciona con la sostenibilidad, y cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantengan en la economía durante el mayor tiempo posible, y se reduzca al mínimo la generación de residuos (Simon, 2018).

Trata de impulsar un cambio de modelo de producción, pasando del modelo lineal (tomar-hacer-tirar), a un modelo circular basado en el principio de "cerrar el ciclo de vida" de los productos, los servicios, los residuos, los materiales, la energía y el agua (Simon, 2018).

Proceso productivo

Es un conjunto de operaciones y actividades interrelacionados, que buscan añadir valor mediante la transformación de unos insumos o materia prima para obtener otros bienes distintos denominados productos terminados (Fullana, C. Y Paredes, J. 2008) & (Retamoso, C. 2010), citados por (Gómez & Pérez, 2016).

RESUMEN

TÍTULO:

ANÁLISIS DE LA HUELLA HÍDRICA A LO LARGO DEL CICLO DE VIDA DE PRODUCCIÓN DE BIOPLÁSTICOS

AUTOR:

IVÁN PATRICIO CERDA SOLÍS

PALABRAS CLAVE:

Agua, Huella Hídrica, Economía circular, Bioplástico, Evaluación de impacto

La industria de procesos ha generado diferentes acciones que permitan aprovechar los recursos disponibles y aumentar la eficiencia en sus operaciones. El agua como materia prima fundamental universal ha sido foco de trabajo y punto de mayor importancia a lo largo del mundo, siendo concentrados estos trabajos en Agendas como los Objetivos de Desarrollo Sostenible y Tratados de Responsabilidad de Uso de los Recursos. El presente trabajo desarrolla un análisis del proceso de producción de biopolímeros, abordando el ciclo de vida de producción y determinando la huella hídrica asociada al proceso, para determinar la etapa con el mayor impacto al recurso del agua en la producción. El proceso enmarca una huella hídrica azul asociada a las unidades de operación de cultivo de caña de azúcar, su posterior transporte, el uso de energía y combustible en la planta de producción de etanol, y por el consumo de agua en los procesos de transformación de etanol a etileno y en la polimerización; una huella hídrica gris relacionada con el agua que resulta del proceso de cultivo por la utilización de fertilizantes y agroquímicos; y una huella hídrica verde principalmente en el desarrollo del cultivo de la caña asociado a las características de la región. El proceso de producción de bio-polietileno en este trabajo se divide en 4 fases (1 cultivo de caña y transporte, 2 producción de bioetanol, 3 producción de etileno, y 4

polimerización) que describen el panorama convencional de producción de biopolímeros. A partir de una metodología de análisis cuali-cuantitativo y soportados en datos de la industria fue establecido un porcentaje de huella de 80,6% para la fase 1, otro de 1% para la fase 2, otro de 17% para la fase 3 y 1,4% para la fase 4, representando en conjunto 4,8 m³ agua/kg PE. Se cuantificó el aporte positivo de los coproductos de la fase 2, lo cual contribuye a la reducción de la huella hídrica total a 4,3 m³ agua/kg PE. Finalmente, fueron identificados los puntos de mayor consumo a lo largo del proceso y los aspectos de importancia para el aprovechamiento óptimo del recurso hídrico.

ABSTRACT

TITLE:

ANALYSIS OF THE WATER FOOTPRINT THROUGHOUT THE LIFE CYCLE OF BIOPLASTICS PRODUCTION

AUTHOR:

IVAN PARTICIO CERDA SOLIS

KEYWORD:

Water, Water footprint, circular economy, bioplastic, impact assessment,

The process industry has generated different actions that allow taking advantage of available resources and increasing efficiency in its operations. Water as a universal fundamental raw material has been a focus of work and a point of greatest importance throughout the world, these works being concentrated in Agendas such as the Sustainable Development Goals and Responsibility Treaties for the Use of Resources. This work develops an analysis of the biopolymer production process, addressing the production life cycle and determining the water footprint associated with the process, to determine the stage with the greatest impact on the water resource in production. The process frames a blue water footprint associated with the sugar cane cultivation operation units, its main transportation, the use of energy and fuel in the ethanol production plant, and by the consumption of water in the transformation processes of ethanol to ethylene and in polymerization; a gray water footprint related to water that results from the cultivation process by the use of fertilizers and agrochemicals; and a green water footprint mainly in the development of sugarcane cultivation associated with the characteristics of the region. The bio-polyethylene production process in this work is divided into 4 phases (1 cane cultivation and transport, 2 bioethanol production, 3 ethylene

production, and 4 polymerization) that describe the conventional panorama of biopolymer production. Based on a qualitative-quantitative analysis methodology and supported by industry data, a footprint percentage of 80.6% was established for phase 1, another 1% for phase 2, another 17% for phase 3 and 1.4% for phase 4, together representing 4.8 m³ water/kg PE. The positive contribution of phase 2 co-products was quantified, which contributes to the reduction of the total water footprint to 4.3 m³ water/kg PE. Finally, the points of greatest consumption throughout the process and the aspects of importance for the optimal use of the water resource were identified.

INTRODUCCIÓN

Ante el cambio climático, las perspectivas son cada vez más desalentadoras para la humanidad. El agua, la cual es de gran importancia tanto como capital natural -lagos, ríos, humedales, aguas subterráneas y mares-, como de una importancia económica real para las actividades del hombre (Simon, 2018), a pesar de ello, durante las últimas décadas, en muchas partes del mundo la incesante demanda por recursos hídricos y su mal uso han incrementado la contaminación y agravado el estrés hídrico (Naciones Unidas para el Desarrollo Hídrico Mundial) citado por (Vázquez del Mercado Arribas & Lambarri Beléndez, 2017). De toda el agua existente en nuestro planeta aproximadamente el 2.5% es agua dulce, de la cual el ser humano sólo puede aprovechar el 0.007%, pero afortunadamente esta cantidad todavía puede abastecer a la población mundial (Simon, 2018).

La crisis mundial del agua es de gobernanza, más que de disponibilidad de recursos, siendo allí donde es necesaria la mayor parte de la acción para lograr un mundo con seguridad hídrica (WWAP,2015) citado por (Vázquez del Mercado Arribas & Lambarri Beléndez, 2017). No se puede mejorar, lo que no se puede medir, lo que no se mejora, se degrada siempre (Lord Kelvin, 1824-1907). Es en este punto en donde aparece el concepto de huella hídrica, como un indicador que permite comprender la problemática hídrica y sus alternativas de solución, complementando a otros indicadores y enfoques más tradicionales (Vázquez del Mercado Arribas & Lambarri Beléndez, 2017).

La huella hídrica (HH) total es un indicador multidimensional que se compone de la sumatoria de las huellas hídricas verde, azul y gris. La HH Verde, se refiere al consumo de aguas verdes (lluvia que se incorpora en productos agrícolas). La HH azul, se refiere a consumo de recursos hídricos azules (agua dulce), superficial o subterránea, en toda la cadena de suministro. La HH gris, se refiere a la contaminación y está definida como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar una carga de contaminantes dados las concentraciones naturales y estándares ambientales de calidad de agua (Proyecto-Huella_de_ciudades et al., 2002).

En el caso de los bioplásticos, su materia prima es origen biológico (biomasa), y proviene de fuentes renovables como son cultivos de maíz, caña de azúcar, remolacha, trigo,

etc.; sin embargo, sus procesos de fabricación, involucra la transformación de la biomasa y el uso de agua dentro de los procesos. Con lo cual se hace necesario cuantificar la huella hídrica generada dentro de los procesos para de esta manera contar con métodos y herramientas que permitan hacer un correcto manejo y gerenciamiento del recurso. También, permitirá realizar futuras comparaciones entre los diferentes procesos y productos bioplásticos, para determinar la eficiencia del proceso y generar una dinámica para desarrollar nuevos y mejores procesos productivos y tecnología en esta área.

A partir del argumento expuesto sobre el manejo del agua y las herramientas metodológicas, se plantea la pregunta que la investigación pretende resolver: ¿Cómo facilitar el cálculo de la huella hídrica en procesos de producción de bioplásticos?

Finalmente, el presente trabajo desarrolla un estudio marco para la identificación de la huella hídrica en organizaciones dedicadas exclusivamente a la producción de bioplásticos, con la finalidad de estandarizar conceptos y, presentar de una manera sencilla una metodología, que aporte con información a la gestión del recurso.

CAPÍTULO 1

1 OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DEL TRABAJO

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Desarrollar una estructura de análisis que permita calcular la huella hídrica asociada a procesos de producción integrando conceptos de las metodologías existentes aplicadas específicamente a la producción de Bioplásticos.

1.1.2 Objetivos Específicos

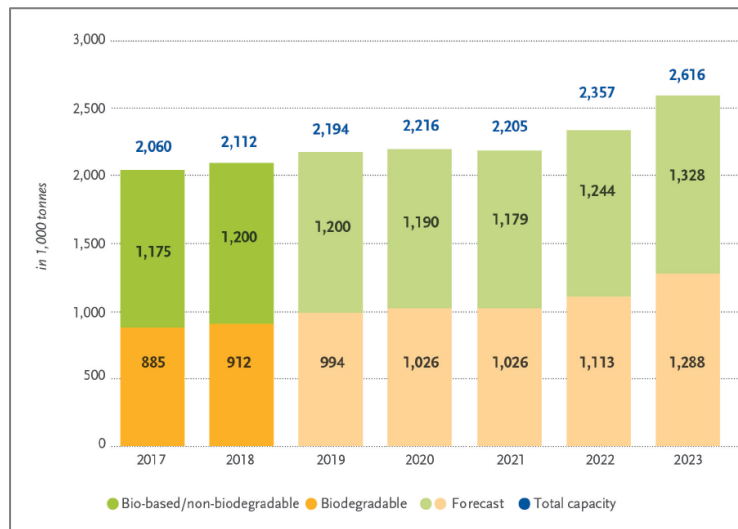
- Estudiar los diferentes procesos asociados a la producción de bioplásticos disponibles en la literatura abierta.
- Establecer el proceso y capacidad de producción de bioplásticos que permitan describir las unidades de proceso/servicio requeridas.
- Determinar los factores, variables y restricciones asociadas a metodologías para la cuantificación de huella hídrica.
- Realizar un estudio de la Huella Hídrica de producción de bioplásticos que permita evaluar el uso de agua en el proceso.

1.2 Justificación

En 2016 la producción anual de productos plásticos fue de 335 millones de toneladas, en el año 2017 alcanzó a los 350 millones de toneladas (PlasticsEurope (PEMRG), 2018), representando un incremento de cerca de 4.5% en un año, de los cuales los bioplásticos representan cerca del uno por ciento y según European Bioplastics y el Instituto de

Investigaciones Nova, la capacidad global de producción de Bioplásticos se incrementará desde alrededor de 2.11 millones de toneladas en 2018 a aproximadamente 2.62 millones de toneladas en el año 2023 (European Bioplastics & Nova-Institute, 2018).

Figura 1.1.- Producción global de bioplásticos desde 2017 y proyectado al 2023



Fuente.- (European Bioplastics & Nova-Institute, 2018).

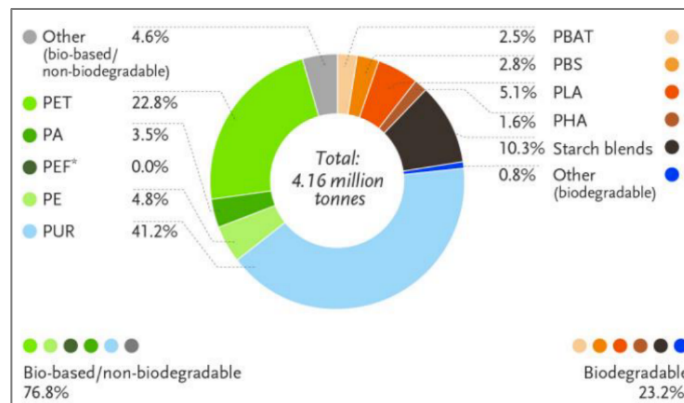
Como se observa en la Figura 1.1, el pronóstico para el mercado de los bioplásticos es muy prometedor ya que prevé incrementos en la demanda de ellos, y como consecuencia directa, oportunidades para nuevas empresas quedarán evidentes. Hay que mencionar, además, que a medida que la demanda de productos bioplásticos se incrementa, las necesidades por mayores recursos también se incrementarán en toda su cadena de valor. Por lo tanto, se hace cada vez más importante contar con metodologías y herramientas para gestionar los recursos necesarios, entre ellos el agua, objeto de este estudio. Para lograrlo, finalmente, se hace visible la necesidad de conocer más a fondo las metodologías y herramientas actuales, y generar otras nuevas, que sean aplicables al entorno industrial de los bioplásticos y con apoyos tecnológicos que faciliten su uso, como se propone este trabajo.

1.3 Delimitación y Alcance

El presente trabajo tiene la finalidad de desarrollar una metodología para la estimación de la huella hídrica asociada a los procesos de producción de bioplásticos. No se pretende realizar un análisis exhaustivo de todos los tipos de bioplásticos, pero sí de los más representativos dentro del mercado. Además, se desarrollará con base en metodologías existentes ya aplicadas a otros procesos y/o productos, determinando las huellas de agua verde, azul y gris, las cuales se producen en el proceso productivo en estudio.

Los tipos de bioplásticos analizados en esta investigación son: polietileno (PE), polietileno tereftalato (PET), ácido poliláctico (PLA), poliuretano (PUR), polipropileno (PP), y cloruro de polivinilo (PVC). Se selecciona estos bioplásticos por ser los más utilizados a nivel global, más del 70% de la demanda total registrada en el 2016 fue satisfecha por estos cinco tipos de bioplásticos. Se incluye al PLA ya que este bioplástico es capaz de reemplazar muchas de las funcionalidades de los plásticos de origen fósil. En la Figura 1.2, se presenta la capacidad global estimada de producción de estos bioplásticos en 2016, la cual muestra que de un total de 4.16 millones de toneladas, representaron PET (22.8 %), PA (3.5 %), PE (4.8 %), PLA (5.1%), y el PUR (41.2 %), representando un total de 73.9% (Piotrowski et al., 2017).

Figura 1.2.- Capacidad Global de producción de Bioplásticos en 2016

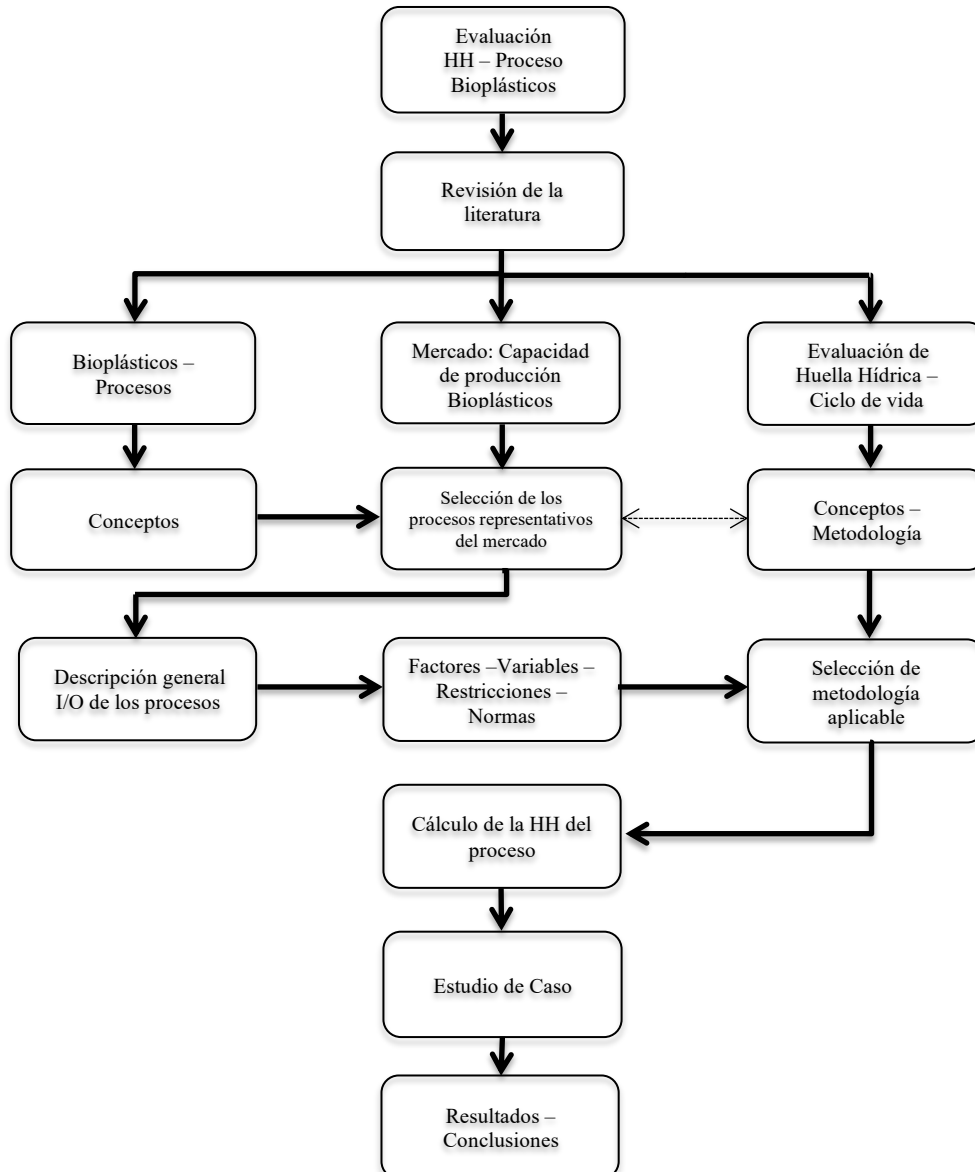


Fuente.- Nova Institute - (Piotrowski et al., 2017).

1.4 Metodología

Este trabajo se desarrolló con base en la metodología representada en el Flujoograma 1.1.

Flujoograma 1.1.- Metodología de desarrollo de la investigación



Fuente.- Elaboración propia

El proceso de investigación se inició con la investigación bibliográfica, revisando la literatura disponible para determinar los conceptos aplicables a los diferentes procesos asociados a los

©Universidad Ean: SNIES 2812 | Vigilada Mineducación | Personería Jurídica Res. n°. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

bioplásticos, se realizó el análisis de estadísticas del mercado para obtener la capacidad de producción, y definir los tipos de bioplásticos más representativos del mercado, paralelamente se hizo una revisión de los conceptos de huella hídrica y ciclo de vida, su metodología de evaluación, normas aplicables, factores y restricciones con base en la documentación bibliográfica para determinar en cada caso los valores aplicables según las entradas y salidas de materiales relacionados con cada proceso de producción. Seguidamente, con esta información y una vez seleccionado el modelo y la metodología a aplicar a los procesos en estudio, se realizó el cálculo de la huella hídrica de un proceso. Finalmente se realiza un estudio general de caso aplicado al proceso de producción de bio-polietileno, determinando los resultados de huella hídrica y conclusiones del estudio.

1.5 Estructura del Trabajo

En el Capítulo 1 se presenta los objetivos, la justificación, y se realiza la descripción del alcance y delimitación. A continuación, se desarrolla un flujograma en el que se muestra en forma general la metodología para desarrollar la investigación. Finalmente se describe la estructura del trabajo. En el Capítulo 2 se hace una revisión bibliográfica para definir el objeto de estudio en donde se describe sucintamente la historia del plástico y de los bioplásticos (estos últimos, son el objeto de este estudio), se realiza una revisión de las estadísticas de mercado para determinar la capacidad de producción y con base en ello se determina los tipos de plástico objeto de estudio y sus se hace la descripción general de sus procesos de producción. Se aborda también los conceptos y metodología de evaluación de la huella hídrica. El Capítulo 3 corresponde a la metodología aplicada al objeto de este estudio. Con base en estudios realizados, se determina el consumo de agua de los procesos para los tipos de bioplásticos seleccionados. A continuación, se realiza la propuesta de la metodología a aplicar y finalmente se calcula los componentes parciales y la Huella hídrica total para cada proceso. En el Capítulo 4 se hace la revisión de un caso de estudio y se aplica la metodología. Posteriormente se describe los resultados de la evaluación e impacto de la huella hídrica. Finalmente se expone las conclusiones de este estudio.

CAPÍTULO 2

2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Plástico








La palabra plástico tiene varias acepciones. Como sustantivo se refiere a una clase de materiales que pueden ser moldeados. Como adjetivo, caracteriza al comportamiento mecánico de un material que queda deformado una vez removido el esfuerzo mecánico aplicado (Hermida, 2011). Los plásticos son materiales orgánicos producidos a partir de combustibles fósiles o, recursos de origen biológico, siendo en ambos casos reciclables (PlasticsEurope (PEMREG), 2017).

Entre las ventajas de los plásticos se destaca que se trata de materiales livianos, con variadas propiedades mecánicas, no son frágiles, pueden obtenerse con muy buena calidad óptica (transparentes) y se los puede moldear en piezas complejas con buena terminación mediante procesos industriales que no requieren temperaturas muy altas (en general del orden de 200 °C). Por el contrario, como desventajas se menciona que son materiales derivados de los hidrocarburos y además no son biodegradables (Hermida, 2011).

En nuestra actual sociedad, la mayoría de los plásticos y materiales basados en polímeros utilizados se derivan del petróleo, el cual es una fuente de energía fósil no renovable, muy contaminante y que tarda muchos años en desaparecer del planeta (Labeaga, 2018), esto es, que los productos no son asimilados por la naturaleza sino que permanecen en el agua o en los suelos generando la denominada contaminación blanca (Hermida, 2011), por lo cual constituyen uno de los mayores problemas para el medioambiente.

En la Tabla 2.1 se indica los plásticos más comúnmente utilizados con sus códigos para reciclado, nombres de acuerdo al tipo, principales propiedades, y los usos más comunes.

Tabla 2.1.- Tipos de plásticos más comúnmente utilizados

Código	Tipo de polímero plástico	Propiedades	Usos comunes
	Polietileno Tereftalato (PET)	Claridad, dureza, resistencia, barrera a los gases y al vapor.	Botellas para bebidas y de condimentos para ensaladas; frascos de manteca de maní y mermeladas
	Polietileno de alta densidad (HDPE)	Dureza, resistencia, resistencia a la humedad, permeabilidad al gas.	Baldes, envases para leche, jugo y agua; bolsas de compras, envases de champú y perfumes.
	Policloruro de vinilo (PVC)	Versatilidad, facilidad de mezclado, dureza, resistencia.	Tubos, perfiles, aislación flexible, pisos, tarjetas, lonas para publicidad y cartelería, techados, cuero ecológico, calzado, suelas para calzado, botas, tela impermeabilizada, etc.
	Polietileno de baja densidad (LDPE)	Facilidad de procesamiento, dureza, resistencia, flexibilidad, fácil de sellar, barrera al vapor.	Bolsas para alimentos congelados; botellas exprimibles, ejemplo: miel, mostaza; tapas flexibles para contenedores.
	Polipropileno (PP)	Dureza, resistencia, resistencia al calor, productos químicos, grasa y aceite, versátil, barrera al vapor.	Vajilla reusable para microondas; elementos de cocina; contenedores para yogur; contenedores descartables para alimentos que se pueden poner en el microondas; tazas descartables; platos.
	Poliestireno (PS)	Versatilidad, claridad, fácil de darle forma.	Cajas para huevos, tazas, platos, bandejas y cubiertos descartables; contenedores descartables
	Otros	Dependiente de los polímeros o combinación de polímeros	Botellas, biberones, Usos del policarbonato distintos de embalaje: discos compactos; cristales "irrompibles"; gabinetes de aparatos electrónicos; lentes incluidos lentes para sol, lentes recetados, lámparas para automóviles, escudos para manifestaciones, paneles de instrumentos;

Fuente.- Adaptado de (Hermida, 2011) y (Gestores de Residuos, 2015)

2.2 Bioplásticos

Los bioplásticos constituyen una amplia familia de materiales con diferentes propiedades y aplicaciones. Un material se define como bioplástico si éste es biobasado, si es biodegradable, o si tiene ambas propiedades (European Bioplastics - EUBP, 2016). Este tipo de plásticos de origen natural son producidos a partir de un organismo vivo, también pueden ser sintetizados a partir de fuentes de energía renovables como la biomasa y tienen carácter biodegradable (Hermida, 2011). El término biobasado indica que el material o, producto se deriva total o, parcialmente de biomasa. La biodegradación es un proceso químico durante el cual microorganismos que se encuentran en el ambiente convierten materiales en sustancias

naturales como agua, dióxido de carbono y compost (no requiere de aditivos artificiales). El proceso de biodegradación depende de las condiciones ambientales aledañas (ej. temperatura del lugar), del material y de la aplicación (European Bioplastics, 2018).

Los primeros materiales bioplásticos utilizados por el hombre eran de origen natural. Antes de conocer los monómeros procedentes del refinado del petróleo a partir de la década de 1930, muchos objetos cotidianos se fabricaban con polímeros de origen biológico. Los recursos utilizados eran entonces el caucho natural (descubierto en el siglo XVIII), la celulosa con la Parkesina, el Celuloide o incluso el Celofán a finales del siglo XIX y principios del XX o también los componentes lácteos como la caseína que condujeron a la fabricación de la Galatita en 1897. Posteriormente, en el año 1947 aparece el Rilsan (o Poliamida 11) que fue el primer bioplástico técnico introducido en el mercado, valorado por sus excelentes propiedades mecánicas y por su resistencia química. A partir de los años 90, le siguieron los bioplásticos más conocidos en la actualidad como el PLA (ácido poliláctico), los PHAs (polihidroxicanoatos) y los almidones plastificados, los cuales utilizan biomasa (almidón, azúcares, celulosa, etc.). Además de los nuevos polímeros de origen biológico y/o biodegradables que emergen regularmente como el PEF, los principales cambios se basan en la diversificación de los recursos utilizados para producir estos materiales, con la mayor parte de los esfuerzos volcados en el aprovechamiento de coproductos o residuos de diferentes biomásas (NaturePlast, 2019).

Hoy en día, la mayoría de bioplásticos proviene de biomasa, por lo que se denominan de origen biológico. Sus principales recursos provienen del cereal (almidón de maíz o trigo hidrolizado), o de la industria azucarera (caña de azúcar, remolacha, melaza). Por otro lado, algunos polímeros biodegradables (como PBAT y PCL) siguen obteniéndose de recursos fósiles. La biomasa utilizada para la fabricación de polímeros de origen biológico es, en su mayoría, renovable y proviene de diferentes actividades como la agricultura o la industria agroalimentaria. En las diferentes etapas de tratamiento de la biomasa, el proceso principal es la fermentación bacteriana de los azúcares de diferentes orígenes con lo cual se obtiene los monómeros para la producción de polímeros de origen biológico (NaturePlast, 2019).

En el año 2016, la capacidad global de producción de bioplásticos fue de 4.16 millones de toneladas (Figura 1.2). De acuerdo con los datos compilados en 2017 por European Bioplastics y el Instituto de Investigación Nova, en el mediano plazo, se prevé un crecimiento en la capacidad global de producción de bioplásticos del 50 por ciento, desde alrededor de 4.2 millones de toneladas en 2016 a aproximadamente 6.1 millones de toneladas en el 2021. Además, los biobasados, como los poliuretanos (PUR) y PET, son los principales bioplásticos, con un 41.2% y 22.8% de la capacidad de producción global, respectivamente. La mayoría de los bioplásticos se utilizan para bienes de consumo y empaque (39% y 22% de la capacidad de producción global respectivamente) (Piotrowski et al., 2017) y (Nova-Institute, 2016) citado por (Endah Putri, 2018).

2.2.1 Propiedades y aplicaciones

Una de las grandes ventajas de los bioplásticos, es que pueden ser procesados mediante las mismas tecnologías que los materiales termoplásticos convencionales, tales como inyección, extrusión, o soplado (Fonseca Pallares, 2016). Los bioplásticos pueden ser sintetizados a partir de varios materiales de origen natural, tales como maíz, caña de azúcar, yuca, remolacha, aceites vegetales, etc., obteniendo materiales polímeros con similares características a las de los polímeros plásticos convencionales. El uso de fuentes renovables para su producción proporciona una ventaja indiscutible a favor del medioambiente, incrementa la eficiencia de los recursos al poderse cultivar la materia prima periódicamente durante el año. Además, permite una reducción de la huella de carbono por la reducción de emisiones de materiales y productos, disminuyendo también el uso de fuentes fósiles (European Bioplastics - EUBP, 2016).

En la Tabla 2.2 se muestra las propiedades y las principales aplicaciones de los bioplásticos, así como los principales recursos de biomasa requeridos para su producción.

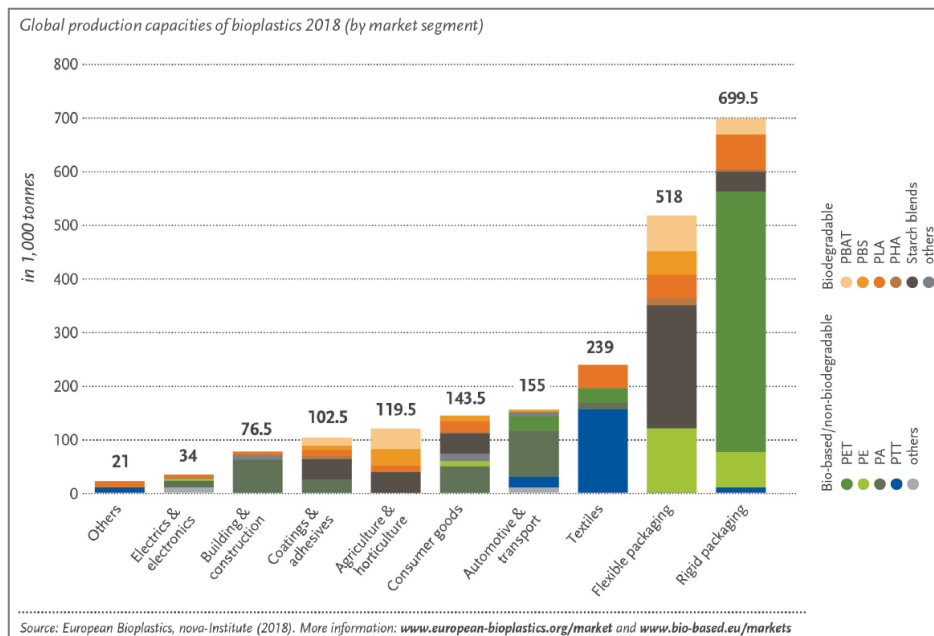
Tabla 2.2.- Características de los Bioplásticos

Materiales	Origen / Fin de vida útil	Recursos	Propiedades	Aplicaciones
Sostenibles (Bio-PET, Bio-PE, Bio-PA, etc.)	20 a ≈ 100 % de origen biológico, no biodegradable ni compostable	Caña de azúcar, melaza, aceites vegetales	Equivalentes a los polímeros clásicos, siguen siendo reciclables, no biodegradables, fáciles de usar	Todo tipo de envases, piezas técnicas.
PLA	≈100% de origen biológico y 100% biodegradable y compostable.	Almidón (maíz), caña de azúcar, remolacha azucarera, tapioca, etc.	Transparente, rígido, baja resistencia térmica, bajas propiedades barrera	Envases agroalimentarios (bandejas, films, vasos), cosmética, piezas inyectadas, biocompuestos.
PHAs	≈100% de origen biológico y 100% biodegradable y compostable	Almidón (maíz), azúcar (caña de azúcar, remolacha), biomasa	De opaco a translúcido, de rígido a elastómero, buena resistencia térmica y propiedades barrera	Biocompuestos, piezas inyectadas, film de envasado.
Bio-poliésteres	Parcialmente de origen biológico y 100% biodegradable y compostable	Caña de azúcar, almidón, etc.	De opaco a translúcido, de rígido a flexible, buena resistencia térmica	Bolsas, film de acolchado, frascos, piezas inyectadas.
Derivados de celulosa	De origen biológico en su mayoría. Pueden ser biodegradables y compostables	Pulpa de madera	Transparente, rígido, buenas propiedades térmicas, mecánicas y de barrera	Envases agroalimentarios (film), piezas inyectadas
Bio-elastómeros	Parcialmente de origen biológico y/o 100% biodegradables y compostables	Diferentes polioles de origen biológico (aceites vegetales, azúcares, etc.)	Muy flexible, buenas propiedades mecánicas y fácilmente transformable	Principalmente piezas técnicas e inyectadas
Compuestos a base de almidón	Parcialmente de origen biológico. Pueden ser biodegradables y compostables	Almidón (maíz, patata, etc.), harinas	Flexible, sensible a la humedad, biodegradación controlada	Bolsas, film de acolchado, horticultura
Bio-compuestos (bio-composites)	Parcialmente de origen biológico. Pueden ser biodegradables y compostables	Fibras de madera, cáñamo, lino, bambú y matriz bioplástica o convencional	Rígido, buena resistencia mecánica y térmica, fácilmente transformable	Principalmente piezas técnicas e inyectadas

Fuente.- Adaptada de NaturePlast (NaturePlast EU, 2019)

Los materiales bioplásticos son utilizados en un creciente número de mercados, desde empaque, productos para servicio de comidas, electrónica de consumo, automotores, agricultura/horticultura, juguetes, textiles y otros segmentos (European Bioplastics & Nova-Institute, 2018). En la Figura 2.1 se muestra la capacidad global de producción de bioplásticos por segmento de mercado en 2018.

Figura 2.1.- Capacidad global de producción de bioplásticos en 2018



Fuente.- European Bioplastics (European Bioplastics & Nova-Institute, 2018)

Según European Bioplastics, actualmente existe un bioplástico alternativo para casi todas las aplicaciones correspondientes de los plásticos convencionales, con propiedades similares, y hasta con ventajas adicionales, como la reducción de la huella de carbono u opciones de manejo de desechos como el compostaje industrial (European-Bioplastic; Nova Institute, 2018).

2.2.2 Clases de Bioplásticos

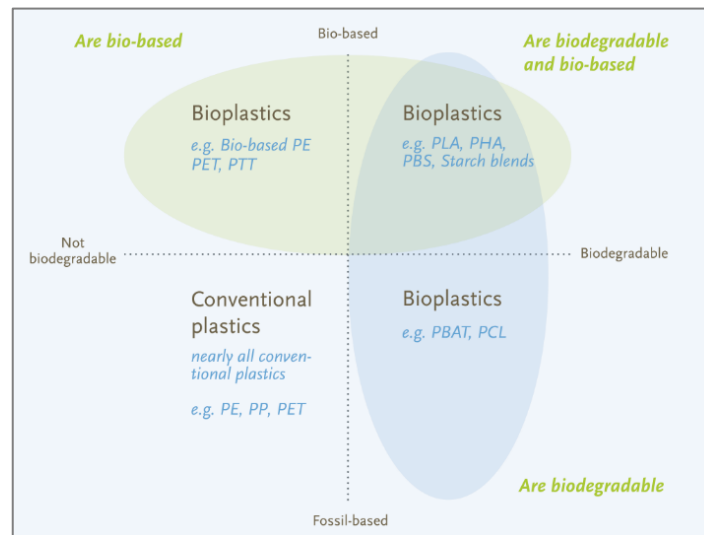
En la Figura 2.2 se muestra los diferentes tipos de bioplásticos en función de su composición y biodegradabilidad. De ellos se distingue los siguientes tres grupos de Bioplásticos:

Plásticos biobasados (o parcialmente biobasados), no biodegradables, tales como: los biobasados polietileno (PE), polipropileno (PP), y el polietileno tereftalato (PET) (llamados soluciones por precipitación). Polímeros biobasados de desempeño técnico, como numerosas poliamidas (PA) y, el tereftalato de poli-trimetileno (PTT). O parcialmente biobasados, como los poliuretanos (PUR) (European Bioplastics - EUBP, 2016).

Plásticos biobasados y biodegradables, como el ácido poliláctico (PLA), los Polihidroxialcanoatos (PHA), poli-butileno succinato (PBS), y mezclas de almidón (European Bioplastics - EUBP, 2018).

Plásticos que se basan en recursos fósiles y que son biodegradables tales como: el Polibutileno adipato tereftalato (PBAT), pero que podrían ser producidos en el futuro al menos parcialmente biobasados (European Bioplastics - EUBP, 2018).

Figura 2.2.- Tipos de bioplásticos



Fuente.- European Bioplastics (European Bioplastics - EUBP, 2016)

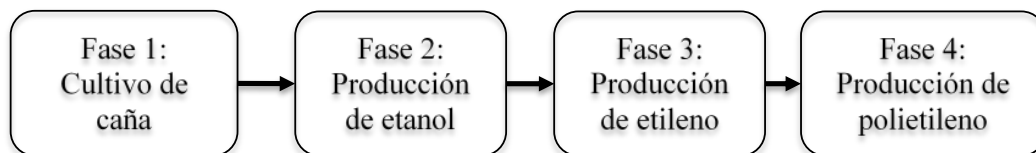
2.2.3 Proceso de producción

Se describirá en forma sintética los procesos para los bioplásticos que constituyen el objeto de este estudio.

2.2.3.1 Polietileno (PE)

El PE obtenido a partir de la polimerización del etileno, es uno de los polímeros más importantes y está disponible comercialmente. El PE biobasado fue producido masivamente por dos grandes compañías brasileras, Braskem y Dow Crystalsev. El proceso de producción del PE biobasado empieza con el procesamiento de biomasa (caña de azúcar, remolacha, o trigo) para obtener bioetanol mediante un proceso de fermentación. Después el Etanol es destilado para remover el agua y obtener una mezcla azeotrópica de etanol hidratado. Posteriormente el etanol es deshidratado a alta temperatura dando como resultado etileno. Finalmente, mediante el proceso de polimerización del etileno se obtiene el polietileno. En la Figura 2.3 se representa este esquema de producción del PE (Endah Putri, 2018).

Figura 2.3.- Proceso de producción de PE biobasado

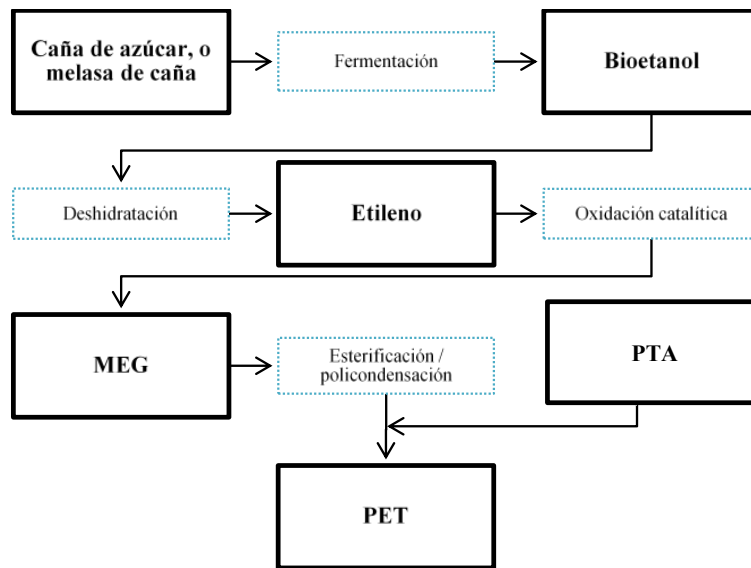


Fuente.- Adaptación propia con base en (Endah Putri, 2018)

2.2.3.2 Polietileno tereftalato (PET)

El PET biobasado es el líder en cuanto a capacidad de producción global. En el 2018 representó el 26.6% del total de bioplásticos en el mercado (European Bioplastics - EUBP, 2018). Los productos PET hechos de mono-etilenglicol de base biológica¹ (MEG) son producidos por deshidratación catalítica del etanol biobasado y el ácido tereftálico purificado (PTA) de base petroquímica (Akanuma et al., 2014; Shen et al., 2012) citado por (Endah Putri, 2018). Si se utiliza de jugo de caña de azúcar (como en Brasil), o melaza de caña de azúcar (en la India), su jugo es directamente fermentado y destilado en etanol. Después de obtener el MEG, el PET se produce mediante la polimerización (Endah Putri, 2018). El esquema de producción del PET se puede ver en la Figura 2.4.

Figura 2.4.- Proceso de producción de PET biobasado



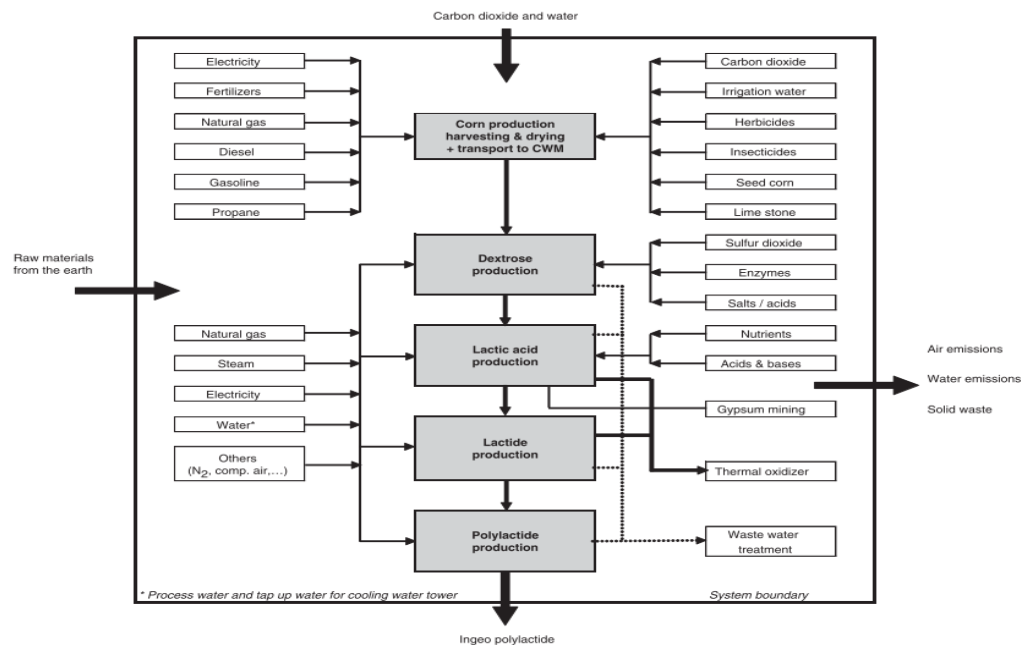
Fuente.- Adaptación propia con base en (Endah Putri, 2018)

¹ De base biológica también se indica como biobasado.

2.2.3.3 *Ácido Poliláctico (PLA)*

El PLA es un bioplástico biobasado y biodegradable derivado de fuentes renovables como El maíz, la caña de azúcar, o la papa (Castro-Aguirre et al., 2016). El PLA resulta de la polimerización de ácido láctico purificado proveniente de la fermentación de varios biomateriales renovables, como maicena, suero de leche, caña de azúcar, o remolacha. En Estados Unidos la compañía NatureWorks, utiliza maíz como materia prima. Con base en su sistema de producción, de la cuna a la puerta de la fábrica, el proceso de producción de PLA se subdivide en cinco grandes etapas (Figura 2.5): a) Producción y transporte de biomasa a las instalaciones de procesamiento, b) Procesamiento de biomasa y la conversión en dextrosa (del maíz), o en glucosa (de la caña de azúcar), c) Conversión de la dextrosa en ácido láctico, d) Conversión del ácido láctico en lactida y, e) Polimerización de la lactida en polímero de poli-lactida para formar pellets (Endah Putri, 2018).

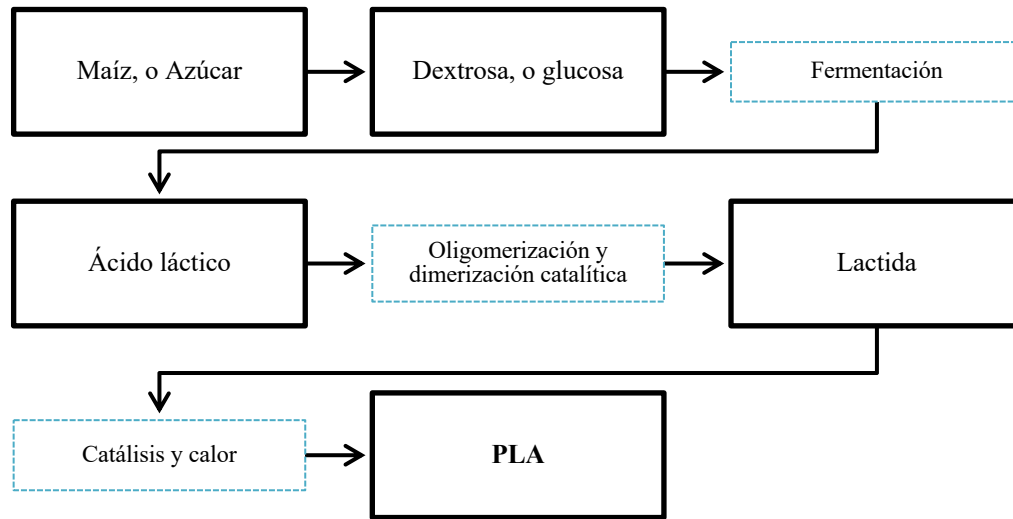
Figura 2.5.- Diagrama de flujo de la manufactura de biopolímeros



Fuente.- Tomado de (Vink & Davies, 2015)

De una manera general el proceso de producción de PLA se representa en la Figura 2.6.

Figura 2.6.- Proceso de producción de PLA biobasado



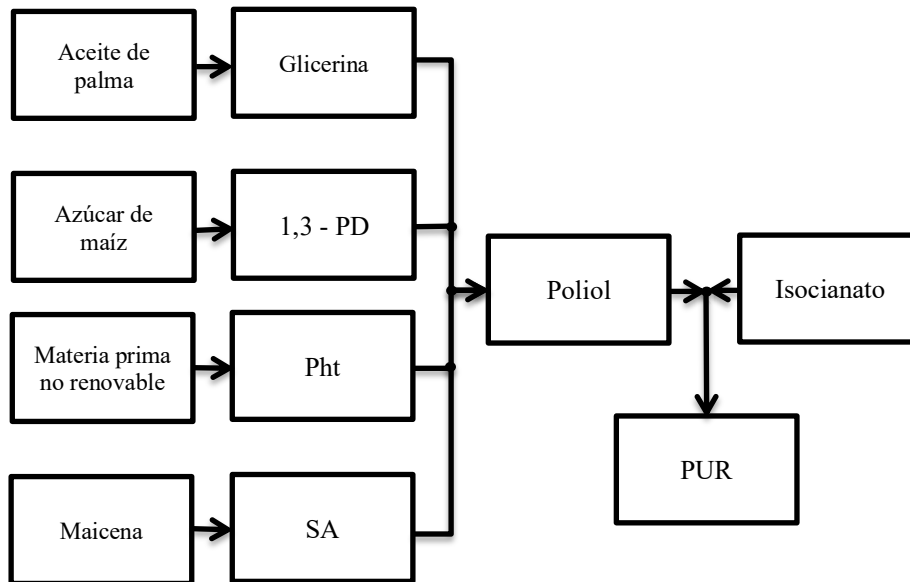
Fuente.- Adaptación propia con base en (Endah Putri, 2018)

2.2.3.4 Poliuretano (PUR)

Los poliuretanos contienen dos componentes un polioliol y un isocianato. Hay dos isocianatos principales: diisocianatos (TDI) y metil difenil isocianato (MDI). TDI se usa principalmente en la producción de espumas flexibles, por otro lado, el MDI se utiliza para producir una amplia variedad de espumas termo fijas rígidas, semiflexibles y flexibles. En este estudio, se utiliza MDI para para producir espuma flexible de poliuretano. El polioliol se obtiene de bio-glicerina, propanediol² (PDO), Anhídrido Phthalic (Pht), ácido Succini (SA). El Pht se deriva de fuentes fósiles. Mientras que, la bio-glicerina se produce de aceite de palma. El PDO y el SA, se derivan de la fermentación de maicena. El esquema del proceso de producción de PUR se muestra en la Figura 2.7 (Endah Putri, 2018).

² El 1,3-propanodiol es un compuesto orgánico lineal, un diol por tener dos grupos hidroxilo. El monómero se emplea para sintetizar varios tipos de polímeros. Puede obtenerse del petróleo, o a partir del maíz.

Figura 2.7.- Producción de PUR biobasado

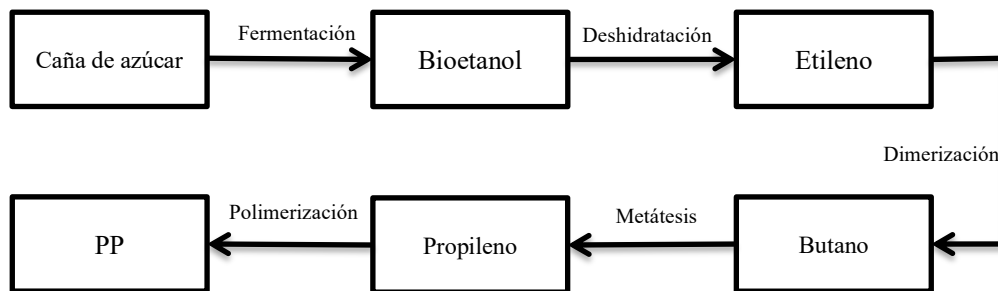


Fuente.- Adaptación propia con base en (García et al. 2017) y citado por (Endah Putri, 2018)

2.2.3.5 Polipropileno (PP)

Una vía de producción del PP es la bioquímica (frecuentemente fermentación) además, hay otra vía termoquímica (con gasificación). El método bioquímico incluye una enzima en el proceso de fermentación para convertir los azúcares en etanol y butano. El intercambio de átomos entre el etileno y el butano producen los monómeros de propileno. El esquema del proceso de producción se representa en la Figura 2.8 (Endah Putri, 2018).

Figura 2.8.- Proceso de producción de Bio-Polipropileno

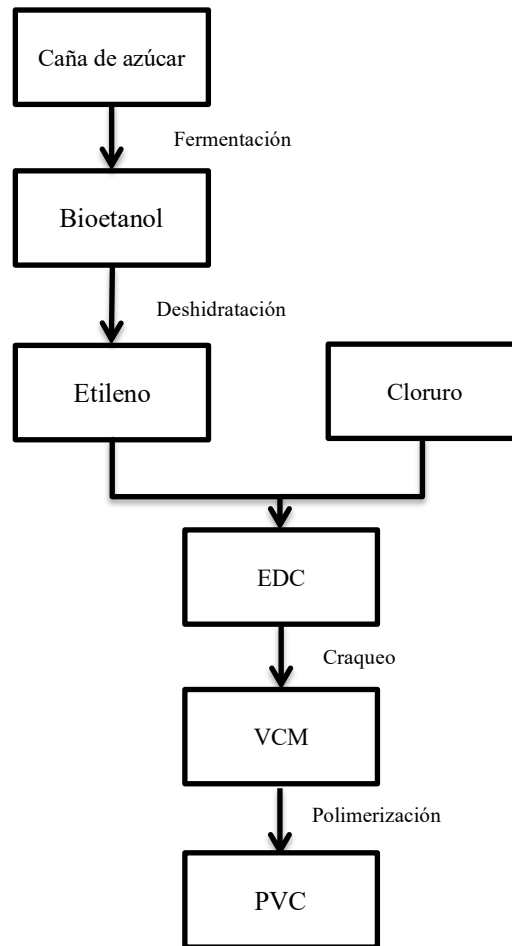


Fuente.- Adaptación propia con base en (Endah Putri, 2018)

2.2.3.6 Cloruro de polivinilo (PVC)

El PVC es producido a partir de clorina (57%) y etileno (43%). Para la producción de PVC biobasado, el etileno es producido a partir del bioetanol (el mismo proceso que para el PE biobasado). El Cloruro es fabricado por electrolisis de una solución salina. El etileno se hace reaccionar con el cloruro para producir dicloruro de etileno (EDC). EDC es convertido entonces en monómero de cloruro de vinilo (VCM). El proceso final es la polimerización del VCM en PVC (Figura 2.9).

Figura 2.9.- Proceso de producción de PVC biobasado



Fuente.- Adaptado a partir de (Endah Putri, 2018)

2.3 Huella Hídrica

El concepto de huella hídrica (HH) o water footprint fue introducido por Arjen Hoekstra y P. Hung en 2002. Se basa en la idea de “agua virtual” desarrollada por Tony Allan en 1998, la cual hace referencia al volumen total de agua dulce utilizado directa o indirectamente, a lo largo de toda la cadena de productiva para producir un bien (Allan, 1998) citado por (Vázquez del Mercado Arribas & Lambarri Beléndez, 2017). La HH también incorpora el “agua verde” o de lluvia, el “agua azul” o superficial y subterránea, así como al “agua gris”, que se refiere al volumen requerido por los cuerpos de agua receptores para asimilar los contaminantes (Vázquez del Mercado Arribas & Lambarri Beléndez, 2017).

Por concepto, la huella hídrica es un indicador del impacto del consumo humano en el agua dulce. Indica el uso total de agua dulce gris, verde y azul, utilizados tanto en forma directa como indirecta, por un consumidor o, un productor, y difiere de la medición clásica de agua extraída (Hoekstra et al., 2012). La huella de agua incluye tres componentes: la huella de agua verde (evapotranspiración de agua lluvia desde el campo para producir por ejemplo cultivo); la huella de agua azul (extracción neta de agua superficial o subterránea); y la huella de agua gris (el volumen de agua fresca requerida para asimilar los contaminantes) (Endah Putri, 2018). La Huella Hídrica Total se compone de la sumatoria de las huellas hídricas verde, azul y gris.

2.4 Huella hídrica de un proceso

Un proceso se define como un grupo de actividades que transforman flujos de entrada de materia prima o energía en flujos de salida (ISO 14046:2014, subcláusula 3.5.5) (ISO - ICONTEC, 2017). Por lo tanto, la huella hídrica de un proceso mide la cantidad de agua utilizada en la realización de las actividades del proceso para transformar los flujos de materia prima o energía que entran al proceso, en flujos a su salida. Además, la HH total del proceso es la suma de las huellas hídricas verde, azul y gris que entran o salen del proceso.

2.4.1 Huella Verde

La huella hídrica verde se refiere al consumo de recursos hídricos verdes (agua de lluvia en la medida en que no se convierta en escorrentía) (Hoekstra et al., 2011). Es un indicador del uso humano del agua de lluvia y se refiere a la precipitación sobre la tierra que no se infiltra ni escurre, sino que permanece en el suelo en la vegetación. En el caso de campos agrícolas, se refiere a la evapotranspiración del agua lluvia en campos agrícolas y plantaciones forestales, así como el agua incorporada en la cosecha o la plantación. Al hablar de un proceso, la Huella hídrica verde es el volumen de agua de lluvia evaporada o, incorporada al producto (Vázquez del Mercado Arribas & Lambarri Beléndez, 2017).

2.4.2 Huella Azul

La huella de agua azul se refiere al consumo de recursos de agua azul tanto superficial como subterránea lo largo de la cadena de suministro de un producto. "Consumo" se refiere a la pérdida de agua de la masa de agua disponible en la superficie del suelo en un área de captación. Las pérdidas se producen cuando el agua se evapora, regresa a otra zona de captación, al mar o, se incorpora a un producto (Hoekstra et al., 2011). Proporciona una medida del volumen de agua azul disponible que no ha sido consumida por actividades humanas. Al hablar de un proceso, la Huella Hídrica azul se refiere al volumen consumido como resultado de la producción de un bien o servicio (Vázquez del Mercado Arribas & Lambarri Beléndez, 2017).

2.4.3 Huella Gris

La huella de agua gris se refiere a la contaminación y se define como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes dadas las concentraciones naturales de fondo y los estándares existentes de calidad del agua ambiental [traducción

©Universidad Ean: SNIES 2812 | Vigilada Mineducación | Personería Jurídica Res. n.º. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

propia] (Hoekstra et al., 2011). Aunque ésta se puede entender como un requisito de dilución de agua, lo que se busca en realidad es reducir las emisiones contaminantes. Asociada a un proceso, la Huella Hídrica gris indica el grado de contaminación del agua dulce que puede estar asociada con los procesos de fabricación de un producto y con su cadena de suministro (Vázquez del Mercado Arribas & Lambarri Beléndez, 2017).

2.4.4 Huella de Agua de un Producto

El concepto Huella de Agua difiere del de Huella Hídrica en el objetivo del estudio para el que se utiliza el término.

Huella de agua, es una métrica o métricas basadas en un análisis de ciclo de vida con las que se cuantifican los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua (ISO 14046:2014) (ISO - ICONTEC, 2017). La huella de agua de un producto (bien o servicio 3.5.1 de NTC_ISO 14046) es una métrica que identifica los impactos potenciales sobre el agua con base en un análisis de ciclo de vida.

Por otro lado, la Huella Hídrica (Water footprint) de Hoekstra, es un indicador multidimensional, orientado a determinar el volumen de agua dulce utilizada, consumida y contaminada, en este caso para producir un producto, y medida a lo largo de toda la cadena de suministro y especificada geográfica y temporalmente (Hoekstra et al., 2011) . Además, la Huella Hídrica de un producto indica dónde y cuándo se utilizó el agua, y el volumen total es la suma de las Huellas Hídricas verde, azul y gris, utilizadas para su elaboración, en las diversas etapas de la cadena productiva (Vázquez del Mercado Arribas & Lambarri Beléndez, 2017).

2.5 Indicadores de Evaluación e impacto de los recursos hídricos

Los indicadores de evaluación e impacto de los recursos hídricos son un conjunto de herramientas que permiten cuantificar y determinar las características de la información que

©Universidad Ean: SNIES 2812 | Vigilada Mineducación | Personería Jurídica Res. n.º. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

está siendo evaluada. Dependen del objetivo y alcance del estudio, en referencia al objeto de estudio. Los indicadores de evaluación e impacto en forma general se relacionan con la disponibilidad y degradación del recurso.

Indicadores para WFN:

Para este trabajo los principales indicadores son las Huellas Hídricas azul, verde, gris, total y adicionalmente el de Agua virtual como se puede observar en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3.- Indicadores generales según WFN

Categoría	Método	Indicador	Descripción
Consumo de agua directa e indirecta	Agua virtual (AV)	m ³	Volumen de agua requerida o contaminada para la producción de un producto o servicio, medida a lo largo de su cadena de suministro.
Consumo de agua verde	Huella Hídrica Verde (HHV)	m ³	Volumen de agua lluvia evaporada o incorporada en el producto.
Consumo de agua azul	Huella hídrica Azul (HHA)	m ³	Volumen de agua superficial o subterránea evaporada o incorporada en el producto.
Cantidad de agua necesaria para disolver el agua contaminada resultante del proceso	Huella Hídrica Gris (HHG)	m ³	Volumen de agua contaminada.
La suma de HHV, HHA, HHG	Huella Hídrica total	m ³	Volumen de agua que incluye tanto el uso directo como indirecto, por un consumidor o por un productor.

Fuente.- (CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM, 2014)

- Huella Hídrica (HH). - Es un indicador del impacto del consumo humano en el agua dulce. Indica el total de uso de agua dulce gris, verde y azul, tanto en forma directa como indirecta, por un consumidor o, por un productor, y difiere de la medición clásica de agua extraída (Hoekstra et al., 2012).
- Agua Virtual (AV). – El agua “contenida” en un producto, entendiendo por tal, no únicamente la cantidad física contenida en el producto, sino la cantidad de agua que ha sido necesario utilizar para generar dicho producto. AV se configura como un indicador físico, en términos de agua para la producción de un bien o, servicio. Por un lado, el AV proporciona información acerca de los requerimientos de agua de los bienes y/o servicios. Así, se puede hablar de la cantidad de agua (en metros cúbicos) necesaria para producir un kilo de trigo, un kilo de carne de res, una cerveza, etc. Por otro lado, el AV se relaciona con el comercio, facilitando información de los flujos de AV entre países (Velázquez, 2010).

Indicadores para ISO 14046

Para que una cuantificación de huella de agua sea integral debe considerar todos los aspectos relevantes relativos a los ecosistemas, la salud humana y los recursos relacionados con el uso del agua, incluyendo la disponibilidad y degradación. La selección de las categorías de impacto a evaluar debe considerar la relevancia con respecto al producto bajo estudio, así como el cumplimiento de los principios establecidos en la norma (ISO 14046, 2014) citado por (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016).

En las Tablas 2.4 y 2.5 se muestra las Categorías de daño, métodos de evaluación e indicadores de punto medio y de punto final respectivamente, más utilizados en América Latina según estudio de (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016).

Tabla 2.4.- Categorías de daño y métodos de evaluación de punto medio.

Categoría	Método	Indicador	Descripción
Escasez	Agua disponible Remanente -AWARE	m ³ -eq	El factor de caracterización se basa en la relación entre la extracción de agua dulce para usos humanos y su disponibilidad total de agua en cierta región. Escasez = Consumo*AWARE
Disponibilidad	Huella de disponibilidad de agua	m ³ -eq	Cuantifica en un número el consumo y contaminación del proceso. Varía entre el valor positivo de la extracción (se consume toda el agua que se extrae o se devuelve en malas condiciones) y el valor negativo del vertimiento (cuando la calidad del agua de la extracción es mala y se devuelve toda el agua en óptimas condiciones).
Eco toxicidad en agua dulce	USEtox	CTUe	Estima disminución de biodiversidad acuática por emisiones al aire, agua y suelo.
Eutrofización en agua dulce	ReCiPe	Kg P-eq	Evalúa impacto en biodiversidad acuática por el incremento de nutrientes debido a emisiones en el aire, agua y suelo usando el fósforo como sustancia de referencia. También emplea como referencia condiciones de macro fauna de fuentes superficiales holandesas y datos de fuentes de agua europeas.

Fuente.- (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016)

Tabla 2.5.- Categorías de daño y métodos de evaluación de punto final.

Área de protección (Daño)	Categoría	Método	Indicador	Descripción
SALUD HUMANA	Enfermedades causadas por agua contaminada (toxicidad humana)	USEtox	DALY	Determina efectos en la salud humana, basados en USEtox y los efectos cancerígenos de las sustancias.
CALIDAD DE ECOSISTEMAS	Disminución de agua para ecosistemas terrestres (Escasez)		PDF m ² . año	Agua consumida WSI. Factor relacionado con limitación del crecimiento de plantas vasculares debido a escasez de agua azul.
	Eutrofización en agua dulce		Especies/año	Obtiene un factor de daño de las especies a partir de la concentración de nutrientes (empleando el fósforo como sustancia de referencia)
	Ecotoxicidad en agua dulce	USEtox	PDF m2.día	Estima disminución de biodiversidad acuática por emisiones al aire, agua y suelo.

Fuente.- (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016)

Para el caso de un proceso de producción de bioplásticos se toma como base el estudio de huella hídrica de un producto ya que se realizaría en forma análoga, y se establecen los indicadores de evaluación e impacto de acuerdo con el alcance del estudio. El indicador de huella hídrica en este caso es de (volumen/masa) [m^3/kg]. Volumen de agua sobre masa de producto producido.

Otros indicadores de evaluación de recursos hídricos

Adicionalmente a la HH y agua virtual se emplean en muchos trabajos, un Indicador de Disponibilidad (IcD), Estrés Hídrico (IEH) o Indicador de Presión Hídrica (IPH), Escasez de agua (EA), Autosuficiencia de agua (ASA), Dependencia de Agua Importada (DAI).

- Indicador de disponibilidad (IcD). – Es la cantidad de los recursos hídricos (potenciales aprovechables) (m^3 por habitante por año), sin considerar las capacidades para su uso en la economía, sociedad y la protección del medio ambiente, a partir de la infraestructura hidráulica creada para tal efecto (Morfa Hernández, 2012). La disponibilidad en general viene determinada, por las condiciones y comportamientos climáticos e hidrológicos existentes, en relación con otros componentes ambientales, por la densidad de población y su distribución espacial (García Fernández & Cantero Corrales, 2007).
- Indicador de Estrés Hídrico (IEH) o de Presión Hídrica (IPH). Se define como el cociente resultante entre el volumen de agua empleado para la economía, sociedad y la protección del medio ambiente, respecto a los recursos renovables totales. Este indicador ofrece una idea acerca del balance entre el uso y los recursos de agua (Morfa Hernández, 2012).
- Escasez de Agua (EA) de un país, se entiende el cociente resultante de dividir la Huella Hídrica (HH) entre el total de recursos renovables de agua (RRA), generalmente expresada como porcentaje. Es un indicador relativo del consumo de agua a partir de la disponibilidad de fuentes domésticas (García Fernández & Cantero Corrales, 2007).
- Autosuficiencia de Agua de un país, se entiende el cociente resultante de dividir la Huella Hídrica interna (HHi) entre su Huella Hídrica. Es un indicador que muestra la capacidad de un país para solventar la demanda de agua para uso doméstico, productivo, industrial y/o servicios (García Fernández & Cantero Corrales, 2007).

- En Colombia se presentan tres fuentes principales de información de indicadores del recurso hídrico (Castro, Almeida, Ferrer, & Diaz, 2015).
 - Línea base de indicadores ambientales de 2002
 - Resolución 0643 del 2004
 - Estudio Nacional del Agua ENA 2010 y ENA 2014.

2.6 Factores y limitaciones

Factores:

- Establecer el proceso objeto del estudio.
- El más importante es establecer claramente el objetivo y el alcance del estudio. Un correcto establecimiento del objetivo del estudio no solo que determinará la metodología, sino que de allí en adelante orientará en la búsqueda de los resultados más fiables.
- Establecer los flujos elementales del proceso. Teniendo en cuenta el alcance.
- Considerar las entradas y salidas hacia/desde el proceso
- La precisión científica en contraste con la aplicabilidad de las metodologías.
- Impactos externos e internos conocidos y definidos
- Las organizaciones en general se interesan por valore monetarios de sus procesos, por lo cual establecer los puntos críticos de consumo de agua en sus procesos pueden orientar a mayores análisis y acciones con el fin de obtener mayores beneficios para sus empresas.

Limitaciones:

- Cada estudio debe centrarse en el objetivo del mismo. Y está limitado por el proceso bajo influencia de quien tiene a cargo ese proceso, puesto que al final los resultados servirán de apoyo en la toma de decisiones.
- La más importante limitación es la disponibilidad de información confiable del proceso y bases de datos actuales acordes con los procesos y tecnologías utilizadas.
- Se hace necesario acceder a la toma de datos mediante la medición directa en los procesos.
- Acceso directo a la información del proceso en estudio.

©Universidad Ean: SNIES 2812 | Vigilada Mineducación | Personería Jurídica Res. n°. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

- Disponibilidad de estándares
- De carácter legal en base a las leyes y reglamentos a nivel local.
- Puede haber limitaciones en cuanto a la facilidad con los procesos pueden ser analizados y la forma en que se establezcan las unidades funcionales o procesos unitarios debe ser congruente con el proceso mismo visto en fábrica. Considerar que el flujo del proceso de producción permite establecer y limitar los procesos unitarios de entrada, intermedios y finales para de esa manera fraccionar el sistema y completar la información de cada parte del proceso.
- También se podría dificultar en el establecimiento de los procesos unitarios, en relación a la influencia de cada uno en el proceso en estudio y los procesos fuera de él quedaría fuera del estudio.
- También puede tener incertidumbre en cuanto a la calidad de los datos disponibles.
- Incertidumbre en cuanto a la ubicación geo-temporal del proceso, el cual puede llegar a ser influenciado por condiciones o factores externos.
- La tecnología utilizada y las técnicas aplicadas para la producción del bioplástico pueden influir en el resultado del estudio del proceso.
- Disponibilidad de herramientas tecnológicas de apoyo que simplifiquen la cantidad de pasos manuales que debe el usuario ejecutar, y que aporten con información de procesos similares ya en base de datos.
- El segmento de mercado en estudio proporciona procesos innovadores en donde no hay todavía suficiente información disponible.

2.7 Métodos y Herramientas para la medición del uso de agua

Método “Water Footprint Assessment”

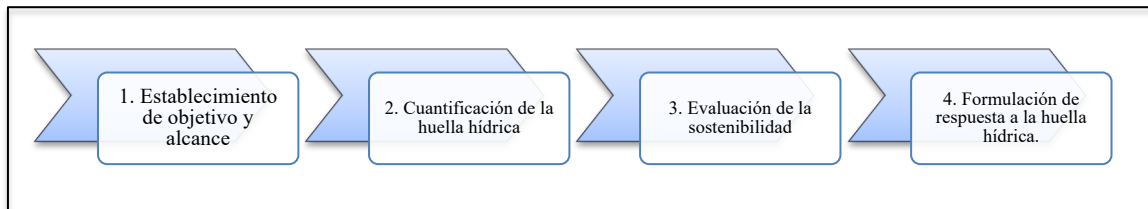
La evaluación de la Huella Hídrica es una herramienta analítica que puede ayudar a comprender y percibir cómo las actividades y productos se relacionan con la escasez de agua, la contaminación y los impactos relacionados, y qué se puede hacer para garantizar que las actividades y los productos no contribuyan al uso no sostenible del agua dulce (Hoekstra et al., 2011).

La Water footprint Network (WFN) en su publicación “The Water Footprint Assessment Manual”, estableció en 2011 el estándar global para la evaluación de Huella Hídrica. En él cubre las definiciones y métodos para contabilizar la huella hídrica. También muestra cómo se calcula la huella hídrica para procesos, para productos individuales, para consumidores, así como también para naciones y negocios (Hoekstra et al., 2011).

El proceso de evaluación de la Huella Hídrica consta de cuatro fases (Figura 2.10):

1. Establecimiento del objetivo y alcance
2. Contabilización de la huella hídrica
3. Evaluación de la sostenibilidad hídrica
4. Formulación de respuesta a la huella hídrica.

Figura 2.10.- Pasos para la cuantificación de la HH



Fuente.- Con base en (Hoekstra et al., 2011)

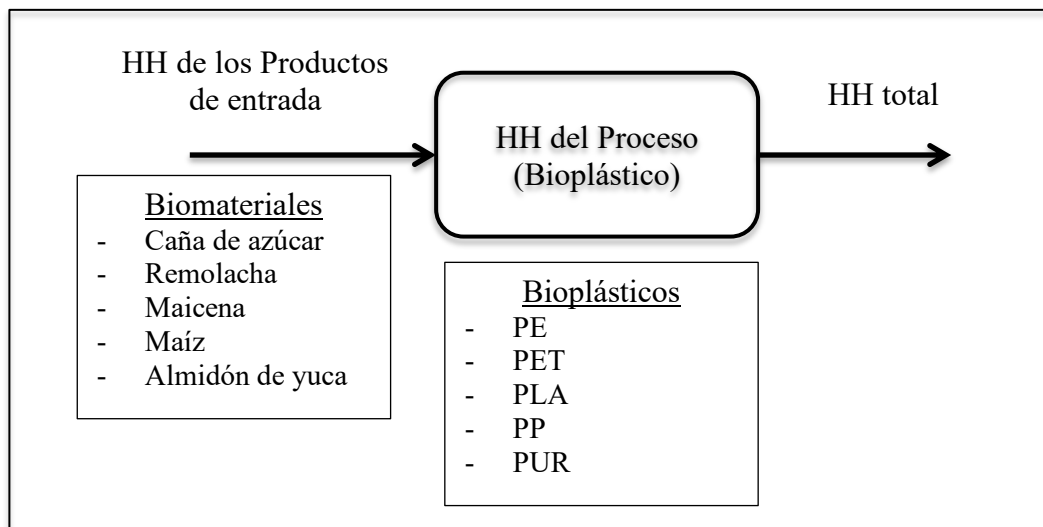
El primer paso es establecer claramente las metas y alcances, en función del objetivo de la evaluación. A continuación, en el segundo paso se recolecta la información y posteriormente se lleva a cabo el proceso de cálculo de la HH. Seguidamente en el tercer paso se realiza la evaluación la huella hídrica desde una perspectiva ambiental y también desde lo social y económico. Finalmente, en el cuarto paso se propone alternativas de respuesta, se formula estrategias o, políticas. Hay que aclarar que no todos los estudios incluyen los cuatro pasos lo cual se determina en el primer paso al establecer el objetivo y alcance del estudio (Hoekstra et al., 2011).

La medición del uso de agua

La HH de un producto es el volumen de agua dulce utilizada para producir un producto, medido en toda su cadena productiva. Muestra volúmenes consumidos por fuente y los volúmenes contaminados por tipo de contaminante, todos los componentes se especifican geográfica y temporalmente. De aquí se establecen las huellas hídricas verde, azul y gris para el producto analizado. La HH total, es el resultado de la suma de los volúmenes de agua verde, azul y gris.

Aplicando esta metodología a la investigación en curso, la huella hídrica del proceso de bioplásticos se puede calcular como la del producto. Es decir, la huella hídrica total de un producto es la suma total de las huellas hídricas de los productos de entrada y la huella hídrica del proceso. Los productos de entrada al proceso de bioplásticos en su mayoría provienen de biomasa como: cultivos de maíz, caña de azúcar, cereales, remolacha. Conociendo las huellas hídricas de los productos de entrada de acuerdo al Bioplástico y la huella hídrica del proceso, se puede obtener la huella hídrica del Bioplástico analizado (Figura 2.11).

Figura 2.11.- Representación de la HH de proceso Bioplásticos



Fuente.- Elaboración propia.

Para determinar las HH de cada biomaterial aplicado a determinado proceso de transformación en Bioplástico, se plantea utilizar el método paso a paso para analizar el proceso objetivo, en concordancia con el objetivo específico para determinar los factores, variables y restricciones aplicables al análisis, con lo cual se realizará los siguientes pasos:

1. Se realizará un inventario de los diferentes biomateriales a la entrada del proceso seleccionado.
2. Se efectúa una estimación de la eficiencia de los biomateriales en el proceso, ya que no todo el biomaterial que entra se incorpora al producto en la salida.
3. Se estima la huella hídrica de los materiales fuente, en base a estudios externos.
4. Se calcula la huella hídrica del producto final.

El inventario de los materiales que entran al proceso se deriva de estudios de evaluación del ciclo de vida e investigaciones relacionadas con los bioplásticos.

Método de ISO 14046: 2014 – Gestión Ambiental – Huella de Agua – Principios, requisitos y directrices.

La cuantificación de la huella de agua, de acuerdo con la norma internacional ISO 14046:2014, se basa en las normas internacionales ISO 14040 (ISO 14040, 2006) e ISO 14044 (ISO 14044, 2006) sobre Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Previamente se desarrollaron conceptos y metodologías para evaluar la demanda de recursos y la presión antropogénica sobre el ambiente. Entre ellos incluye la “huella ecológica” (Rees, 1992), el “agua virtual” (Allan, 1998) y la “huella hídrica” (Hoekstra, 2003). Citado por (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016).

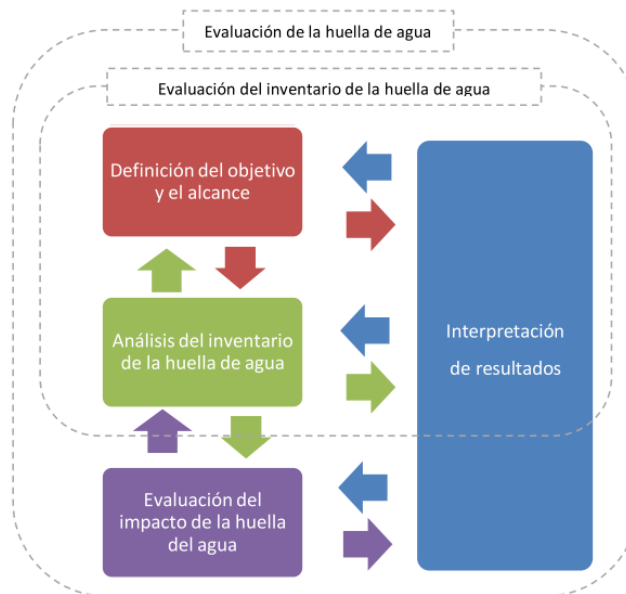
ISO 14046 define huella de agua como la métrica o métricas con las que se cuantifican los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua y considera todas las etapas del ciclo de vida, desde la adquisición de las materias primas hasta el fin de vida de un producto, servicio u organización (ISO 14046, 2014) citado por (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016). Cabe notar que esta definición indica

que es una métrica, por lo que queda abierta la posibilidad de establecer el método de cuantificación particular a cada estudio. De igual forma es clara en indicar que no cuantifica la cantidad de agua sino, los impactos ambientales relacionados con el uso del agua (Ferrer, 2014).

La metodología para el estudio de huella de agua según ISO 14046 tiene cuatro etapas iterativas (Figura 2.12):

1. Definición del objetivo y el alcance,
2. Análisis del inventario de la huella de agua,
3. Evaluación del impacto de la huella de agua
4. Interpretación de resultados.

Figura 2.12.- Fases de un estudio de Huella de Agua



Fuente.- Publicación CADIS – Huella de Agua ISO 14046 (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016)

En cada una de estas etapas se tiene en cuenta el avance e interpretación de los resultados de acuerdo con los objetivos establecidos y con la nueva información incorporada

en el proceso. En un estudio de huella de agua de acuerdo a ISO 14046, la huella puede ser un perfil integral con indicadores de punto medio y/o uno varios indicadores de punto final.

Los indicadores de punto medio sirven para comparar intervenciones ambientales a nivel de la cadena causa-efecto que se encuentra entre las extracciones (entradas) y emisiones (salidas) y un nivel de daño (a los ecosistemas, a la salud humana o a los recursos). En la Figura 2.13 se muestra los indicadores de punto medio recomendados para América Latina (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016).



Figura 2.13.- Categorías de impacto y métodos de evaluación de punto medio

Categoría	Método	Indicador	Descripción
 ESCASEZ	Agua disponible remanente -AWARE (Boulay et. al. 2016)	m ³ -eq	El factor de caracterización se basa en la relación entre la extracción de agua dulce para usos humanos y su disponibilidad total de agua en cierta región. Escasez = Consumo*AWARE <i>Consenso de 50.1% frente a 30.8% para Pfister et al. (2009) y 19.1% para Hoekstra et al. (2011).</i>
 DISPONIBILIDAD	Huella de disponibilidad de agua (Boulay et al. 2011)	m ³ -eq	Cuantifica en un número el consumo y contaminación del proceso. Varía entre el valor positivo de la extracción (se consume toda el agua que se extrae o se devuelve en malas condiciones) y el valor negativo del vertimiento (cuando la calidad del agua de la extracción es mala y se devuelve toda el agua en óptimas condiciones). <i>Consenso de 59.2% frente a Bayart et al. (2014).</i>
 ECOTOXICIDAD EN AGUA DULCE	USEtox (Rosenbaum et al. 2008)	CTUe	Estima disminución de biodiversidad acuática por emisiones al aire, agua y suelo. <i>Consenso de 74.9% frente a 25.1% por Goedkoop et al. (2008).</i>
 EUTROFIZACIÓN EN AGUA DULCE	ReCIpe (Goedkoop et al. 2008)	kg P-eq	Evalúa impacto en biodiversidad acuática por el incremento de nutrientes debido a emisiones en el aire, agua y suelo usando el fósforo como sustancia de referencia. También emplea como referencia condiciones de macrofauna de fuentes superficiales holandesas y datos de fuentes de agua europeas. <i>Consenso de 54.7% frente a 45.3% por parte de CML baseline 2000.</i>

Fuente.- Tomado de (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016)

Los indicadores de punto final hacen referencia a atributos o aspectos relacionados con el ambiente natural (calidad de los ecosistemas), la salud humana o los recursos de las futuras generaciones, identificando una problemática ambiental de relevancia (ISO 14044:2006). La categoría de daño a los ecosistemas se mide normalmente en unidades de pérdida de biodiversidad. La categoría de impacto en la salud humana se mide en DALY³, indicador de la OMS⁴ que se relaciona con el número de años perdidos por enfermedad o muerte temprana. Finalmente, la categoría de afectación a los recursos de las futuras generaciones se relaciona con el detrimento de fuentes de agua fósil o agotamiento de otras fuentes, y la energía que se requeriría para volverlas a tener disponibles a partir de la desalinización de agua marina (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016). En la Figura 2.14 se muestra los indicadores de punto final recomendados para América Latina.

Figura 2.14.- Categorías de daño y métodos de evaluación de punto final

Área de protección (Daño)	Categoría	Método	Indicador	Descripción
 SALUD HUMANA	Enfermedades causadas por agua contaminada (Toxicidad humana)	USEtox (Rosenbaum et al. 2008)	DALY	Determina efectos en la salud humana, basado en USEtox y los efectos cancerígenos de las sustancias.
 CALIDAD DE ECOSISTEMAS	Disminución de agua para ecosistemas terrestres (Escasez)	Pfister et al. 2009	PDF m ² .año	Agua consumida*WSI*Factor relacionado con limitación al crecimiento de plantas vasculares debido a escasez de agua azul.
	Eutrofización en agua dulce	ReCiPe (Goedkoop et al. 2008)	Especies/año	Obtiene un factor de daño de las especies a partir de la concentración de nutrientes (empleando el fósforo como sustancia de referencia).
	Ecotoxicidad en agua dulce	USEtox (Rosenbaum et al. 2008)	PDF m ² .día	Estima disminución de biodiversidad acuática por emisiones al aire, agua y suelo.

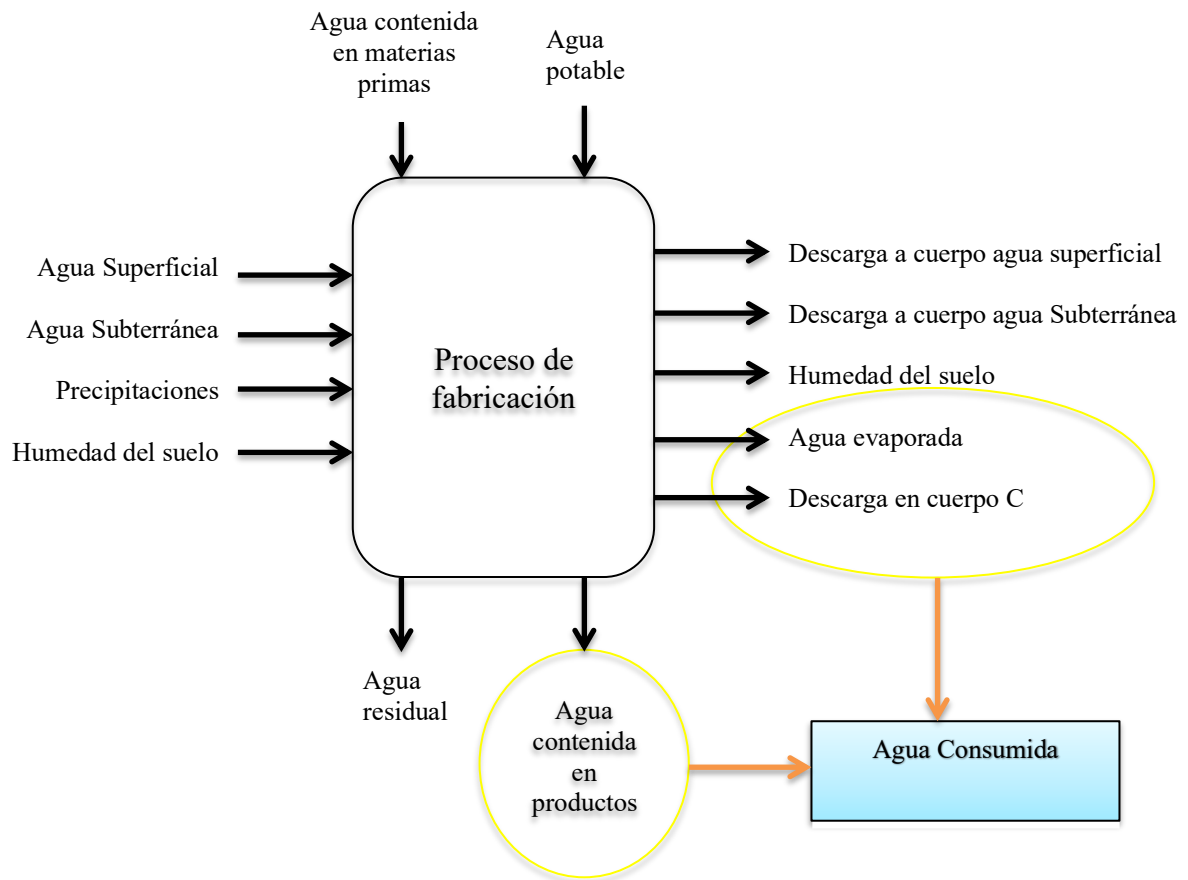
Fuente.- Tomado de (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016)

³ DALY. - Disability-Adjusted Life Year

⁴ OMS. - Organización Mundial de la Salud

Para este estudio, un balance directo del proceso de fabricación se puede representar como se indica en la Figura 2.15.

Figura 2.15.- Balance directo de agua en un proceso



Fuente.- Adaptado de (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016)

Los flujos horizontales son flujos desde y hacia el medio ambiente, mientras que los flujos verticales son flujos de agua (de la tecnósfera), desde y hacia actividades humanas. La sumatoria de las masas de entrada es igual a la sumatoria de las masas de salida. El agua evaporada y evapotranspirada sumada al agua contenida en el producto, corresponde al

agua consumida (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016).

Método de NTC- ISO 14046

La Norma de NTC-ISO 14046: 2017 es la traducción de la ISO 14046:2014 (ISO - ICONTEC, 2017). La evaluación de la huella de agua bajo esta norma cumple varios aspectos:

- Se basa en el análisis del ciclo de vida (ACV) (de acuerdo con ISO 14044).
- Es modular (huellas de diferentes etapas del ciclo de vida pueden sumarse)
- Identifica el impacto o los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua
- Utiliza los conocimientos de hidrología.

La Huella de agua (3.3.1 de NTC-ISO 14046) se define como métrica o métricas con las que se cuantifican los impactos ambientales potenciales relacionados con el agua.

La Evaluación de la huella de agua (3.3.2 de NTC-ISO 14046) es la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales ambientales relacionados con el agua utilizada o afectada, por un producto, un proceso, o una organización.

Ciclo de vida (3.3.4 de NTC-ISO 14046) se define como las etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema o producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final.

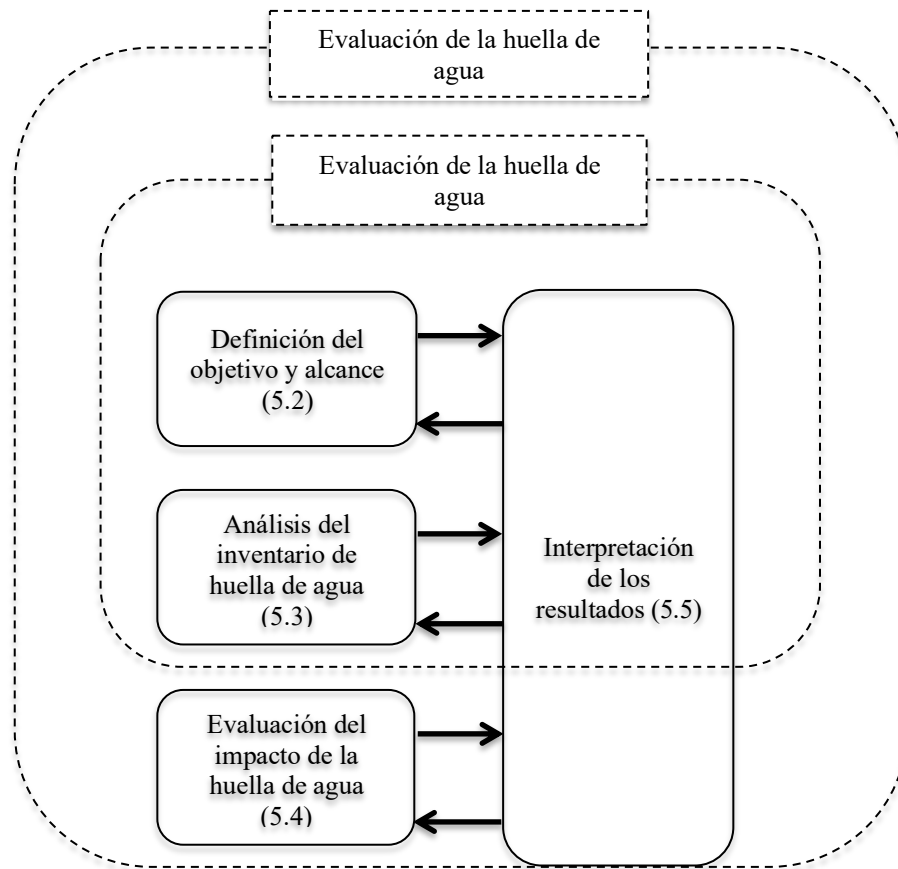
Un Proceso (3.5.5 de NTC-ISO 14046) se define como el conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados.

Metodología

La evaluación de la huella de agua de acuerdo con (NTC-ISO 14046) trata el impacto o impactos ambientales potenciales relacionados con el agua, y asociados con un producto,

proceso u organización. Debe incluir las cuatro fases del análisis del ciclo de vida (ACV), a) Definición del objetivo y alcance, b) Análisis del inventario de la huella de agua, c) Evaluación del impacto de la huella de agua; y d) Interpretación de los resultados (Figura 2.16).

Figura 2.16.- Fases de la evaluación de huella de agua NTC-ISO 14046

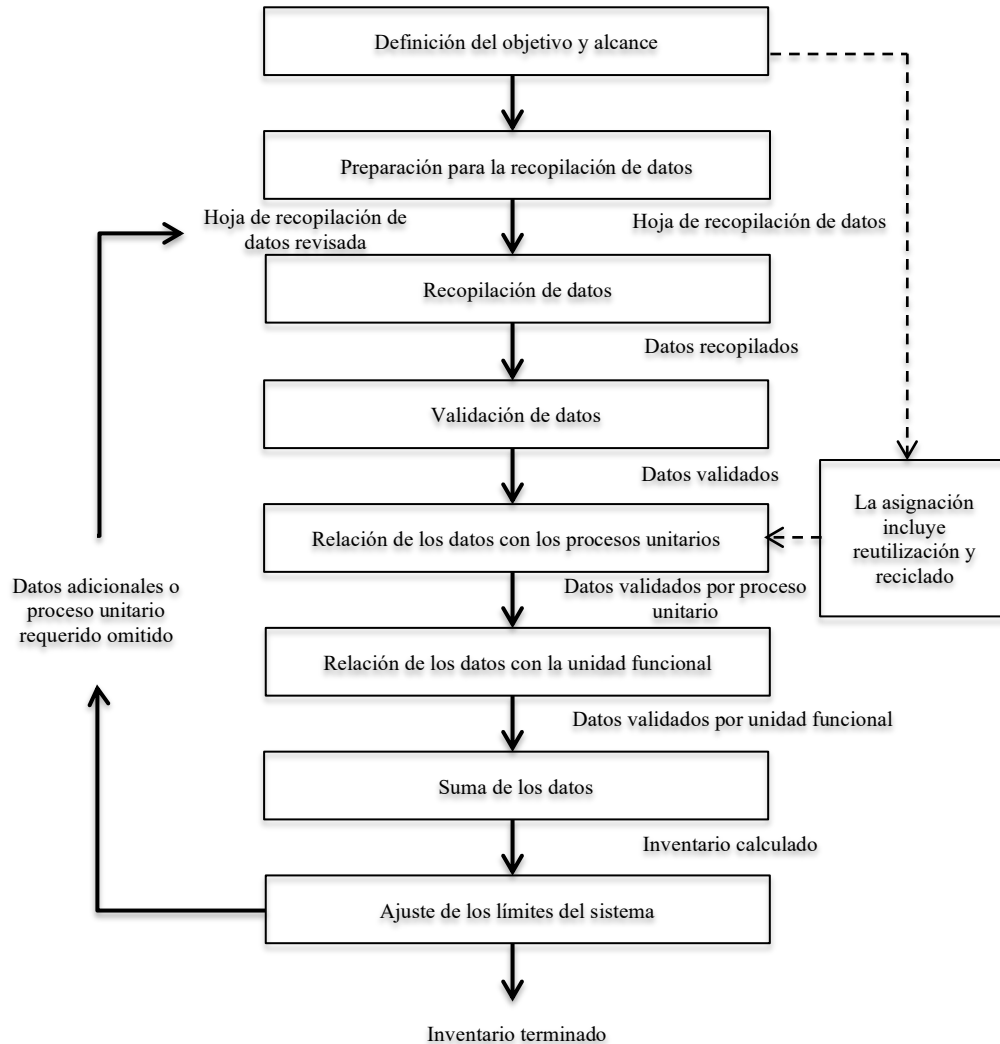


Fuente.- Tomado de NTC-ISO 14046

Cálculo del inventario de la huella de agua

Los cálculos del inventario deben seguir los procedimientos descritos en la Norma ISO 14044 e indicados en la Figura 2.17.

Figura 2.17.- Procedimiento para el análisis del inventario de huella de agua



Fuente.- Adaptado de ISO 14044-2006 (ISO, 2006)

2.7.1 Comparación de los métodos

En primer lugar, se debe hacer una distinción entre Evaluación de Huella Hídrica (HH) o en inglés WFA (Water Footprint Assessment), estandarizado por Water Footprint Network (WFN) y la Huella de Agua (HA) bajo el estándar ISO14046. La Huella Hídrica, incluye conceptos y métodos para cuantificar la cantidad de agua utilizada tanto directa como

©Universidad Ean: SNIES 2812 | Vigilada Mineducación | Personería Jurídica Res. n°. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

indirectamente en actividades humanas, identificando las diferentes fuentes de agua, verde, azul y también incluyendo el concepto de agua gris para valorar el agua contaminada proveniente de esas actividades antrópicas. El modelo se basa en una metodología paso a paso a través de toda la cadena productiva analizada. Para ISO el término Huella de Agua implica la evaluación integral de impactos potenciales generados por el uso del agua y se basa en el análisis del ciclo de vida de los sistemas, procesos u organizaciones.

Por otro lado, el estándar internacional ISO 14046 en 2014 y posteriormente el NTC-ISO 14046 en 2017 en Colombia, son estándares similares, la ISO 14046 en idioma inglés y la NTC-ISO 14046 en idioma castellano. Ambos estándares se centran en el establecimiento de los impactos que el uso del agua tiene sobre este recurso. Cuantifican también mediante un inventario, la huella de agua por las diferentes actividades antrópicas. Y como resultado se busca el planteamiento de estrategias, políticas orientadas a proteger este recurso. Este modelo se basa en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) o LCA (por sus siglas en inglés Lyfe Cycle Assessment) del proceso o sistema analizado.

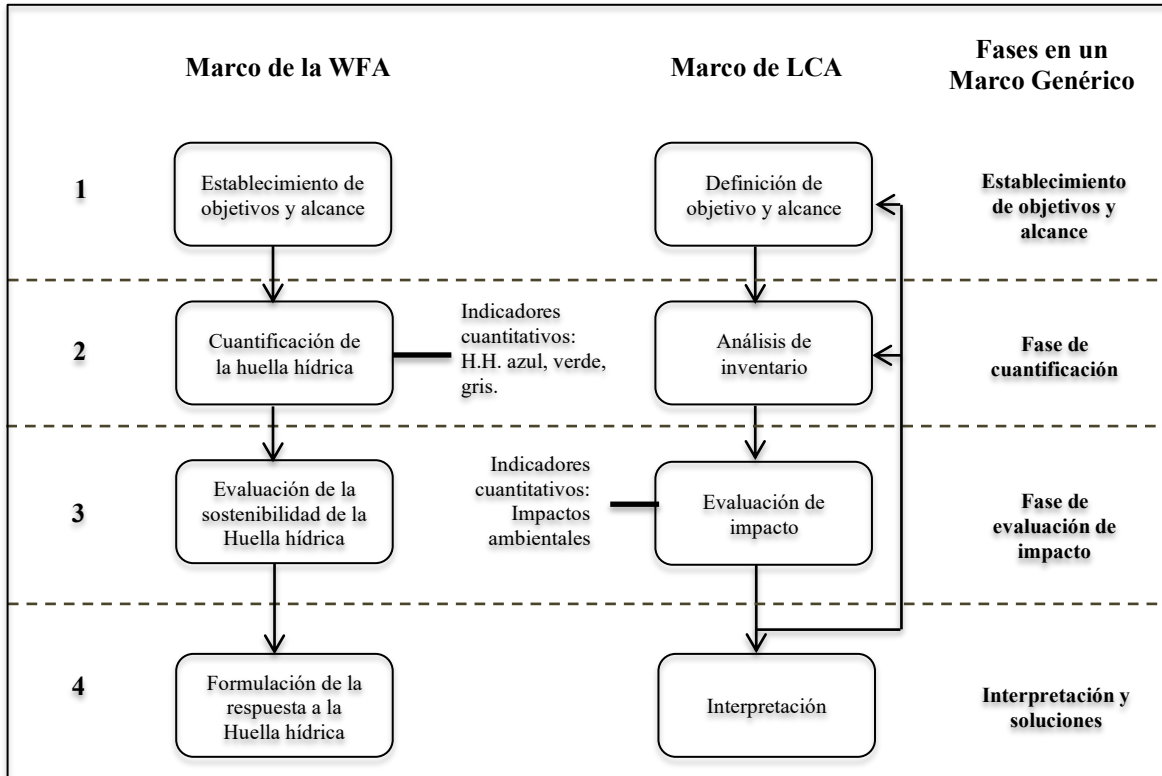
La evaluación de la HH se centra en la cuantificación del uso del agua, identificando el agua verde, agua azul y, agua gris. Mientras que la evaluación de la Huella de Agua en la NTC-ISO es más exhaustivo porque analiza el ciclo de vida y cuantifica el impacto potencial, sin diferenciar el tipo de agua sino lo que entra y lo que sale del sistema de acuerdo al ciclo de vida (Hoekstra et al., 2011).

La metodología ACV incluye cuatro fases: a) Objetivos y alcance, b) cuantificación del inventario, c) evaluación del impacto, d) interpretación. Indicadores cuantitativos de impactos son la base de esta evaluación de impactos (Ferrer, 2014).

La metodología de Huella Hídrica aborda la apropiación de recursos de agua dulce en un enfoque de cuatro pasos que incluye a) el establecimiento de objetivos y alcance, b) la cuantificación de la huella hídrica, c) la evaluación de la sostenibilidad y, c) la formulación de la respuesta. La fase de cuantificación incluye la cuantificación y mapeo de agua dulce usada con tres diferentes tipos de agua utilizada: las huellas hídricas azul, gris y verde.

En la Figura 2.18 se muestra una comparación general de los enfoques WFA y LCA.

Figura 2.18.- Comparación de las metodologías WFA y LCA



Fuente.- Elaboración propia con base en (Boulay et al., 2013)

Ambos enfoques LCA y WFA utilizan indicadores cuantitativos, pero en diferentes fases de la evaluación. WFA se basa particularmente en los indicadores de uso del agua en la fase de inventario, mientras que LCA se centra en los indicadores de impacto en la fase de impacto.

WFA define la huella hídrica como un indicador espacio-temporal explícito de la apropiación de agua dulce en la fase de cuantificación. La fase de evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica se centra en un análisis de la sostenibilidad ambiental, la eficiencia económica y la equidad social del uso y la asignación de agua dulce. La escasez de agua, cuantificada como la relación entre el uso del agua y la disponibilidad de agua, es un aspecto de la evaluación. LCA se enfoca en indicadores cuantitativos, tanto en la fase de cuantificación (en el inventario), pero más importante en la fase de evaluación de impacto.

Esta última fase describe las vías de impacto específicas y, se centra en los indicadores de impacto en tres áreas principales de protección: la salud humana, los impactos en los ecosistemas y el agotamiento de los recursos. Los índices de escasez de agua a veces se utilizan como indicadores a lo largo de estas vías de impacto [traducción propia] (Boulay, Hoekstra, & Vionnet, 2013).

El último paso es similar para ambos marcos, ya que permite una mayor interpretación de los resultados para definir soluciones que reduzcan la intervención antropogénica en el medio ambiente.

La diferencia más importante entre ambos métodos es el enfoque del producto de LCA y el enfoque en la gestión del agua de WFA. La metodología de LCA se centra en la sostenibilidad de los productos, con un enfoque integral, en donde el agua (LCA) es solo un área de atención entre otras (por ejemplo, huella de carbono, uso de la tierra). WFA se enfoca en analizar la asignación y el uso sostenible, eficiente y equitativo del agua dulce en el contexto local y global con un producto, un patrón de consumo o un enfoque geográfico [traducción propia] (Boulay et al., 2013).

En cuanto a los datos para la cuantificación, los datos de inventario de LCA se basan generalmente en bases de datos bien desarrolladas que podrían permitir que la cuantificación de WFA sea más completa y precisa, especialmente para productos industriales.

En conclusión, las metodologías están cumpliendo metas complementarias, es decir que los dos métodos pueden complementarse especialmente con lo relacionado a la confiabilidad de los datos, pero en sus indicadores no son comparables.

Normatividad en América Latina

Se ha determinado claramente dos metodologías de estudio el de la huella hídrica y el de la huella de Agua, de WFN e ISO respectivamente, ambas con el objetivo de conocer el consumo de agua y las consecuencias que trae ese consumo. En América Latina, con base en el estudio de (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016), se observa que todavía no se ha adoptado un único enfoque para realizar los estudios de huella hídrica. Esto puede deberse a que cada enfoque tiene distinto campo de aplicación y

porque sobre todo depende del objetivo y alcance del estudio. En la Tabla 2.6 se muestra los enfoques utilizados en estudios realizados en varios países latinoamericanos:

Tabla 2.6.- Enfoques aplicados a estudios de agua en América Latina

País	WFN	ISO 14046
Argentina	x	x
Bolivia	x	
Brasil	x	x
Chile	x	x
Ecuador	x	x
Perú	x	x
Colombia	x	x
México	x	x
Costa Rica	x	x
Uruguay	x	
Regional	x	

Fuente.- (CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable et al., 2016)

En Colombia, actualmente está en vigencia la norma NTC-ISO 14046, la cual como referencia normativa utiliza la ISO 14044 de 2006, Gestión Ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. Adicionalmente, también están en vigencia el conjunto de normas de Gestión ambiental de la serie 14000 de apoyo, para enmarcar el desarrollo del estudio de huella de agua.

2.7.2 Comparación de las herramientas

En esta sección se presenta una revisión general de algunas herramientas tecnológicas disponibles para el cálculo de la Huella Hídrica de diferentes sistemas, procesos o productos que nos permita tener una idea general acerca de la disponibilidad y acceso a nivel empresarial.

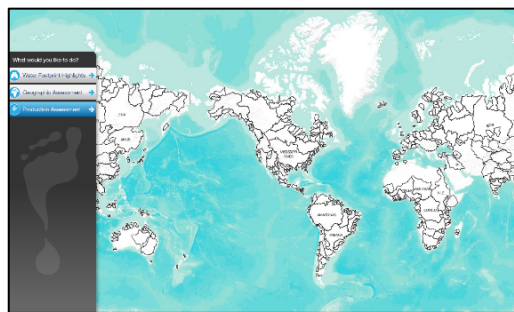
Herramientas de “Water Footprint Network (WFN)”

En la página web de WFN, se puede encontrar varias herramientas interactivas en inglés en el siguiente enlace: <https://waterfootprint.org/en/resources/interactive-tools/#CP>. a) Herramienta de evaluación de la huella hídrica, b) Un explorador para visualizar la huella hídrica de varios países, c) Una calculadora personal para determinar la huella hídrica de un individuo (Hoekstra, Chapagain, & Mekonnen, 2019). A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de ellas.

a) Herramienta de Evaluación de Huella Hídrica (Water Footprint Assessment Tool).

Es una aplicación web gratuita en línea que proporciona información clara sobre el uso humano del agua y, los impactos resultantes de ese uso. Los usuarios la utilizan para calcular y mapear la huella hídrica, evaluar su sostenibilidad e identificar acciones estratégicas para mejorar la sostenibilidad, la eficiencia y la equidad del uso del agua (Figura 2.19). Utiliza el estándar global de evaluación de la Huella hídrica e incorpora el uso de la base de datos global de huella hídrica – WaterStat – así como también datos proporcionados por el usuario (Hoekstra et al., 2019).

Figura 2.19.- Water Footprint Assessment Tool



Fuente.- (WFN, 2019)

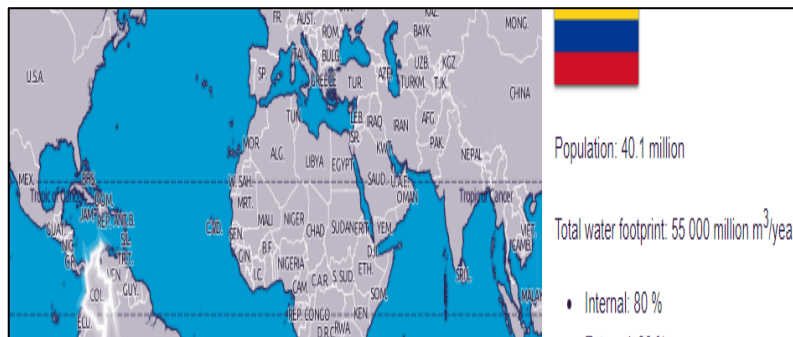
Esta herramienta permite completar una evaluación geográfica o, de producción. La evaluación geográfica le permite, explorar en detalle la huella hídrica en una cuenca fluvial, evaluar la sostenibilidad de la huella hídrica en esta cuenca, identificar formas de reducir la

huella hídrica en la cuenca. La evaluación de la producción permite, cuantificar y hacer un mapa de la huella hídrica operativa y de la cadena de suministro de una instalación o la huella hídrica de un producto especificado por el usuario, evaluar la sostenibilidad de la huella hídrica de la instalación o producto, identificar maneras de reducir la huella hídrica de la instalación o producto.

b) National water footprint explorer

Permite observar la huella hídrica del consumo nacional, en cualquier país del mapa. Incluye la huella hídrica interna y la huella hídrica que cae en otros países (huella hídrica externa) (Figura 2.20).

Figura 2.20.- National water footprint explorer

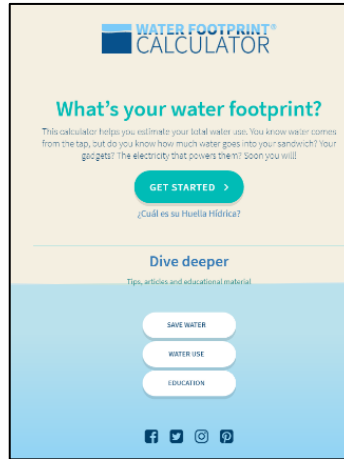


Fuente.- (WFN, 2019)

c) Calculadora personal de huella hídrica

Esta calculadora, permite cuantificar la huella hídrica personal. Toma en cuenta los hábitos, ingresos y donde vive (Figura 2.21).

Figura 2.21.- Calculadora Huella Hídrica

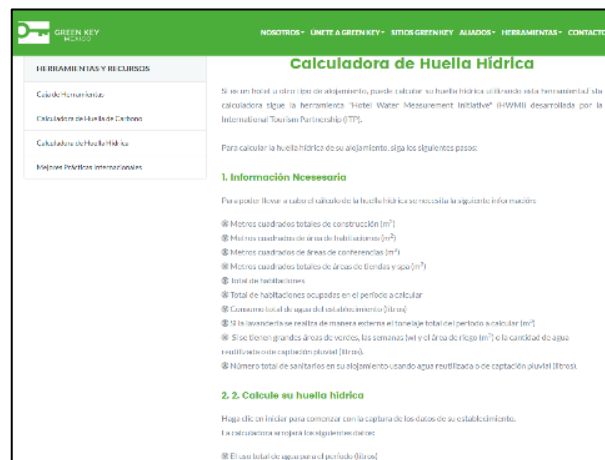


Fuente.- (WFN, 2019)

Green Key México

Green Key de México, proporciona en línea una herramienta que permite calcular la huella hídrica (Figura 2.22). Esta calculadora sigue la herramienta "Hotel Water Measurement Initiative" (HWMI) desarrollada por la International Tourism Partnership (ITP) y disponible en la web (Green Key, n.d.).

Figura 2.22.- Calculadora agua - web México



Fuente.- (Green Key, n.d.)

Huella de ciudades

El Proyecto Huella de ciudades proporciona una calculadora de la HH en línea, desarrollado para la ciudad de Cali (Figura 2.23). La calculadora permite cuantificar la huella hídrica de cada hogar con base en un formulario de preguntas que el usuario responde en forma particular, con lo cual realiza el cálculo utilizando la base de datos de WFN (Proyecto Huella de Ciudades, 2015).

Figura 2.23.- Calculadora Huella Hídrica



Fuente.- (Proyecto Huella de Ciudades, 2015)

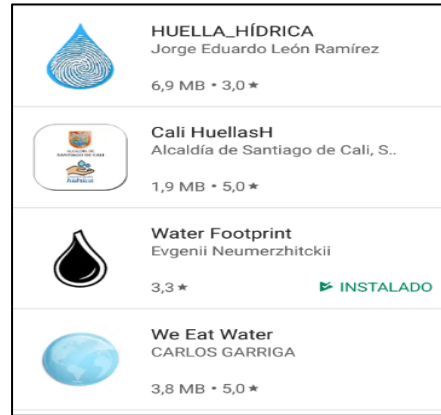
Apps en Google play store, para Android.

También se pueden encontrar algunas aplicaciones para el teléfono en la tienda de Google, entre ellas: Huella Hídrica, Cali HuellasH, Water Footprint, We Eat Water, entre otras (Figura 2.24) (Google, 2019).

HUELLA_HÍDRICA, permite medir la huella hídrica del usuario según las actividades que realiza.

Cali HuellasH, esta App desarrollada por Servicios Ambientales en el marco Proyecto Huella de Ciudades para la ciudad de Cali. Mide el uso y contaminación de agua del usuario, en sus actividades cotidianas.

Figura 2.24.- Apps - Huella Hídrica



Fuente.- Google play store

WeEatWater, una app de la Fundación We Are Water, es una App útil para conocer la huella hídrica de los alimentos y de diversas recetas del mundo.

Water footprint, es una App que muestra el volumen de agua requerido para cultivar varios productos agrícolas.

Las herramientas encontradas en la web y aplicaciones móviles presentan información y desarrollan cálculos con base en la información introducida por el usuario, algunas de ellas ya tienen en su base de datos la información, la cual puede ser mostrada al usuario por su elección. Todas estas herramientas necesitan la interacción del usuario para calcular o presentar la información.

Hay que destacar que todas las herramientas tecnológicas, contribuyen con un objetivo común que es, el de dar a conocer al usuario el uso que éste le da al agua que tiene a su disposición, motivando en todo momento al ahorro y a la conservación de este recurso. Entre todas ellas, únicamente la herramienta de evaluación de WFN permite calcular la Huella Hídrica de un área geográfica o de un proceso productivo.

Finalmente, se puede observar que todavía existe un amplio campo de aplicación para desarrollar nuevas herramientas que se puedan utilizar a nivel industrial y empresarial y más específicamente herramientas dedicadas a la industria de los bioplásticos.

2.8 Conclusión del capítulo

En este capítulo se realizó el estudio de los diferentes procesos asociados a la producción de los bioplásticos más representativos para el mercado global y para este trabajo, tales como: el polietileno (PE), el polietileno tereftalato (PET), el ácido poliláctico (PLA), el poliuretano (PUR), el polipropileno (PP), y el Policloruro de Vinilo (PVC), todos ellos biobasados, los cuales en conjunto representan cerca del 78% de los bioplásticos producidos, de una capacidad instalada de producción global en 2018 de 2.11 millones de toneladas aproximadamente. También se ha descrito en forma general sus procesos de producción en función de sus unidades de proceso y servicios requeridos.

Los enfoques y metodologías de WFN y NTC-ISO son aplicables a los procesos, productos, u organizaciones. Pero la selección de una determinada metodología, en mi opinión, está más influenciada por la disponibilidad de información y por la familiaridad con una u otra metodología. La metodología WFN ha sido más aplicada que la de ISO a nivel mundial por ser la primera en haber sido establecida para ese propósito. En América Latina, sin embargo, se ha venido utilizando las metodologías de WFN e ISO140046, conforme al desarrollo y estandarización del proceso a nivel internacional, pero muy influenciado por el propósito de cada estudio y, a pesar de eso, existen mayor cantidad de estudios de referencia para el enfoque y metodología WFN. En Colombia está aceptada la norma NTC-ISO 14046, la cual se basa en el estudio de ciclo de vida para productos, procesos, organizaciones.

Existen herramientas tecnológicas disponibles en internet, en páginas oficiales y en sitios afines a la temática de la huella hídrica. A pesar de ello, todavía se observa un amplio campo para desarrollar más herramientas específicas para el sector industrial y de los bioplásticos.

CAPÍTULO 3

3 MÉTODO

La Evaluación de Huella Hídrica (HH) o Water footprint Assessment (WFA) con la metodología de Water Footprint Network (WFN), y la Evaluación de Huella de Agua bajo el estándar NTC-ISO, se diferencian principalmente en el enfoque marco utilizado para su desarrollo. El WFA se enfoca en cuantificar y evaluar la HH, mientras que la evaluación de Huella de Agua se enfoca en cuantificar la huella de agua e identificar los impactos potenciales del uso del agua. Siendo éste último, el que puede alcanzar una dimensión más integral y detallada.

En relación al concepto de huella hídrica asociado con el proceso de fabricación de bioplásticos, éste se define como el volumen total de agua dulce empleado, directa o indirectamente, a lo largo del todo el ciclo productivo del bioplástico, expresado como volumen de agua en metros cúbicos (m³) por cantidad de producto producido en kilogramos (kg). En este consumo se distinguen tres componentes, los cuales hacen referencia a tres tipos de agua: agua azul, agua verde y agua gris (Hoekstra et al., 2011).

La evaluación del impacto del uso de agua y el análisis de Huella Hídrica, tal como está propuesto en el tema de este trabajo, se enfoca en determinar la huella hídrica de un proceso de fabricación de bioplásticos a través de su ciclo de vida, y también en generar una metodología para su posterior aplicación como, por ejemplo, para el desarrollo de herramientas tecnológicas.

Cabe precisar que una evaluación de Huella de agua, según NTC e ISO también puede aplicarse al proceso analizado aplicando la metodología de ACV. El objetivo y el alcance de la evaluación deben quedar muy bien definidos y remitirse al proceso de fabricación del bioplástico analizado con la finalidad de identificar los potenciales impactos del uso del agua en dicho proceso.

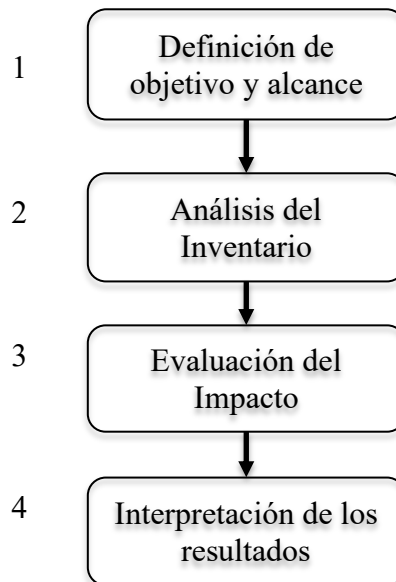
De acuerdo con el alcance limitado al proceso de fabricación, se debe también aplicar adecuadamente la terminología que especifica la norma. En este caso, este estudio al limitarse

al proceso, no se puede considerar como un estudio integral de huella de agua y debe ser descrito, por ejemplo, como un estudio de huella de agua por disponibilidad, o escasez.

La aplicación de la metodología busca establecer parámetros de referencia dentro del proceso para determinar el impacto del uso de agua entre las diferentes fases que conforman el proceso en estudio. Para finalmente encontrar los aspectos potenciales de mejora que orienten la gestión de los recursos.

El tema y el objetivo general de este trabajo definen la ruta a seguir en el logro de los objetivos específicos que permitan definir los pasos a aplicar. Para la evaluación del impacto del agua usada desde una perspectiva del ACV el estudio general se lleva a cabo en cuatro etapas representadas en la Figura 3.1: definición de objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto e interpretación de los resultados (Liptow & Tillman, 2009).

Figura 3.1.- Evaluación del Impacto (Enfoque ACV)

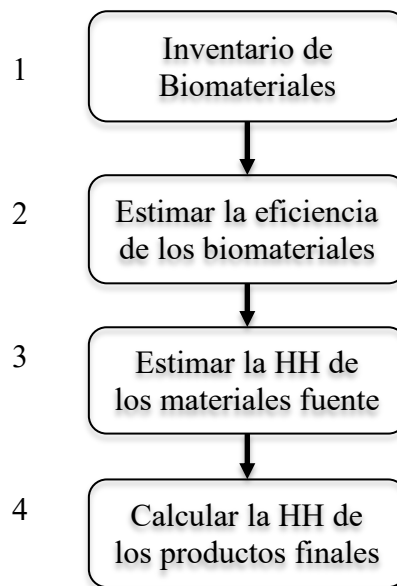


Fuente.- (Liptow & Tillman, 2009).

El límite establecido en el alcance deja como opción para este trabajo la aplicación de datos obtenidos mediante la investigación del proceso y no por una medición directa de volúmenes, masas y energía.

El Análisis del inventario se realiza para cuantificar la HH utilizando, el método de cuatro pasos representado en la Figura 3.2: Realizar el inventario de los diferentes biomateriales, estimar la eficiencia de los biomateriales, estimar la HH de los materiales fuente y, calcular la HH de los productos finales (Endah Putri, 2018).

Figura 3.2.- Análisis del Inventario para cuantificar la Huella Hídrica



Fuente.- (Endah Putri, 2018)

El método utiliza el enfoque acumulativo paso a paso, cuantificando la huella hídrica en función de todas las huellas hídricas de los productos de entrada que fueron necesarios desde el inicio y hasta llegar a la última etapa del proceso para producir ese producto y la huella hídrica del proceso de esa etapa de procesamiento (Hoekstra et al., 2011).

Para este estudio, se considera al bioplástico como un producto, que resulta del proceso de fabricación. Por lo cual la huella hídrica del bioplástico es, la cantidad total de las huellas hídricas de los productos de entrada y la huella hídrica del proceso.

$$WF\ prod [p] = \left(WF\ proc [p] + \sum_{i=1}^y \left(\frac{WF\ prod [i]}{fp[p,i]} \right) \right) \times fv[p] \quad (1)$$

Donde:

$WF\ prod [p]$ es la huella hídrica (volumen/masa) del producto (p) a la salida

$WF\ prod [i]$ es la huella hídrica del producto (i) de entrada

$WF\ proc [p]$ es la Huella Hídrica del proceso, de la etapa que transforma los (y) insumos o materiales de la entrada, en (z) productos en la salida.

$f_p [p,i]$ es la fracción producto

$f_v [p]$ es la fracción de valor.

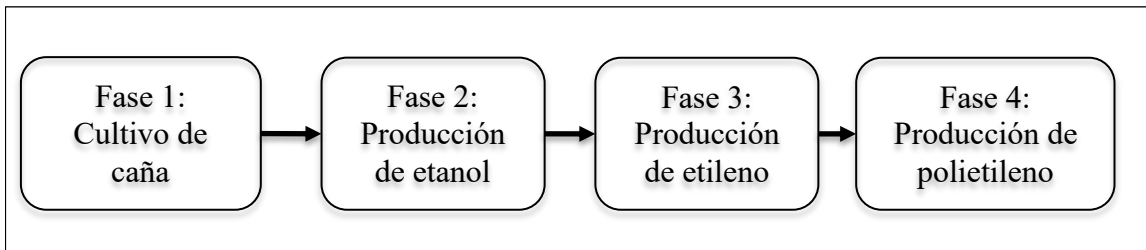
La fracción producto ($f_p [p,i]$) se define como el peso de producto primario obtenido por tonelada de producto cultivado (Chapagain & Hoekstra, 2003). Basados en este término, la fracción de producto es recíproco de la eficiencia de la materia prima suministrada. La WF_{proc} incluye a la huella hídrica de la electricidad, calor, transporte. Para el calor se asume que el 100% del calor viene de gas natural. La huella hídrica del gas natural es 0.66 m³/GJ (Mekonnen et al. 2015) citado por (Endah Putri, 2018). Para el transporte, la huella hídrica es la misma que para el diésel; se asume que el transporte utiliza camiones a diésel. Ya que el diésel es un producto del petróleo la huella hídrica del diésel se puede calcular con la huella hídrica del petróleo considerando la fracción indicada en la fórmula.

Para ilustrar el procedimiento, se aplica la metodología al caso del biopolietileno:

Como antecedente se debe indicar que para este análisis se toma como referencias valores disponibles en la literatura, ya que no se cuenta con valores directos específicos al caso colombiano. También se revisa publicaciones disponibles en la Internet acerca de la industria brasilera, estadounidense e, hindú en donde también se produce biomasa de caña de azúcar.

En este estudio, el proceso general de evaluación de HH se inicia con el fraccionamiento del proceso de producción del biopolietileno, determinando las principales fases que lo componen, las cuales se representan en la Figura 3.3.

Figura 3.3.- Proceso de producción del Bio-Polietileno



Fuente.- (Endah Putri, 2018)

Fase 1, representa el cultivo de caña y su transporte hacia la planta de producción de etanol. En el cultivo de la caña ya se utiliza agua. Después la caña se transporta desde el campo de cultivo hasta la planta, produciendo un gasto energético por transporte cuya HH se deduce a partir del gasto de combustible utilizado por el camión utilizado (se asume que usa combustible tipo diésel) y que su capacidad es de 32 toneladas. Se aplica una distancia óptima desde el cultivo a la planta de 20 km, de los cuales en un sentido el camión recorrerá vacío y en el otro completamente cargado. De igual forma se asume que el camión consumirá 50 litros de diésel cargado, y 30 litros de diésel cuando está vacío.

Fase 2, transformación de Caña de azúcar en Bioetanol. Al proceso entra caña de azúcar cultivada en los campos, la cual es procesada para producir Bioetanol.

Fase 3, Transformación de Bioetanol en Etileno. El bioetanol es deshidratado para producir etileno para lo cual requiere aporte de energía eléctrica y combustible.

Fase 4, Transformación de etileno en polietileno. Durante la producción de etileno y la polimerización se requiere electricidad y combustible.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se continúa con el proceso indicado en la Figura 3.2 para desarrollar la evaluación de la Huella Hídrica del objeto de este estudio.

3.1 Determinación del consumo de agua

La Huella Hídrica como indicador multidimensional, permite diferenciar entre el agua consumida (según el lugar de donde provenga) y el agua contaminada. Así se distingue entre Huella Hídrica azul (HH_{azul}), verde (HH_{verde}) y gris (HH_{gris}), la suma de estos componentes constituye la Huella hídrica total de un proceso (Morfa Hernández, 2012).

$$HH_{\text{proceso}} = HH_{\text{azul}} + HH_{\text{verde}} + HH_{\text{gris}} \quad (2)$$

El resultado de esta evaluación dará como resultado un volumen de agua en metros cúbicos (m^3), en función de la cantidad de biopolímero producido en kilogramos (kg).

3.2 Evaluación y cálculo de la Huella Hídrica Azul (HH_{azul})

El agua azul, es el agua dulce que fluye por los ríos y de los acuíferos. La Huella hídrica azul superficial y subterránea que se refiere al uso de los recursos de agua azul, a lo largo de la cadena de suministro de un producto. Y muestra el volumen consumido como resultado de la producción de un bien o servicio. Se expresa como:

$$HH_{\text{proc,azul}} = \text{Evapotranspiración agua azul} + \text{incorporación agua azul} \quad (3) \\ + \text{Flujo no retornado}$$

La unidad de medida de la Huella Hídrica Azul es [volumen / tiempo], por ejemplo: $\text{m}^3/\text{día}$.

3.3 Evaluación y cálculo de la Huella Hídrica Verde (HH_{verde})

El agua verde es la que sostiene el ecosistema terrestre y se utiliza directamente para la producción de la biomasa, en los cultivos de maíz, caña de azúcar, remolacha, yuca, etc. Esta

se pierde por evaporación del suelo o, por transpiración a través de las plantas (Morfa Hernández, 2012).

Dentro de un proceso de producción, la Huella Hídrica Verde es el volumen de agua lluvia evaporada o incorporada al producto. Se expresa como:

$$HH_{proc,verde} = \text{Evapotranspiración agua verde} \quad (4) \\ + \text{incorporación agua verde}$$

La unidad de medida de la Huella Hídrica verde es [volumen/tiempo], por ejemplo: m³/día.

3.4 Evaluación y cálculo de la Huella Hídrica Gris (HH_{gris})

La huella hídrica gris se calcula dividiendo la carga contaminante (L, en masa/tiempo) entre el estándar de calidad de agua de ese contaminante (concentración máxima aceptable, C_{max} en masa/volumen), menos su concentración natural en el cuerpo receptor (C_{nat} en masa/volumen) (Hoekstra A., Chapagain, Aldaya & Mekonnen, 2011) citado por (Vázquez del Mercado Arribas & Lambarri Beléndez, 2017).

$$HH_{proc,gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \rightarrow \text{resultado en } \left[\frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \right] \quad (5)$$

3.5 Cálculo de la huella hídrica de un producto

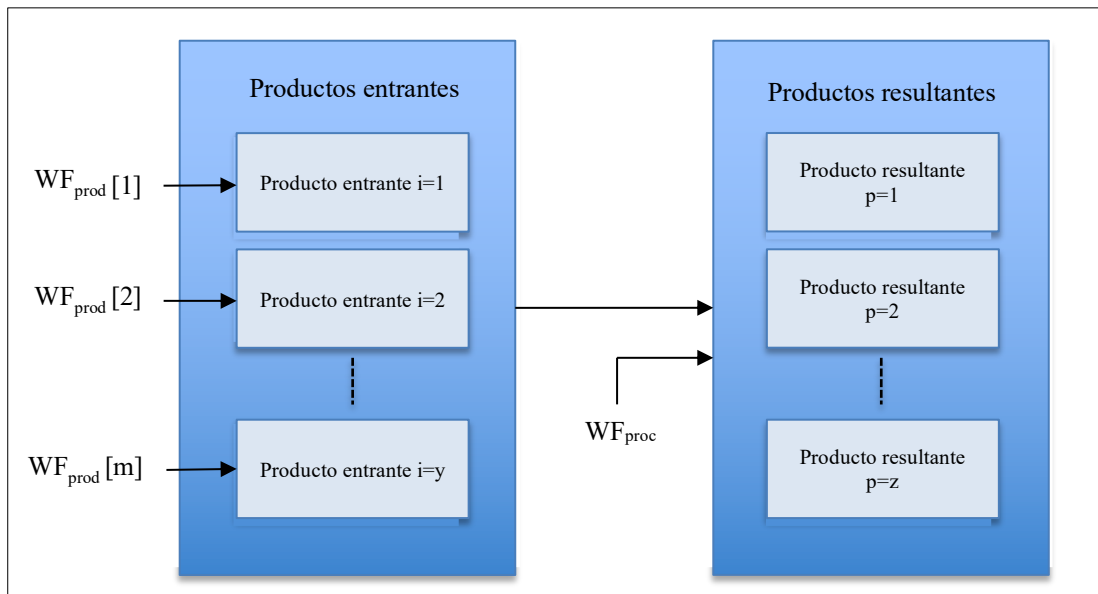
La Huella Hídrica de un producto se estima considerando el consumo de agua y la contaminación en todos los pasos de la cadena productiva. Su cuantificación es similar a la de todos los productos (sean estos: agrícolas o, industriales) o, a la de los servicios.

Para estimar la huella hídrica de un producto es necesario entender cómo se produce e identificar el sistema de producción. Para ello es necesario establecer en el sistema de producción los pasos del proceso o los procesos unitarios. Hay que tener en cuenta que las características del proceso y circunstancias de la producción diferirán de un lugar a otro, por lo cual el lugar de producción afectará el tamaño y color de la huella hídrica.

Para este trabajo, se esquematiza los procesos productivos para los diferentes bioplásticos, lo cual hace parte del método de evaluación aquí mencionado.

La huella hídrica de un producto puede ser estimada de dos formas: con el enfoque de suma de cadenas o, el enfoque acumulativo de los pasos de proceso. El primer enfoque únicamente se aplica si la salida del proceso da como resultado un único producto. En el caso de los bioplásticos, se aplicará el enfoque acumulativo ya que de estos procesos se obtiene no solamente el polímero, sino también un componente de efluentes que salen del proceso. El enfoque acumulativo se basa en la cuantificación de las huellas hídricas de los productos de entrada necesarios para producir el producto y la huella hídrica del proceso, y se representa en la Figura 3.4.

Figura 3.4.- Esquema de proceso de un sistema de producción de “p” productos.



La huella hídrica de un producto “p” ($WF_{prod}[p]$) resultante de un proceso, se calcula como:

$$WF_{prod}[p] = \left(WF_{proc}[p] + \sum_{i=1}^y \frac{WF_{prod}[i]}{f_p[p,i]} \right) \times f_v[p] \quad \left(\frac{\text{volumen}}{\text{masa}} \right) \quad (6)$$

En donde:

$WF_{prod}[p]$ es la HH (volumen/masa) del producto p resultante, $WF_{prod}[i]$ es la HH (volumen / masa) del producto i que entra al proceso, $WF_{proc}[p]$ es la HH del paso de proceso que transforma los productos a la entrada “y”, en productos resultantes “z”, expresado en uso de agua por unidad de producto procesado (volumen/masa). El parámetro $f_p[p,i]$ es la fracción de producto y, el parámetro $f_v[p]$ es una fracción de valor.

En la ecuación la huella hídrica del proceso se calcula en términos de volumen de agua por unidad de producto producido.

Si en un sistema entran al proceso “y” productos y resultan “z” productos de salida, enumerados desde p=1 hasta p= z. Si se utilizó agua durante este proceso, la Huella hídrica (WF o HH) del proceso se adiciona a las HH de los productos de entrada antes de distribuir la HH en los múltiples productos de salida.

Para calcular la huella hídrica del producto final en un sistema de producción, se puede calcular las HH de los recursos en donde inicia la cadena de suministro y entonces hacer el cálculo, paso a paso hacia los productos intermedios, y luego calcular la HH del producto final. El primer paso es siempre obtener la HH de los productos que entran y del agua usada para procesarlos para obtener productos a la salida. El total de estos componentes se distribuye sobre los productos a la salida, basados en la fracción de producto y en la fracción de valor.

3.6 Estructura de matriz de evaluación e impacto de uso del agua

Un Aspecto ambiental (3.2.2 de NTC-ISO 14001) se define como el elemento de las actividades o productos o servicios de una organización que interactúa o puede interactuar con el medio ambiente (ISO - ICONTEC, 2015).

Impacto ambiental (3.2.4 de NTC-ISO 14001) se define como el cambio en el medio ambiente, ya sea adverso o beneficioso, como resultado total o parcial de los aspectos ambientales de una organización (ISO - ICONTEC, 2015).

La evaluación de los impactos del consumo de agua supone la determinación de factores de caracterización para el agua azul, agua verde y agua gris, que relacionan el consumo en cada caso con el impacto asociado.

La Matriz de impacto ambiental, es el método analítico por el cual se le asigna la importancia (I) a cada aspecto ambiental posible de la ejecución de un proyecto en todas y cada una de sus etapas. Para elaborar la matriz de evaluación de impactos, se toma como base la metodología causa-efecto con los criterios propuestos por (Conesa F., Conesa, R., & Garro, R., 1997) citado por (Coytello & Gómez, 2017).

Ecuación de cálculo de la importancia (I) de un impacto ambiental:

$$I = \pm [3i + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC] \quad (7)$$

Donde:

\pm = Naturaleza del impacto

I = Importancia del impacto

i = Intensidad o grado probable de destrucción

EX = Extensión o área de influencia del impacto

MO = Momento o tiempo entre la acción y la aparición del impacto

PE = Persistencia o permanencia del efecto provocado por el impacto

RV = Reversibilidad

SI = Sinergia o reforzamiento de dos o más efectos simples

AC = Acumulación o efecto de incremento progresivo

EF = Efecto (tipo directo o indirecto)

PR = Periodicidad

MC = Recuperabilidad o grado posible de reconstrucción por medios humanos

En la Tabla 3.1 se resume los indicadores para la evaluación de impactos. Esta matriz se aplica a cada evaluación de Huella Hídrica, para posteriormente efectuar el análisis respectivo.

Signo (\pm).- Carácter del impacto. + Si es beneficioso (cuando el resultado de la acción sobre el factor ambiental produce una mejora de la calidad ambiental) o, - si es perjudicial (cuando el resultado de la acción produce una disminución de la calidad del factor ambiental).

Intensidad (In).- Es el grado de destrucción o restauración (dependiendo del Signo) de la acción sobre el factor ambiental.

Extensión (Ex).- Atributo que refleja el área de influencia del impacto en relación con entorno y factor del proyecto.

Momento (Mo).- El tiempo que transcurre entre la aparición de la acción y el comienzo del efecto sobre el factor del medio considerado.

Persistencia o duración (PE).- Tiempo que permanecerá el efecto desde su aparición y, a partir del cual el factor afectado retomaría condiciones previas a la acción.

Tabla 3.1.- Indicadores Matriz de Evaluación de impactos

Signo		Intensidad (i)	
(Naturaleza del impacto)		(Grado de destrucción)	
Beneficioso	+	Baja	
Perjudicial	-	Media	
		Alta	
		Muy Alta	
		Total	
Extensión (EX)		Momento (MO)	
(Área de influencia)		(Plazo de manifestación)	
Puntual		Largo plazo	
Parcial		Mediano plazo	
Extenso		Inmediato	
		Crítico	
Persistencia (PE)		Reversibilidad (RV)	
(Permanencia del efecto)			
Fugaz		Corto plazo	
Temporal		Mediano plazo	
Permanente		Irreversible	
Sinergia (SI)		Acumulación (AC)	
(Potenciación de la manifestación)		(Incremento progresivo)	
Sin sinergismo (simple)		Simple	
Sinérgico		Acumulativo	
Muy sinérgico			
Efecto (EF)		Periodicidad (PR)	
(Relación causa efecto)		(Regularidad de la manifestación)	
Indirecto		Irregular	
Directo		Periódico	
		Continuo	
Recuperabilidad (MC)			
(Posibilidad de reconstrucción)			
Recuperación Inmediata			
Recuperable			
Mitigable			
Irrecuperable			

Fuente.- (Coytello & Gómez, 2017)

Reversibilidad (RV).- Es la posibilidad de reconstrucción del factor afectado por el proyecto por medios naturales, una vez que esta deja de actuar sobre el medio.

Recuperabilidad (MC).- Posibilidad de reconstrucción total o parcial del factor afectado como consecuencia del proyecto.

Sinergia (SI).- Acción de dos o más causas cuyo efecto es superior a la suma de los efectos individuales.

Acumulación (AC).- Incremento progresivo de la manifestación del efecto.

Efecto (EF).- Relación causa-efecto, o sea a la forma de manifestación del efecto sobre un factor.

Periodicidad (PR).- Es la regularidad de manifestación del efecto.

3.6.1 Alternativa de evaluación

Como alternativa de evaluación del impacto del consumo de agua en los procesos de producción de bioplásticos y, para el caso del biopolietileno (tema tratado en este trabajo) se propone realizar una comparación entre las Huellas Hídricas azul, verde y, gris del bioplástico, de las diferentes etapas o fases de su proceso de producción, con estos resultados se pretende determinar la o las fases con mayor impacto en el uso de agua. El resultado pretende servir de guía para orientar las estrategias organizacionales de sostenibilidad de este recurso.

3.6.2 Evaluación de impacto

Con base en los datos establecidos en la matriz y/o la alterativa de evaluación, para el bioplástico en estudio, se plantea unas conclusiones y recomendaciones para mejorar la gestión de los recursos materiales y energía que afectan a las fuentes hídricas.

3.6.3 Propuesta metodológica de evaluación

En el Flujograma 3.1 se representa la metodología general para desarrollar el estudio objeto de este trabajo, el cual se describe a continuación.

Definir Objetivo y alcance. Es importante definir el objetivo y alcance del estudio, teniendo en cuenta las limitaciones desde el inicio.

Determinar las fuentes de información y de datos, si es directa o indirecta. Directa cuando se puede medir en el proceso, se puede establecer impactos potenciales relacionados, en este caso se puede optar por un completo análisis de huella de agua integral (ISO 14046). Si por el contrario no se cuenta con información directa, solamente se puede utilizar informaciones indirectas de estudios o, bases de datos o, escalarlos desde análisis y/o simulaciones en laboratorio, entonces un análisis de un aspecto puede ser aplicado ejemplo Análisis de Huella de agua de disponibilidad con base en ISO y ACV.

Definir el proceso y enfoque del estudio. También se puede optar por el proceso en base a WFA de WFN como primera aproximación para determinar en forma general las fuentes de agua y los impactos relacionados con su uso en el proceso.

Analizar el proceso y separarlo en sus procesos unitarios y/o unidades funcionales.

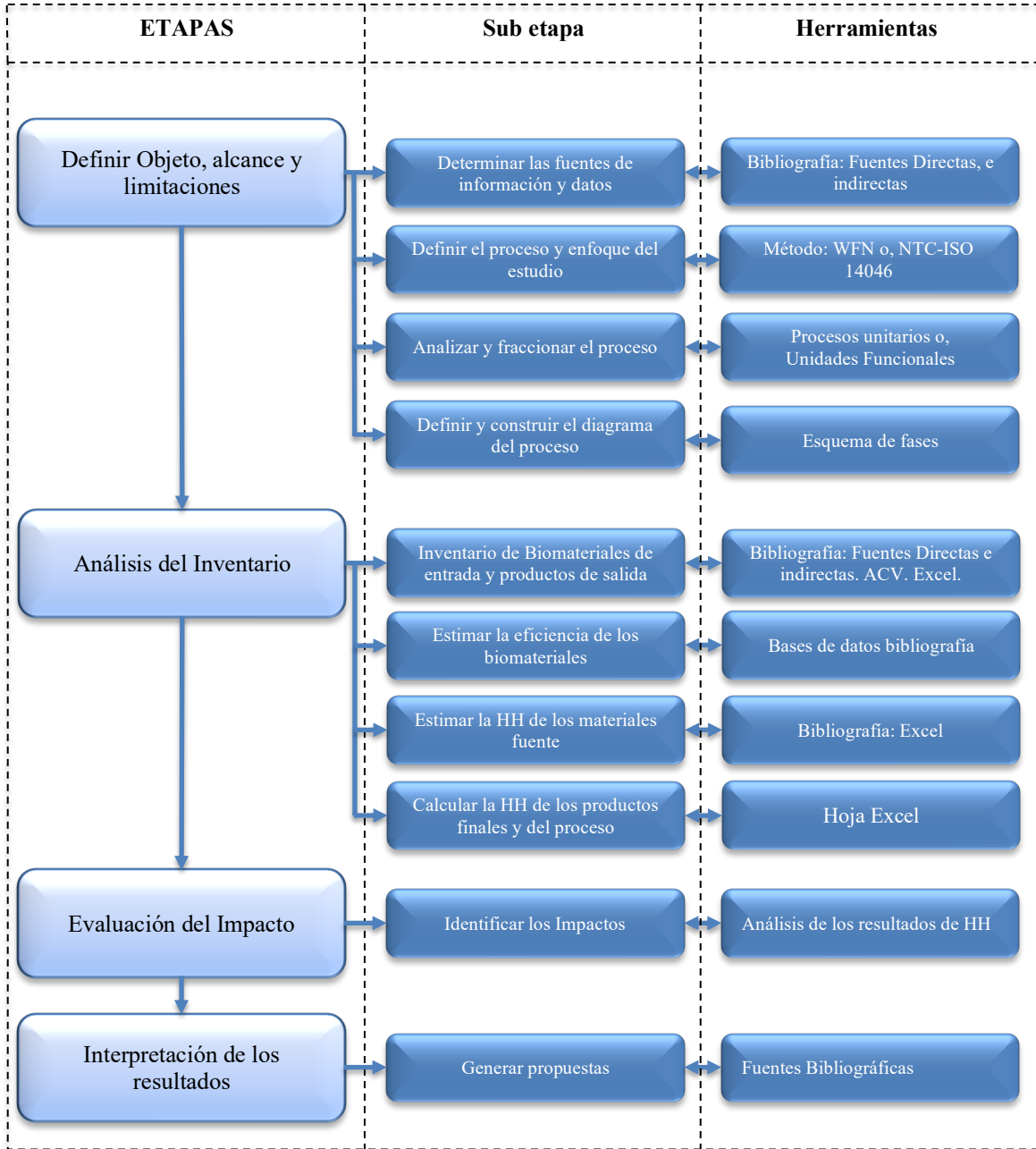
Construir un diagrama de proceso, enlazando los procesos unitarios y definiendo las entradas y salidas a cada unidad de proceso

Realizar el Análisis de Inventario de biomateriales de entrada y productos de salida. Para cada proceso unitario realiza un inventario de los diferentes biomateriales que entran y salen del proceso unitario y del proceso en general.

Definir las fuentes de información y datos. Si, las variables de entrada salida pueden ser medidas entonces pasar al paso de cálculo.

Si los datos no pueden ser obtenidos en forma directa, entonces se debe seguir al siguiente paso.

Flujograma 3.1.- Metodología de Evaluación de Huella Hídrica - Proceso



Fuente.- Elaboración propia con base en WFN (Hoekstra et al., 2011)

Estimar las eficiencias de los biomateriales, como porcentaje de material de entrada que se incorpora al material o producto de salida.

Estimar la HH de los materiales fuente.

Calcular la HH de los productos finales y del proceso.

Evaluación del Impacto. Analizar la consistencia de la HH, para identificar los impactos.

Interpretar los resultados. Generar propuestas.

3.7 Conclusión del Capítulo

Se ha desarrollado una explicación de la metodología general de cálculo de la huella hídrica, considerando los procesos de fabricación de bioplásticos.

La metodología propuesta tiene la finalidad de facilitar el análisis de un proceso en general, y particularmente aplicado a los bioplásticos permite reducir el nivel de requerimientos de conocimientos en profundidad haciendo más accesible a que un técnico de planta pueda utilizarla como herramienta.

Adquirir información acerca de un proceso en particular, permite al encargado del proceso, dueño de la planta o, interesados, la gestión eficiente del recurso hídrico, determinar los factores críticos particulares, tomar las decisiones más eficaces para direccionar las políticas ambientales de su organización en busca del logro de los objetivos organizacionales.

CAPÍTULO 4

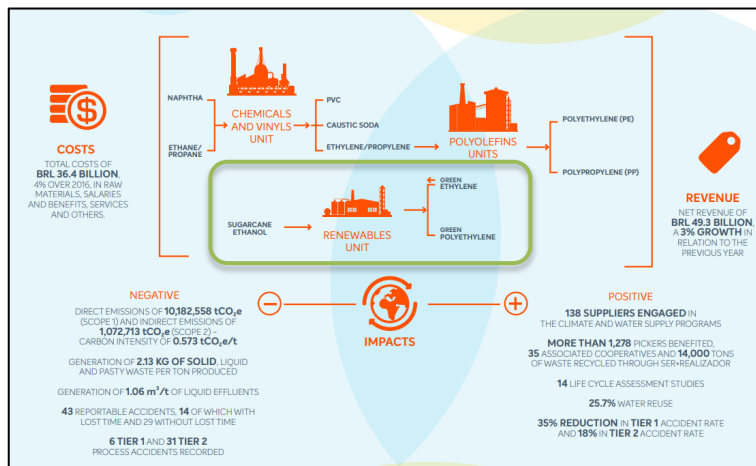
4 RESULTADOS

4.1 Caso de Estudio

La metodología para calcular la huella hídrica se aplica al proceso de producción de Biopolietileno, con base en la información de fuentes bibliográficas disponibles en la Internet. También se utiliza información pública acerca del proceso de producción de la compañía Braskem-Idesa de Brasil, con la finalidad de aplicar la metodología planteada.

Braskem en su informe público de 2017, reporta su capacidad anual de producción en tres millones cincuenta y cinco mil (3055000) toneladas de las cuales, doscientos mil (200000) toneladas/año corresponden a polietileno verde (Green's polyethylene) producido a partir de fuentes renovables, provenientes de la caña de azúcar como biomasa (Braskem, 2017). Las principales actividades de esa empresa se representan en la Figura 4.1, en donde se resalta la unidad de producción basada en fuentes renovables.

Figura 4.1.- Principales actividades de la Compañía Braskem



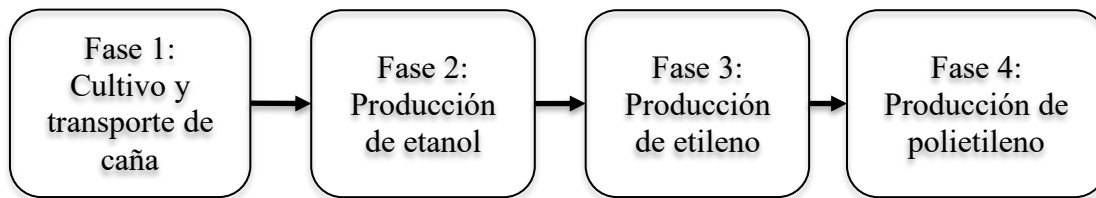
Fuente.- (Braskem, 2017)

©Universidad Ean: SNIES 2812 | Vigilada Mineducación | Personería Jurídica Res. n°. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

4.2 Descripción del proceso productivo

Para este trabajo, el proceso de producción de Biopolietileno se ha dividido en cuatro fases (Flujograma 4.1): 1) cultivo de caña, 2) producción de bioetanol, 3) producción de etileno y, 4) producción de polietileno o fase de polimerización.

Flujograma 4.1.- Producción de Biopolietileno



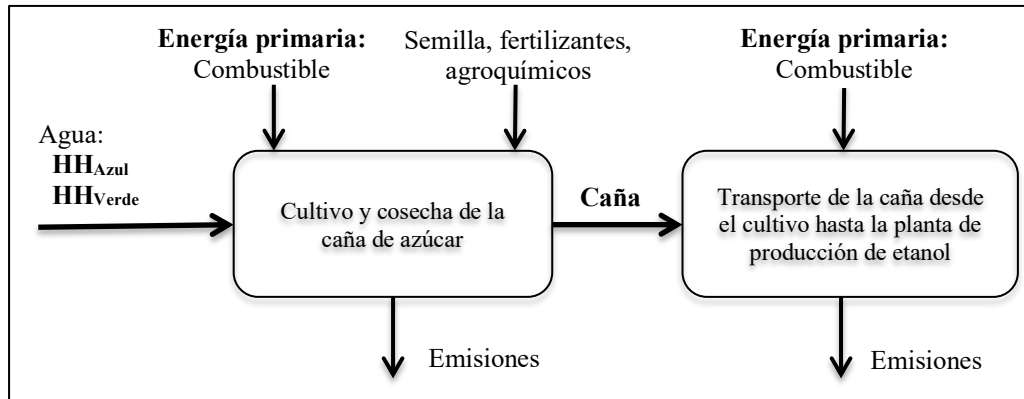
Fuente.- Elaboración propia

4.2.1 Fase 1: Cultivo y transporte de caña de azúcar

La Fase 1, es la fase agrícola (cultivo, cosecha, transporte) y se representa en forma simplificada en la Figura 4.2. El proceso inicia con el cultivo de caña de azúcar, en Brasil el ciclo es generalmente de seis años, en el cual hay cinco cortes, cuatro tratamientos de restos de cultivos y una reforma. La productividad anual, es influenciada por la variabilidad climática y por la región productora, se calcula que el promedio brasileño se ubica en 70 t/ha plantada (BNDES & CGEE, 2008).

El período de cosecha de la caña varía según el régimen de lluvias, para permitir las operaciones de corte y transporte y, alcanzar el mejor punto de maduración y acumulación de azúcares. El corte puede ser manual o, mecanizado. Luego del corte, la caña se transporta hacia la planta, lo antes posible, a fin de evitar pérdidas de sacarosa. El sistema de transporte se basa en camiones, los cuales pueden ser: camión simple, camión doble, tren de carretera o, roadtrailer, cuyas capacidades varían entre 15 y 60 toneladas.

Figura 4.2.- Fase 1 - Flujos de entrada y salida para el cultivo de caña de azúcar



Fuente.- (Liptow & Tillman, 2009)

4.2.2 Fase 2: Producción de Bioetanol a partir de caña de azúcar

Una vez en la planta (Ilustración 4.1), la caña se lava y pasa al sistema de preparación y extracción, compuesto por moliendas. La extracción del jugo se realiza bajo la presión de cilindros, armados en conjuntos de cuatro a siete sucesivos ternos de molienda. En el conjunto de cilindros de la molienda se separa el jugo, que contiene la sacarosa, de la fibra (bagazo). La fibra sigue hacia la planta de energía de la planta en donde es utilizada como combustible. El jugo que contiene los azúcares puede ser utilizado en la producción de azúcar o, bioetanol. La producción de bioetanol de caña de azúcar se puede basar en la fermentación directa del jugo de caña, o de las mezclas de jugo y melaza (BNDES & CGEE, 2008).

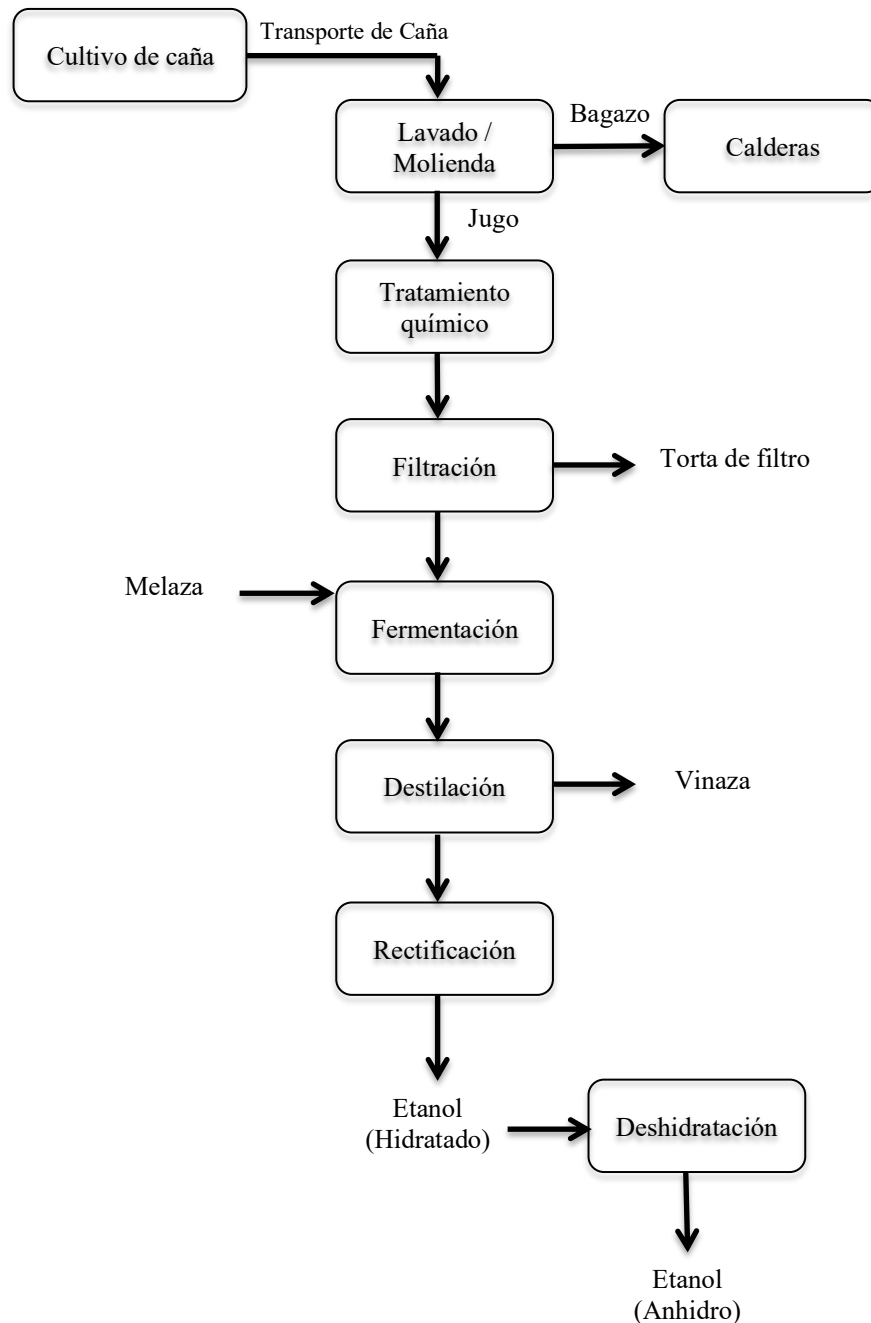
Ilustración 4.1.- Planta de procesamiento de caña de azúcar



Fuente.- (BNDES & CGEE, 2008)

En la Figura 4.3 se muestra el diagrama del proceso para la producción de bioetanol.

Figura 4.3.- Proceso de producción de bioetanol de caña de azúcar

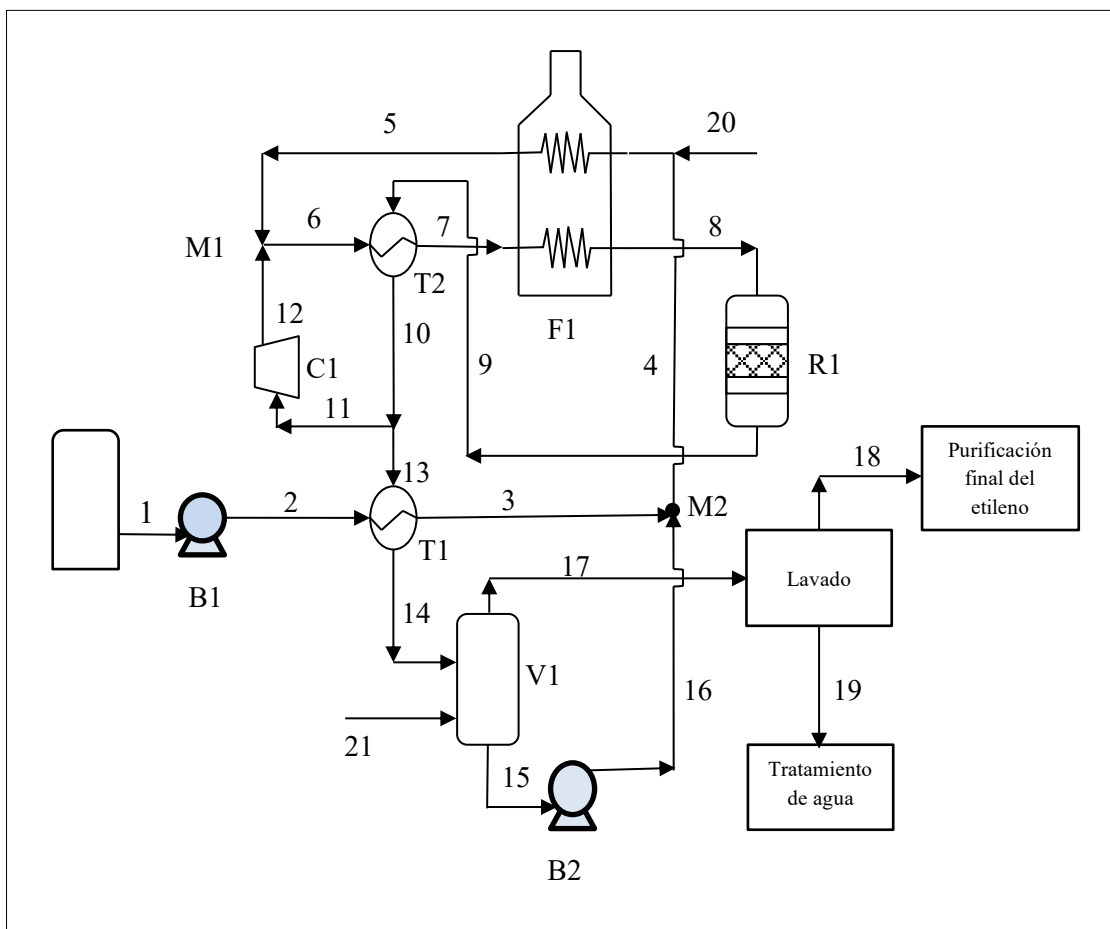


Fuente.- Adaptación con base en (BNDES & CGEE, 2008)

4.2.3 Fase 3: Producción de etileno a partir de bioetanol

En la Figura 4.4, se resume el proceso de deshidratación de etanol para producir etileno de acuerdo con una patente de Braskem (Barrocas & Lacerda, 2007) citado por (Liptow & Tillman, 2009).

Figura 4.4.- Proceso para la producción de etileno de bioetanol



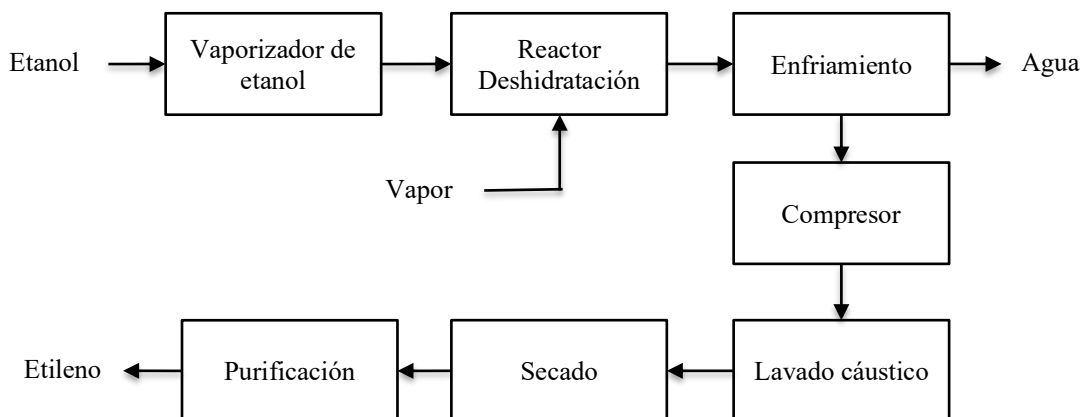
Fuente.- Diagrama con base en (Barrocas & Lacerda, 2007)

Para iniciar el proceso, el alcohol etílico hidratado (AEHC) almacenado o, el alcohol etílico anhidro (ABAC) se transfiere a través de la línea (1) y se bombea (B1) al sistema operativo a través de la línea (2) a una presión adecuada, pasando a través de intercambiadores de calor

(T1), donde se calienta por intercambio térmico con el flujo de calor (10) del efluente final (etileno + vapor de agua), pasa por la línea (3), donde se mezcla en (M2) con el flujo (16) de agua reciclada, dicha agua reciclada se origina en el separador (V1), donde se condensó, se separó y se bombeó con (B2); dicha mezcla de alcohol etílico y reciclaje pasa por la línea (4) y se calienta en la sección de convección de un horno (F1), siguiendo a través de la línea (5) hasta un mezclador (M1), donde se mezcla con la porción gaseosa comprimida del flujo de reciclaje del efluente (12), dicha mezcla pasa a través de la línea (6) a los intercambiadores de calor (T2), donde se calienta por el flujo total (9), el efluente del reactor (R1), y luego, dicha mezcla (6) se alimenta a través de la línea (7) a un horno (F1) para calentar hasta una temperatura que oscila entre 460°C y 500°C, y luego se envía a través de la línea (8) al reactor (R1) F que contiene en su parte interior un lecho fijo de catalizador, donde se obtiene la mezcla de etileno / vapor de agua y luego se dirige a las secciones de separación, lavado y purificación (Barrocas & Lacerda, 2007).

De una manera más simplificada se presenta el proceso de Braskem en el diagrama de flujo (Flujograma 4.2) (Fonseca Pallares, 2016).

Flujograma 4.2.- Proceso de producción de etileno

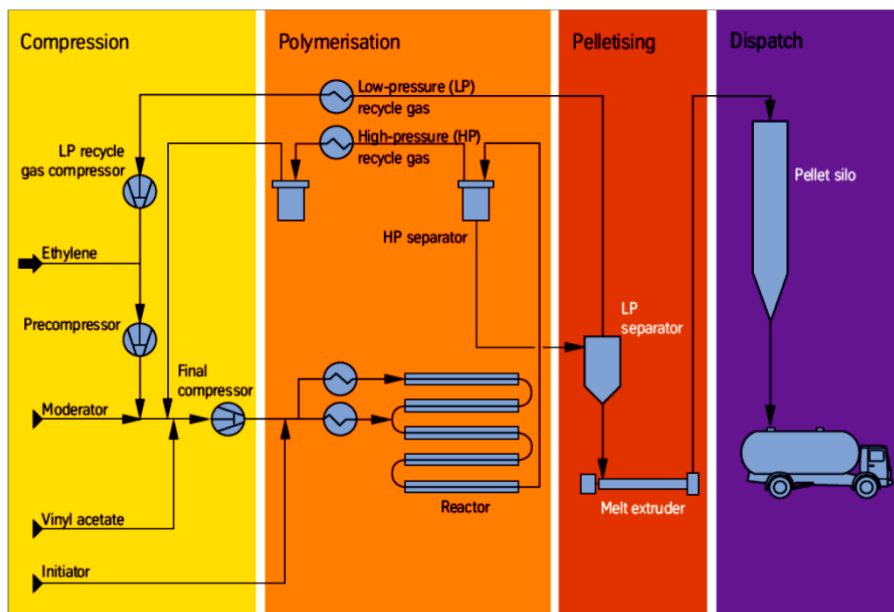


Fuente.- (Fonseca Pallares, 2016).

4.2.4 Fase 4: Producción de polietileno

Dependiendo del tipo de proceso empleado se obtiene uno de los dos tipos fundamentales de polietileno, el de baja densidad o, el de alta densidad. El polietileno de baja densidad (PEBD) se produce a altas presiones y temperaturas. Los reactores empleados pueden ser tanto de tipo autoclave como de tipo tubular. El iniciador normalmente es oxígeno o, un peróxido orgánico. En la Figura 4.5 se muestra el proceso empleado por la compañía Krupp-Uhde (Herrera, 2004).

Figura 4.5.- Proceso de fabricación de polietileno de baja densidad (Krupp-Uhde)



Fuente.- (Herrera, 2004).

El etileno fresco y el reciclado del circuito de baja presión se mezclan con el iniciador y el agente de transferencia (para controlar el peso molecular) en la aspiración del compresor primario, de este compresor sale aproximadamente a 300 atmósferas (atm.), uniéndose a su descarga con el etileno reciclado del sistema de alta presión antes de entrar en el hipercompresor, que proporciona una presión de 2000 a 2600 atm. En los reactores tubulares, el

etileno comprimido se calienta primero hasta unos 250°C para iniciar la reacción y seguidamente se refrigera con agua para eliminar el calor de reacción. Estos reactores producen un polímero con una distribución de pesos moleculares ancha. La conversión por paso es del orden del 35% y el tiempo de residencia de 60 a 300 segundos. En los reactores tipo autoclave, la conversión resultante se limita al 10-16% y el etileno se introduce frío para favorecer el balance térmico. El producto tiene una distribución de pesos moleculares más estrecha y mayor grado de ramificación (Herrera, 2004).

Después de la polimerización, la corriente de producto pasa por diferentes etapas de separación para recuperar el gas de etileno no reaccionado para reciclar y eliminar las ceras. El polímero molido limpio se mezcla luego con estabilizantes y aditivos y finalmente se convierte en gránulos (pellets). En este último paso, el polímero es forzado a través de una cabeza extrusora a partir de la forma y el tamaño requeridos de los pellets. Los pellets generalmente se cortan bajo el agua y se secan en un secador centrífugo (Ebewele, 2000) citado por (Liptow & Tillman, 2009).

4.3 Aplicación de la metodología de evaluación

La evaluación de la huella hídrica se basa en el análisis paso a paso, para identificar, inventariar y cuantificar los insumos de entrada y productos de salida en cada fase del ciclo de vida del proceso de producción de Biopolietileno mediante la información disponible en fuentes bibliográficas relacionadas con este estudio. También en función del balance energético calórico donde sea necesario, se compara los flujos de diferentes fuentes como son: biomasa, electricidad, combustibles, etc. por lo cual, es necesario que todas las medidas se encuentren en una unidad común, por este motivo se convierte los flujos físicos a flujos calóricos, utilizando como factores de conversión los poderes caloríficos inferiores de las fuentes combustibles y las equivalencias entre unidades, para las fuentes medidas directamente en unidades calóricas o de energía (OLADE, García, Yujato, & Arenas, 2017).

La representación de unidades se hace teniendo en cuenta el Sistema Internacional (CEM Centro Español de Metrología, 2019).

Los datos de partida representados en la Tabla 4.1, se determinan a partir de la producción promedio de caña (en toneladas) requerida para producir una (1) tonelada de polietileno de baja densidad (PEBD o LDPE), de aquí en adelante solamente se mencionará como PE. Se realiza la cuantificación de los insumos de entrada y productos de salida con base en la estandarización de las cantidades de masa desde el cultivo y hasta obtener el producto final. Según datos de la compañía Braskem, se utiliza 82.5 toneladas de caña de azúcar para la producción de 3 toneladas de polietileno (Glass, 2012). Una vez conocida la cantidad de caña necesaria para producir 1 t de PE, se analiza los insumos y productos en cada fase, se realiza la revisión de la bibliografía disponible para determinar las Huellas Hídricas (HH) verde, azul, y gris en el proceso representado en la Figura 4.6. Para este estudio, el proceso general se subdivide en las cuatro fases representadas en la Figura 4.7.

Tabla 4.1.- Datos de partida para la evaluación de Huella Hídrica de Bio-PE

HH de la Producción de polietileno base caña de azúcar											
Fase 1 Cultivo-transporte de caña de azúcar			Fase 2 Producción de etanol			Fase 3 Producción de etileno			Fase 4 Producción de polietileno (PE)		
82,50 t de caña		Notas (a,e)	7200 L de bioetanol	Notas (a,e)		3 t de Etileno		Nota (a)	3 t de PE		Nota (a)
27,5 kg caña/kg PE		Nota (b)	2,4 L de bioetanol	Nota (c)		1 kg Bioetileno		Nota (d)	1 kg Bio-PE		Nota (d)
HH1 _{azul}	HH1 _{verde}	HH1 _{gris}	HH2 _{azul}	HH2 _{verde}	HH2 _{gris}	HH3 _{azul}	HH3 _{verde}	HH3 _{gris}	HH4 _{azul}	HH4 _{verde}	HH4 _{gris}

$$HH1_{azul} + HH2_{azul} + HH3_{azul} + HH4_{azul}$$

HH_{total Azul}

$$HH1_{verde} + HH2_{verde} + HH3_{verde} + HH4_{verde}$$

HH_{total Verde}

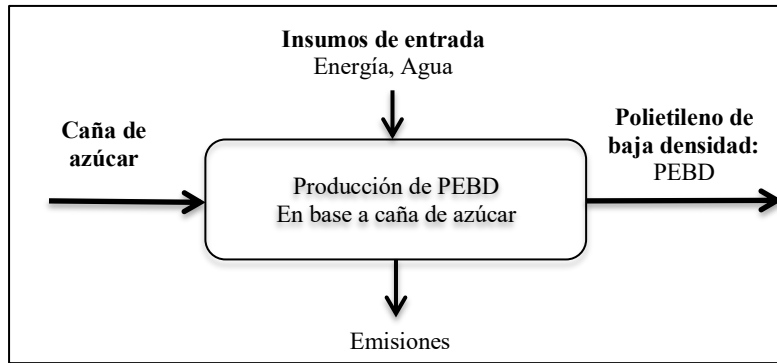
$$HH1_{gris} + HH2_{gris} + HH3_{gris} + HH4_{gris}$$

HH_{total Gris}

Notas:	
a	A partir de 82,5 t de caña de azúcar se produce, 7200 L de bioetanol, 3 t de etileno, y 3 t de Polietileno verde (Glass, 2012).
b	82,5 t de caña / 3 t PE = 27,5 t caña / t PE = 27,5 kg de caña / kg de PE
c	$(7200 \text{ L} / 3 \text{ t}) \times (1 \text{ t} / 1000 \text{ kg PE}) = 2,4 \text{ L} / \text{kg de PE}$
d	1 t PE = 1000 kg PE
e	t = tonelada, L=litro (SI) (CEM Centro Español de Metrología, 2019)

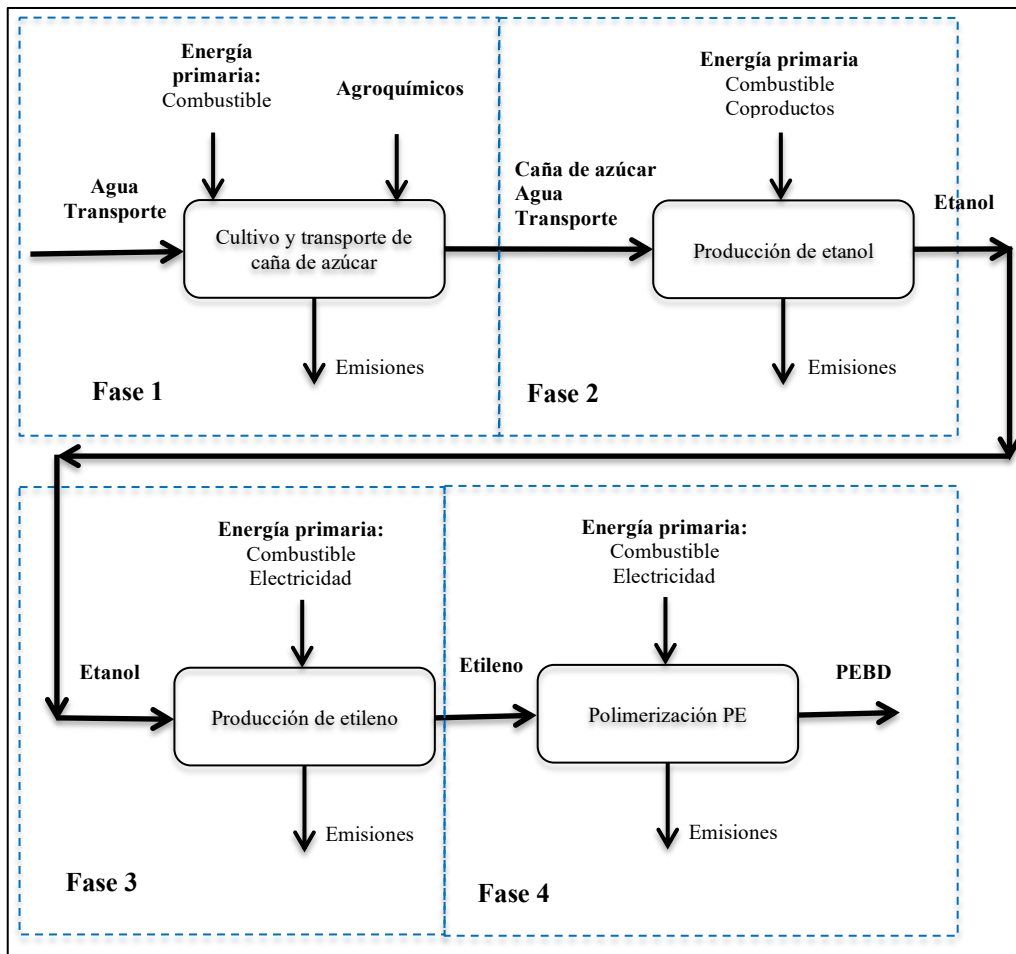
Fuente.- Elaboración propia con base en (Glass, 2012)

Figura 4.6.- Proceso simplificado de producción de PEBD



Fuente.- Adaptación con base en (Liptow & Tillman, 2009)

Figura 4.7.- Fases del proceso de producción de PE en base a caña de azúcar



Fuente.- Elaboración propia

A continuación se presenta los resultados de Huella Hídrica de cada fase.

Fase 1: Huella hídrica de la fase agrícola (cultivo) y transporte de la caña de azúcar.

En esta fase, para el cultivo de caña de azúcar en forma general se requiere de: semillas, agua, agroquímicos, fertilizantes y, para el trabajo agrícola se requiere el uso de maquinaria y personal. Cada uno de estos insumos para la “producción” de caña involucra consumos directos e indirectos de agua, como productos se obtiene la caña de azúcar además de otras emisiones. En esta fase también se incluye el transporte necesario desde el área de cultivo hasta la planta de producción de bioetanol en el cual se presenta un consumo de agua indirecta que se cuantifica con base en el gasto energético requerido como combustible diésel. Para cuantificar la huella hídrica, aplicando el enfoque acumulativo y el análisis del ciclo de vida, se parte de la investigación bibliográfica para obtener las cantidades de cada insumo y en función de esos valores aplicando fuentes bibliográficas, se establece la huella hídrica de cada producto y finalmente se cuantifica el total correspondiente a la fase en estudio. El cálculo completo se representa en el Anexo A. En la Tabla 4.2 se presenta en forma resumida los resultados obtenidos para esta fase.

Tabla 4.2.- Resultados de la Fase 1

Fase 1: Cultivo y transporte	Descripción	Unidad	Cantidad	Huella Hídrica		
				HH Azul	HH Verde	HH Gris
				m ³ de agua/t de caña		
Insumos de entrada:						
Masa	Semilla, Fertilizantes, Agroquímicos	kg/t de caña	43,74	0,885	3,21	27,98
Energía	Granja, transporte	GJ/ t de caña	150,0	0,218	0,068	
Agua	Cultivo	m ³ /t de caña	104,64	3,93	100,71	
				5,04	103,98	27,98

Fuente.- Elaboración propia.

Fase 2: Producción de bioetanol en base a caña de azúcar.

La producción de bioetanol se inicia con la recepción de la caña de azúcar como insumo, y además el consumo directo de agua para el proceso de lavado. Luego del proceso de molienda se obtiene el jugo de caña que va a ser procesado en etanol. De este proceso se obtiene también como coproductos, bagazo de caña y torta de filtro los cuales pasan a ser utilizados en plantas de cogeneración para la producción de energía y calor. Del procesamiento de una tonelada de caña de azúcar se obtiene aproximadamente 250 kg de bagaso (con el 50% de humedad) (BNDES & CGEE, 2008). En otros estudios la cantidad de bagaso resulta ser de 280 kg/t caña (Macedo, Leal, & Azevedo-Ramos-da-Silva, 2004) y (Liptow & Tillman, 2012). Debido a que no se cuenta con los valores de la compañía Braskem, en este estudio se utilizará 280 kg/t caña como valor de referencia.

En la Tabla 4.3 se presenta los resultados generales de esta fase. Los datos y sus fuentes de soporte se presentan en el Anexo B.

Tabla 4.3.- Resultados de la Fase 2

Fase 2: Producción de bioetanol	Descripción	Unidad	Cantidad	Huella Hídrica		
				HH Azul	HH Verde	HH Gris
				m ³ / kg PE		
Insumos de entrada						
Masa	Caña de azúcar	t caña	1,00			
Energía	Electricidad utilizada en el proceso	MJ/t caña	32,00			
Agua	Agua azul utilizada en el proceso	L agua/L etanol	19,50	0,0468	0,00	-
Productos salida del proceso						
Masa	Etanol	L/t caña	87,27			
	Bagazo de caña	kg/t caña	280,00			
Producto de la cogeneración						
Energía cogenerada	Electricidad cogenerada	MJ/t caña	270,00	0,0240	0,3720	-
Total Huella Hídrica Fase 2 (Nota a).				0,0228	-0,372	
Nota:						
a	Se asume que el coproducto se utiliza para generar energía, lo cual se considera como crédito en la cuantificación de la huella hídrica de esta fase.					

Fuente.- Elaboración propia.

Fase 3: Producción de etileno a base de bioetanol

Como ya se mencionó en la descripción del proceso, parte de los datos aplican a la patente original de Braskem que especifica el proceso de producción de etileno de (Barrocas & Lacerda, 2007), teniendo en cuenta que esa descripción no contiene el paso final de purificación del etileno a grado de polimerización. Por lo cual, se tiene en cuenta el complemento del proceso de acuerdo con (Liptow & Tillman, 2009). En esta fase de producción de bioetanol la energía consumida es electricidad y combustible el cual es quemado directamente en el proceso. Se asume que la electricidad es suministrada por la red eléctrica de Brasil, por lo cual su composición por fuente define la Huella Hídrica para este componente. Por otro lado, se asume que el combustible requerido para el proceso en su totalidad es diésel por lo cual su HH se calcula en correspondencia con la huella hídrica del petróleo por ser el diésel uno de sus derivados en el proceso de refinación. El cálculo de estos componentes se presenta en el Anexo C. En la Tabla 4.4 se presenta el resumen de la Huella hídrica correspondiente a esta fase.

Tabla 4.4.- Resultado de la Fase 3

Fase 3: Producción de etileno	Descripción	Unidad	Cantidad	Huella Hídrica		
				HH Azul	HH Verde	HH Gris
				m ³ de agua/kg de etileno		
Insumos de entrada:						
Masa	Bioetanol suministro de entrada	L etanol /kg etileno	2,40			
Energía	Combustible Interno, externo y electricidad	GJ/kg etileno	5,41			
Agua	Agua directa e indirecta utilizada			0,787	0,006	-
Productos salida del proceso:						
Masa	Bioetileno	kg	1,00			

Fuente.- Elaboración propia.

Fase 4: Producción de Polietileno (polimerización)

En esta fase como se describió en el proceso de polimerización, se utiliza energía como electricidad, la cual se asume que es proporcionada por el sistema eléctrico nacional de Brasil

y, el combustible utilizado en el proceso es diésel (Liptow & Tillman, 2009). La Tabla 4.5 muestra en forma general los resultados de esta fase. El detalle se presenta en el Anexo D.

Tabla 4.5.- Resultado de la Fase 4

Fase 4: Polimerización	Descripción	Unidad	Cantidad	Huella Hídrica		
				HH Azul	HH Verde	HH Gris
m ³ de agua/kg de PE						
Insumos de entrada:						
Masa	Etileno suministro de entrada	kg etileno/ kg PE	1,00			
Energía	Combustible Interno, externo y electricidad	GJ/kg PE	3,63E-03			
Agua	Agua directa e indirecta utilizada			0,0487	0,0167	-
Productos salida del proceso:						
Masa	Bio-Polietileno	kg	1,00			

Fuente.- Elaboración propia

4.4 Resultados de la Evaluación e Impacto

Las fases del proceso analizadas en este trabajo, para la producción de biopolietileno de baja densidad, requieren del consumo de agua tanto directa como indirecta. La evaluación de impacto alternativa descrita en 3.6.1, consiste en comparar las Huella Hídricas de las fases del proceso para determinar la fase con el mayor consumo de agua y por lo tanto de mayor impacto en proporción a las demás. El resultado de esta evaluación presentado en la Tabla 4.6, pretende orientar la gestión del recurso en un escenario de sostenibilidad de la organización. En el Anexo E se presenta el resumen general con mayor detalle.

En la Tabla 4.6 se observa que la Huella Hídrica total de producir 1 kg de Bio-PE en base a caña de azúcar es de 4,27 m³ de agua. La Fase 1 con 3,76 m³ / Kg de PE, representa el 88,1 % del total de agua utilizada en el proceso, siendo ésta la fase con mayor HH. En la fase 2 se observa un valor total negativo de huella hídrica verde, esto se debe a la reutilización de coproductos obtenidos en la fase 2, principalmente el uso del bagazo de la cañade azúcar para la generación de energía y su utilización en el proceso. Esta se trata como créditos por lo cual se resta del consumo de agua en esta fase.

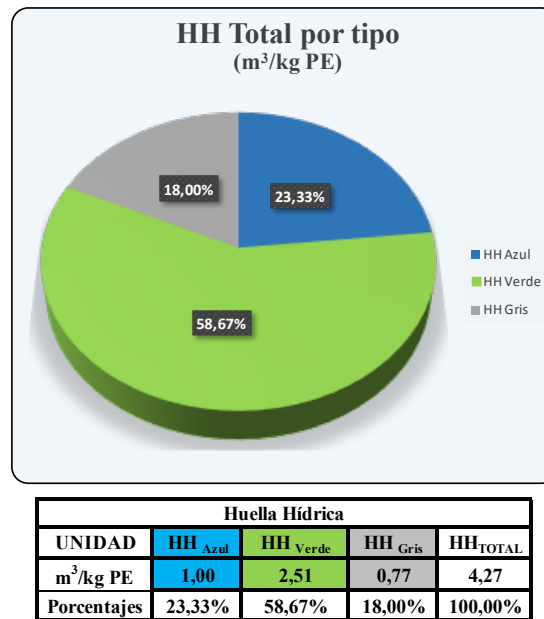
Tabla 4.6.- Resultados de Evaluación de HH del Proceso de producción de Bio-PE

Fases	Descripción	Huella Hídrica			Total / Fase	
		HH Azul	HH Verde	HH Gris	m ³ de agua/kg PE	Porcentaje
		m ³ de agua/kg PE				
1	Cultivo y transporte	0,1385	2,8577	0,7695	3,766	88,09%
2	Producción de bioetanol	0,0228	-0,3720	0,000	-0,349	-8,17%
3	Producción de etileno	0,7871	0,0056	0,000	0,793	18,55%
4	Polimerización	0,0487	0,0167	0,000	0,065	1,53%
Proceso	HH Total por tipo	1,00	2,51	0,77	4,27	100,00%

Fuente.- Elaboración propia

En la Figura 4.8 se presenta las huellas hídricas como porcentajes de la total. La HHverde representa el 58,67% , el agua verde proviene principalmente de las lluvias. La HH azul, 23,33 %, y un 18,0 % representa a la HH Agua Gris.

Figura 4.8.- Porcentajes por tipo de HH



Fuente.- Elaboración propia

En la primera fase (HH Cultivo y transporte de caña) se observa que el mayor componente de la HH proviene del agua verde, esto se debe a que las lluvias constituyen el principal suministro de agua para el cultivo.

En la fase 2 (HH Producción de etanol, menos HH coproductos) se observa que los coproductos resultantes de la molienda de la caña al ser utilizados en otros procesos y en la generación de energía, hacen un aporte positivo a la reducción de HH, por lo cual la reutilización de los coproductos es fundamental para optimizar el uso del recurso hídrico.

Las fases 3 y 4 muestran valores de HH bajos con relación a las dos primeras fases, aproximadamente 0,85 m³/kg de PE, pero si se calcula para la producción por tonelada de PE, el consumo anual llega hasta los 830 m³/t de PE en estas dos fases.

Finalmente, en la Tabla 4.7 se presenta de manera general la energía utilizada en cada fase y las Huellas hídricas obtenidas. Cabe resaltar que en esta tabla se presenta por separado las Huellas Hídricas de la fase 2 y la de los coproductos cuya reutilización se trata como créditos en la cuantificación de la huella hídrica total.

Tabla 4.7.- Resultado general Energía - Huella Hídrica proceso

Fases	Descripción	MASA	Unidades	ENERGIA	Unidades	Energía Consumida y Producida (GJ/kg PE)	Notas	Huella Hídrica			Total		
								HH Azul	HH Verde	HH Gris	m ³ de agua/kg PE	Porcentaje	
								m ³ de agua/kg PE					
1	Cultivo y transporte	27,5	t caña/t PE (Nota a)	0,17	GJ/t caña	4,675E-03	Fase 1	0,1385	2,8577	0,7695	3,766	80,63%	
2	Producción de bioetanol	1893,6	kg etanol/ t PE (Nota b)	32,0	MJ/t caña	8,80E-04	Fase 2	0,0468	0,0000	0,000	0,047	1,00%	
3	Producción de etileno	1	t etileno / t PE	5,41	GJ/ kg etileno	5,41	c	Fase 3	0,7871	0,0056	0,000	0,793	16,97%
4	Polimerización	1	t PE	3,63E-03	GJ/kg PE	3,63E-03	Fase 4	0,0487	0,0167	0,000	0,065	1,40%	
Energía utilizada en el proceso						5,42E+00	HH TOTAL	1,0211	2,8800	0,7695	4,671	100,00%	
	Coproducto de la fase 2	280	kg/t caña	270	MJ/t caña	-7,425E-03	d	HH coproductos	-0,0240	-0,3720	0,000	-0,396	-8,48%
Energía total						5,412	HH Final	1,00	2,51	0,77	4,27		

Notas	
a	En este trabajo se utiliza para la conversión 27,5 t caña / t PE
b	Densidad del etanol hidratado= 0,789 kg / L etanol (Tsiropoulos et al., 2014).
c	En el proceso de producción, 1 kg Etileno produce 1 kg de PE
d	La energía generada con base en coproductos del proceso en la fase 2, se considera como créditos en la cuantificación total de energía y huella hídrica.

En la Tabla 4.7 se observa que la energía utilizada es de aproximadamente 5,412 GJ/kg PE, siendo la fase 3 la de mayor demanda energética. También se observa la cuantificación general de la huella hídrica de todas las fases analizadas en este trabajo con un total de 4,27 m³/kg PE, siendo la fase 1 la de mayor demanda de agua.

4.5 Análisis Final.

Para el análisis del impacto del uso de agua en la producción de biopolietileno, se fracciona al proceso productivo bajo análisis en cuatro etapas con la finalidad de determinar la fase, u operaciones que demandan mayor cantidad de agua y su tipo de fuente, con base a los criterios de huella hídrica identificando las huellas de agua azul, de agua verde y de agua gris, de acuerdo con el tipo de fuente y/o recurso que utiliza el proceso. El objetivo de este trabajo es contribuir a la evaluación de huella hídrica y facilitar la orientación de las estrategias de gerenciamiento de este recurso.

En el balance general de este estudio se ha establecido la huella hídrica del proceso inicialmente sin los créditos por el uso de coproductos, en un volumen de agua de 4,67 m³/kg PE, compuesto por una huella hídrica azul 1,02 m³/kg PE, la huella hídrica verde de 2,88 m³/kg PE, y una huella hídrica gris de 0,77 m³/kg PE.

También se ha establecido que la reutilización de coproductos, generan una huella hídrica azul de 0,024 m³/kg PE, una huella hídrica verde de 0,372 m³/kg PE.

La huella hídrica de los coproductos es tratada como créditos en la cuantificación total del proceso y disminuyen la huella hídrica final. La huella hídrica final del proceso se calcula en 4,27 m³/kg PE compuesta por unas huellas hídricas azul de 1,0 m³/kg PE, verde de 2,51 m³/kg PE y gris de 0,77 m³/kg PE.

Se ha determinado que la fase 1 es la de mayor impacto con una huella hídrica de 3,77 m³/kg PE (80,6 % del total). La huella hídrica verde de esta fase 2,86 m³/kg PE, y la huella gris de 0,77 m³/kg PE son las de mayor impacto en esta fase y en el proceso.

Mientras tanto la fase 3 con una huella hídrica total de 0,79 m³/kg PE (16,97% del total), es la segunda de mayor impacto. Contiene la mayor huella hídrica azul del proceso con 0,78 m³/kg PE, siendo la de mayor impacto según el tipo de agua utilizada ya que procede de fuentes superficiales.

Dentro de la huella hídrica total de 4,27 m³/kg PE, se observa que el mayor porcentaje 58,67% (2,51 m³/kg PE) es agua verde proveniente de la lluvia, la cual en la fase de cultivo se incorpora a la caña de azúcar. También se determina que el proceso utiliza 1 m³ /kg PE (23,33%) de agua azul, que es agua dulce que proviene de fuentes subterráneas o, superficiales. También se obtiene un volumen de agua gris de 0,77 m³ / kg PE (18,0% del agua total) la cual, representa el volumen de agua dulce requerido para asimilar la carga contaminante del proceso.

Finalmente se observa que la fase 1, de cultivo y transporte de caña utiliza el mayor volumen de agua 3,77 m³/kg PE entre todas las Huella hídricas del proceso.

4.6 Conclusiones

- En este trabajo se analizó de forma general diferentes procesos asociados a la producción de bioplásticos, dentro del mercado global se encontró que el 78% de los bioplásticos producidos en el mundo está representado por un conjunto de ellos entre los cuales se encuentran el polietileno (PE), el polietileno tereftalato (PET), el ácido poliláctico (PLA), el poliuretano (PUR), el polipropileno (PP), y el Policloruro de Vinilo (PVC). Para los bioplásticos indicados, se ha descrito en forma general sus procesos de producción en función de sus unidades de proceso y servicios requeridos, determinando para cada uno de ellos un esquema de flujo de producción independiente.
- Con base en la información disponible, se estableció el proceso de producción de Polietileno de baja densidad como objeto de este estudio, se determinó su flujo de producción, y para facilitar la aplicación de la metodología, se dividió el proceso en cuatro etapas, las cuales se someten a análisis para obtener la huella hídrica atribuible a cada fase.

- Se determinó que los factores principales a tener en cuenta para realizar un análisis de HH parten con la determinación clara del objetivo y alcance del estudio, y de acuerdo con estos, se define el método más adecuado para llevar a cabo el estudio. En este caso se utiliza la metodología de Water Footprint, pero sin dejar de lado las recomendaciones y enfoques generales de la NTC-ISO 14046 en lo que tiene que ver con la aplicación del análisis del ciclo de vida del proceso. De igual forma es importante contar con las mejores fuentes de datos del proceso, en este caso al no contar con datos directos, ha sido necesario la aplicación de fuentes bibliográficas para realizar los cálculos. Otro de los factores importantes es la disponibilidad de diagramas generales del proceso lo cual facilita su segmentación y posterior análisis. En este caso con la fragmentación del proceso se aplica el análisis del inventario de productos de entrada y salida a las fases definidas para este trabajo y de acuerdo con ello se determina la HH.
- Teniendo en cuenta los principales factores se propuso una metodología general de aplicación de la teoría de cálculo de la huella hídrica la cual se representó mediante un diagrama de flujo (3.6.3) el cual incluye en forma general los pasos a seguir para determinar la HH de éste y cualquier otro proceso. Se llega finalmente a proponer también el análisis de impacto con base a los volúmenes de agua utilizados en las diferentes etapas del proceso analizado.
- Los enfoques y metodologías de WFN y NTC-ISO 14046 son aplicables a los procesos y productos. Entre los factores que influyen en la selección entre una u otra metodología se puede indicar: el objetivo y el alcance de cada estudio, la disponibilidad de información directa y confiable. En este trabajo se aplicó el análisis de huella hídrica para el bio-polietileno, con base en el estándar de WFN para lo cual se evalúa las HH de los insumos de entrada, de los productos de salida y las del proceso. Se ha utilizado el análisis paso a paso a través del proceso de producción. Por el alcance definido, en este trabajo no se llega a establecer los impactos en el recurso del agua, sino que se centra en definir la fase de mayor impacto al recurso dentro del proceso. En este trabajo la huella hídrica asociada al proceso de producción de bioplásticos se define como el volumen de agua dulce empleada en forma directa o indirecta a lo largo del ciclo productivo del bioplástico. Se distinguen tres componentes: agua azul, agua verde y agua gris. Con base en la metodología propuesta, para este análisis se aplicó las ecuaciones revisadas en el

capítulo 3, entre las cuales la Ecuación (6) permite el cálculo de la HH de un producto como volumen de agua utilizada respecto a la cantidad de producto producido:

$$WF\ prod [p] = [WF\ proc [p] + \sum_{i=1}^y \left(\frac{WF\ prod [i]}{fp[p, i]} \right)] \times fv[p]$$

Para este caso, las estimaciones se realizaron para los insumos y productos de las fases del proceso lo cual permite identificar y cuantificar las huellas hídricas parciales y posteriormente obtener la huella hídrica total del proceso. Para insumos como los combustibles, se utiliza también la misma metodología con base en la cuantificación de la huella hídrica del componente del cual se origina, en este caso el diésel se cuantifica como un derivado del petróleo crudo procesado en refinerías. De igual manera la electricidad utilizada se cuantifica considerando que la fuente principal del suministro es la red nacional cuya composición proviene de un conjunto de varias fuentes de energía, por lo cual se considera los porcentajes por fuente para establecer las fracciones de producto.

De esta manera se ha logrado realizar los cálculos principales y mediante el uso de la bibliografía establecer y desarrollar la metodología al caso planteado. La cuantificación final correspondió a la suma de las HH parciales obtenidas en casa fase y correspondiente con cada uno de los tipos para encontrar el total y los tipos de huella hídrica azul, verde y gris.

- En el proceso analizado se calcula que la huella hídrica total está representada por un volumen de agua de 4,27 m³/kg PE de los cuales, la HH azul es de 1 m³/kg PE y representa el 23,33 %, la HH verde de 2,51 m³/kg PE representa el 58,67%, y la HH gris de 0,77 m³/kg PE que representa el 18,0 %. Se encontró que el mayor impacto al recurso hídrico con un volumen de 3,77 m³/kg PE (80,63%) se origina en la fase 1, compuesta por las actividades de cultivo y transporte de la caña de azúcar. De este volumen, 2,86 m³/kg PE (75,9% de la fase) representa al agua verde agua que proviene de las lluvias, el 0,14 m³/kg PE (3,7% de la fase) representa al agua azul proveniente de fuentes superficiales y subterráneas y, el 0,77 m³/kg PE (20,4 % del volumen de la fase) de agua gris, indicando que la mayor carga contaminante se produce en la fase 1.

5 BIBLIOGRAFÍA

- Barrocas, H. V., & Lacerda, A. I. (2007). Process for production of ethylene from ethyl alcohol. Retrieved from <https://patentimages.storage.googleapis.com/58/5f/f6/03ce62245e05ae/WO2007134415A2.pdf>
- BNDES, & CGEE. (2008). *Bioetanol de Caña de azúcar - Energía para el Desarrollo Sostenible*. Retrieved from <http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/Biocomustibles/CEPAL/bioetanol-caña-de-azucar.pdf>
- Bosman, R. (2016). *Water Footprint of widely used Construction Materials - Steel, Cement and Glass*. Retrieved from <https://essay.utwente.nl/69751/1/MA-thesis-Bosman,R..pdf>
- Boulay, A.-M., Hoekstra, A. Y., & Vionnet, S. (2013). Complementarities of Water-Focused Life Cycle Assessment and Water Footprint Assessment. *Environmental Science and Technology*, 11926–11927.
- Braskem. (2017). *Braskem- Annual report 2017*. <https://doi.org/10.2760/138436>
- CADIS Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable, Embajada de Suiza en Colombia, COSUDE Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo, A., M., J., C., M., P., ... J., V. (2016). *Huella de Agua (ISO 14046) en América Latina Análisis y recomendaciones para una coherencia regional*. Retrieved from <https://www.shareweb.ch/site/Suiz-Agua-Colombia/Documents/Huella-Agua-ISO-14046-America-Latina.pdf>
- Castro-Aguirre, E., Iñiguez-Franco, F., Samsudin, H., Fang, X., Auras, R., Castro, E., ... Auras, R. (2016). Poly(lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107(April), 333–366. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.03.010>
- Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J., & Diaz, D. (2015). Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global. *Ingeniería Solidaria*, 9(17). <https://doi.org/10.16925/in.v9i17.811>
- CEM Centro Español de Metrología. (2019). BIPM - El sistema internacional de unidades (SI) - 2019, 108(3), 113. Retrieved from https://www.cem.es/sites/default/files/30362_elsistemainternacionaldeunidades_web.pdf
- Coytello, H., & Gómez, Y. (2017). *Matriz de aspectos e impactos ambientales en las unidades agro productivas de la zona Usaba*.
- CTA; GSI-LAC; COSUDE; IDEAM. (2014). *Evaluación Multisectorial de la Huella Hídrica en Colombia*.
- Ebewele, R. (2000). *Polymer Additives and Reinforcements. Polymer Science and*

Technology. <https://doi.org/10.1201/9781420057805-10>

- EIA, U. S. E. I. A. (2019a). Energy Conversion Calculators - Energy Explained, Your Guide To Understanding Energy - Energy Information Administration. Retrieved March 8, 2019, from https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=about_energy_conversion_calculator#dieselcalc
- EIA, U. S. E. I. A. (2019b). Table B1. Metric Conversion Factors. Retrieved from https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/sec13_17.pdf
- EIA, U. S. E. I. A. (2020). Energy conversion calculators - Energy content of diesel. Retrieved May 14, 2020, from <https://www.eia.gov/energyexplained/units-and-calculators/energy-conversion-calculators.php>
- Endah Putri, R. (2018). *The water and land footprint of bioplastics*. University of Twente. Retrieved from <https://www.utwente.nl/en/et/wem/education/mst-thesis/2018/putri.pdf>
- EPE. (2018). *BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - BRAZILIAN ENERGY BALANCE - 2018*. Retrieved from http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf
- European Bioplastics - EUBP. (2016). *European Bioplastics Fact Sheet*. Retrieved from www.european-bioplastics.org/multimedia
- European Bioplastics - EUBP. (2018). *Bioplastics facts and figures - 2018*. Retrieved from https://docs.european-bioplastics.org/publications/EUBP_Facts_and_figures.pdf
- European Bioplastics, & Nova-Institute. (2018). *Bioplastics market data 2018. Global production capacities of bioplastics 2018-2023*. Retrieved from www.european-bioplastics.org
- Ferrer, M. (2014). Huella Hídrica: La nueva norma internacional ISO 14046: 2014 y su implementación. In *Congreso Nacional del Medio Ambiente CONAMA 2014* (pp. 1–10). Retrieved from www.conama2014.org
- Fonseca Pallares, J. M. (2016). *Etileno biobasado a partir de caña de azúcar como alternativa para la producción de etileno en México*. Instituto Politécnico Nacional. Retrieved from [https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/23087/Etileno biobasado a partir de caña de azúcar como alternativa para la producción de Etileno en México..pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/23087/Etileno%20biobasado%20a%20partir%20de%20ca%C3%B1a%20de%20az%C3%BAcar%20como%20alternativa%20para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20Etileno%20en%20M%C3%A9xico.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- García Fernández, J. M., & Cantero Corrales, L. (2007). Indicadores globales para la evaluación del uso sostenible del recurso agua: Caso cubano. *Voluntad Hidráulica*, 99, 1–16.
- Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y., & Bosman, R. (2017). The blue and grey water footprint of construction materials: Steel, cement and glass. *Water*

©Universidad Ean: SNIES 2812 | Vigilada Mineducación | Personería Jurídica Res. n°. 2898 del Minjusticia - 16/05/69

- Resources and Industry*, 19, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2017.11.002>
- Gerbens-Leenes, P. W., Hoekstra, A. Y., & Van Der Meer, T. H. (2008). *Water footprint of bio-energy and other primary energy carriers - Value of Water - Research Report No. 29. Water Research*. Retrieved from http://www.danishwaterforum.dk/activities/Water_and_Energy/Report29-WaterFootprintBioenergy.pdf
- Gestores de Residuos. (2015). La clasificación de los plásticos - Gestores de Residuos. Retrieved February 7, 2019, from <https://gestoresderesiduos.org/noticias/la-clasificacion-de-los-plasticos>
- Glass, T. (2012). Environmental Benefits of Sugar Cane Based Polyethylene & Polypropylene Brakem Leader in Thermoplastic Resins Production in the Americas. *Brakem*, 21, 21. Retrieved from <http://www.stendenpre.com/uploads/algemeen/Presentaties/Glass Terry.pdf>
- Gómez, F., & Pérez, A. (2016). *Evaluación del Area de Producción Aplicando Metodología COSO I e Identificación de Indicadores que Incrementan la Rentabilidad en la Empresa “El Aguila” S.R.L. en la ciudad de Chiclayo en el año 2014*. Retrieved from http://tesis.usat.edu.pe/bitstream/usat/6411/1/TL_GomezCamachoFiorella_Per ezAguilarAnghela.pdf
- Gonzales, E. J., Miller, L. M., & Cohn, A. (2010). A Logistics Model for Production and Distribution of Sugarcane Ethanol in Brazil. In *12th World Conference for Transportation Research* (pp. 1–20). Lisbon: WCTR. Retrieved from <http://www.wctrs-society.com/wp-content/uploads/abstracts/lisbon/selected/02937.pdf>
- Google. (2019). Foursquare - Aplicaciones de Android en Google Play. Retrieved February 16, 2019, from <https://play.google.com/store/search?q=water footprint calculator&c=apps>
- Green Key. (n.d.). Green Key Award. Retrieved from http://www.greenkeymexico.org/calculadora_agua.php
- Hermida, E. (2011). Polímeros - Capítulo 9. In Ministerio de Educación Argentina (Ed.), *Materiales y materias primas* (Vol. 9).
- Herrera, F. A. (2004). Ciencia de los Polímeros-Presentación. *Ciencia De Los Polímeros*. Universidad Anáhuac - Mexico. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.arbres.2017.08.011>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water Footprint Assessment Manual - Setting the Global Standard. *Earthscan*, 1–228. <https://doi.org/978-1-84971-279-8>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., & Mekonnen, M. M. (2019). Water footprint Network - Interactive tools. Retrieved February 13, 2019, from <https://waterfootprint.org/en/resources/interactive-tools/#CP>

- ISO - ICONTEC. (2007). *Norma Técnica Colombiana - NTC-ISO 14040 - 2007 - Gestión Ambiental - Análisis de Ciclo de Vida - Principios y Marco de Referencia*. Icontec. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.4288250>
- ISO - ICONTEC. (2015). *Norma Técnica Colombiana - NTC-ISO 14001 - 2015 - Sistemas de Gestión Ambiental - Requisitos con Orientación para su uso*. 2015-09-23. Retrieved from https://informacion.unad.edu.co/images/control_interno/NTC_ISO_14001_2015.pdf
- ISO - ICONTEC. (2017). *Norma Técnica Colombiana - NTC-ISO 14046 - 2017 - Gestión Ambiental - Huella de Agua - Principios, Requisitos y Directrices*. Bogotá: ICONTEC.
- Knook, L., & Hogeboom, I. H. J. (2016). The water footprint related to reservoir operation on a global scale.
- Labeaga, A. (2018). *Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones*. Retrieved from http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Alabeaga/Labeaga_Viteri_Aitziber_TFM.pdf
- Liptow, C., & Tillman, A.-M. (2009). *Comparative life cycle assessment of polyethylene based on sugarcane and crude oil. Part I*. Retrieved from http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/DataReferences/ESA_2009--14.pdf
- Liptow, C., & Tillman, A. M. (2012). A Comparative Life Cycle Assessment Study of Polyethylene Based on Sugarcane and Crude Oil. *Journal of Industrial Ecology*, 16(3), 420–435. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00405.x>
- Macedo, I. de C., Leal, M., & Azevedo-Ramos-da-Silva, J. (2004). *Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil Government of the State of São Paulo*. Retrieved from <https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/brazil.unicamp.macedo.greenhousegas.pdf>
- Mårtensson, L. (2018). Emissions from Volvo's trucks 2018. Volvo Trucks. Retrieved from https://www.volvotrucks.com/content/dam/volvo/volvotrucks/markets/global/pdf/our-trucks/Emis_eng_10110_14001.pdf
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). *National Water Footprint Accounts - Volume 2: Appendices - Research Report Series No. 50. Water Research (Vol. 2)*. Retrieved from <https://waterfootprint.org/media/downloads/Report50-NationalWaterFootprints-Vol2.pdf>
- Mekonnen, Mesfin M., Romanelli, T. L., Ray, C., Hoekstra, A. Y., Liska, A. J., & Neale, C. M. U. (2018). Water, Energy, and Carbon Footprints of Bioethanol from the U.S. and Brazil. *Environmental Science and Technology*, 52(24), 14508–14518. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03359>
- Morfa Hernández, A. (2012). SICHAG : Software para la evaluación de la huella

hídrica en Villa Clara, 1–137.

NaturePlast. (2019). Historia de los bioplásticos. Retrieved February 7, 2019, from <http://natureplast.eu/es/el-mercado-de-los-bioplasticos/historia-de-los-bioplasticos/>

NaturePlast EU. (2019). Historia de los Bioplásticos - NaturePlast. Retrieved February 7, 2019, from <http://natureplast.eu/es/el-mercado-de-los-bioplasticos/fabricacion-de-los-bioplasticos/>

OLADE, O. L. de E., García, F., Yujato, M., & Arenas, A. (2017). *Estadística Energética 2017 Manual*. Retrieved from <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0380.pdf>

Piotrowski, S., Sarmiento, L., Chinthapalli, R., Dammer, L., Carus, M., Iffland, K., & Raschka, A. (2017). *Current situation and trends of the bio-based industries in Europe with a focus on bio-based materials*. Retrieved from www.bbi-europe.eu

PlasticsEurope (PEMRG). (2017). Plásticos – Situación en 2017. *Plastic the Facts 2017*, 50. Retrieved from https://www.plasticseurope.org/download_file/force/1452/632%0A

PlasticsEurope (PEMRG). (2018). • Global plastic production | Statista.

Proyecto-Huella_de_ciudades, CAF, AFD, CDKN, FFLA, & SASA. (2002). *Manual para la evaluación de la Huella Hídrica*. Retrieved from <http://waterfootprint.org/media/downloads/ManualEvaluacionHH.pdf>

Proyecto Huella de Ciudades. (2015). Calculadora Huella Hídrica. Retrieved February 13, 2019, from <http://huelladeciudades.com/AppHHCali/main.html#calcu>

Simon, A. (2018). La economía circular del agua : dirección obligatoria. *TecnoAqua No.30 - Marzo-Abril*, 108–113. Retrieved from https://www.tecnoaqua.es/descargar_documento/reportaje-economia-circular-agua-direccion-obligatoria-tecnoaqua-es.pdf

Vázquez del Mercado Arribas, R., & Lambarri Beléndez, J. (2017). *Huella Hídrica en México: análisis y perspectivas*. (M. Jiutepec & Instituto Mexicano de Tecnología del agua, Eds.), *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua* (Vol. 91). Retrieved from <https://www.gob.mx/imta/documentos/huella-hidrica-en-mexico-analisis-y-perspectivas>

Velázquez, E. (2010). *Agua Virtual, Huella Hídrica y el Binomio Agua-Energía: Repensando los Conceptos*. Retrieved from www.euroecolecon.org,

Vink, E. T. H., & Davies, S. (2015). Life Cycle Inventory and Impact Assessment Data for 2014 Ingeo[™] Polylactide Production. *Industrial Biotechnology*, 11(3), 167–180. <https://doi.org/10.1089/ind.2015.0003>

Wernet, G. (2013). *Ecoinvent_Dataset information_Petroleum Refinery Operation*

(Vol. 01). Retrieved from
<https://ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/fa8e61c4-f087-4417-8d5a-bc63e7377dea/8b738ea0-f89e-4627-8679-433616064e82>

WFN. (2019). Water Footprint Network Web Site. Retrieved February 16, 2019,
from <https://waterfootprint.org/en/>

Wu, M., & Xu, H. (2018). *Consumptive Water Use in the Production of Ethanol and Petroleum Gasoline-2018 Update (No. ANL/ESD/09-1 Rev. 2)*. Retrieved from www.anl.gov.