

Anexo A: Cálculo de la Huella Hídrica en la Fase 1

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

En la fase agrícola (cultivo, cosecha, transporte), los insumos y productos son cuantificados mediante análisis de ciclo de vida del proceso. La huella hídrica de la fase agrícola HH_{F1} resulta de la suma de la Huella Hídrica directa (HH_d) (agua directa utilizada en el cultivo) como resultado de la evapotranspiración del campo de cultivo y la Huella hídrica indirecta (HH_i), agua indirectamente utilizada en el proceso por los diferentes insumos utilizados tales como: fertilizantes, fungicidas, insecticidas, herbicidas y además por la utilización de la maquinaria agrícola, después de la cosecha en esta fase se tiene en cuenta también el transporte de la caña desde el cultivo hasta la planta procesadora de etanol.

$$HH_{F1} = HH_d + HH_i \quad (8)$$

Para determinar los insumos y productos del cultivo de caña de azúcar, se toma como referencia los datos consignados en la Tabla A.1, en la cual se incluye las fuentes y productos de entrada y salida utilizados para el cultivo de caña para la producción de bioetanol en Brasil de acuerdo con (Mesfin M. Mekonnen et al., 2018).

Los valores de huella hídrica para los insumos: semilla, fertilizantes y agroquímicos, se obtienen de la bibliografía, en trabajos previos de (Mesfin M. Mekonnen et al., 2018).

A continuación se realiza el cálculo de la huella hídrica para los insumos de energía y transporte utilizados en la fase 1.

Tabla A.1.- Insumos - productos requeridos para el cultivo de caña de azúcar

Insumos	Unidad	Cantidad para cultivar caña de azúcar	Fuente	Notas
Semilla	kg/Mg de cultivo	31,86	Gallagher et al. 2015, AgraFNP, 2015.	a
Fertilizantes:				
Nitrógeno	kg/Mg de cultivo	1,10	USDA, 2017. Veiga et al. 2015.	a
Fosfato	kg/Mg de cultivo	0,29	USDA, 2017. AgraFNP, 2015.	a
Potasio	kg/Mg de cultivo	1,32	USDA, 2017. Macedo et al. 2008.	a
Caliza agrícola	kg/Mg de cultivo	9,13	Gallagher et al. 2015, AgraFNP, 2015.	a
Agroquímicos:				
Fungicida	g/Mg de cultivo	0,01	USDA, 2017. Scabra et al. 2011.	a
Herbicidas	g/Mg de cultivo	44,00	USDA, 2017. AgraFNP, 2015.	a
Insecticidas	g/Mg de cultivo	0,27	USDA, 2017. AgraFNP, 2015.	a
Energía usada en la granja:	MJ/Mg de cultivo	150,00	Gallagher et al. 2015, AgraFNP, 2015.	a
Diésel	%	38,3%		
Gasolina	%	12,3%		
LPG	%	18,8%		
Gas natural	%	21,5%		
Electricidad	%	9,1%		
Agua utilizada en el cultivo:				
Agua Azul	m ³ /Mg de cultivo	4,00	Mekonnen et al., 2018	
Agua verde	m ³ /Mg de cultivo	101,00	Mekonnen et al., 2018	
Distancia de transporte desde el campo de cultivo hasta la planta de producción de etanol	km	20,00	19 km para (Gallagher et al., 2015) (a)	b
			21 km según (Gonzales et al., 2010).	
Nota:				
a	Citado por Mekonnen et al. 2018			
b	Para este trabajo se toma como distancia el promedio de 20km [(19+21)/2 = 20 km].			

Fuente.- Adaptado con base en (Mesfin M. Mekonnen et al., 2018), y (Gonzales, Miller, & Cohn, 2010)

A continuación se realiza los cálculos de huella hídrica para la electricidad, derivados del petróleo y para el transporte de la caña.

Huella Hídrica para la Energía utilizada en el cultivo

Cálculo de las fracciones de valor y de producto para la huella hídrica del diésel:

En este caso, por ser el diésel un derivado del petróleo, se puede aplicar el caso genérico del cálculo de Huella Hídrica de un producto mediante el enfoque gradual acumulativo (Hoekstra et al., 2011).

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

$$WF_{prod}[p] = \left(WF_{proc}[p] + \sum_{i=1}^y \frac{WF_{prod}[i]}{f_p[p, i]} \right) \times f_v[p] \quad \left(\frac{\text{volumen}}{\text{masa}} \right) \quad (9)$$

En donde:

$WF_{prod}[p]$, es la HH del producto de interés (diésel) que es un producto resultante de procesar petróleo crudo el cual se realiza en refinerías de petróleo.

$WF_{proc}[p]$, es la HH del proceso de transformación de petróleo (Refinación) que da como resultado “z” productos de salida.

$f_p[p, i]$ [-], es la fracción de producto y, se define como la cantidad de producto de salida ($w[p]$ (masa)) obtenida, por la cantidad de producto de entrada ($w[i]$ (masa)).

$$f_p[p, i] = \frac{w[p]}{w[i]} \quad [-] \quad (10)$$

$f_v[p]$, es una fracción de valor y, se define como la relación del valor de mercado de este producto con el valor agregado de mercado de todos los productos de salida ($p=i$ hasta z), obtenidos a partir de los productos de entrada al proceso.

$$f_v[p] = \frac{\text{precio}[p] \times w[p]}{\sum_{p=1}^z (\text{precio}[p] \times w[p])} [-] \quad (11)$$

Las fracciones de valor fluctúan con el tiempo dependiendo del desarrollo de los precios por lo cual, para evitar un efecto significativo de la fluctuación de los precios, se recomienda estimar las fracciones de valor basados en los precios promedio de al menos un período de cinco años (Hoekstra et al., 2011).

El cálculo de la **fracción de producto** $f_p [p, i]$ se muestra en la Tabla A.2.

Tabla A.2.- Fracción de producto de los principales derivados del petróleo en refinería

Producto	Cantidad de producto salida w[p] (kg)	Fracción de producto: $f_p [p, i] = w[p]/w[i]$ [-]	Fuente
Diesel	0,100	0,100	Wernet, 2013
Heavy fuel oil	0,176	0,176	Wernet, 2013
Kerosene	0,067	0,067	Wernet, 2013
Light fuel oil	0,268	0,268	Wernet, 2013
LPG	0,028	0,028	Wernet, 2013
Naphtha	0,068	0,068	Wernet, 2013
Petrol (gasolina)	0,215	0,215	Wernet, 2013
Pitch/bitumen	0,001	0,001	Wernet, 2013
Own energy consumption	0,060	0,060	Bosman, 2016
Total producto entrada: w [i] (kg) =	0,9831		
Cantidades resultantes a partir de 1kg de petróleo			

Fuente.- Base de datos Ecoinvent 3.01 (Bosman, 2016; Wernet, 2013)

La **fracción de valor** $f_v[p]$ se calcula como se muestra en la Tabla A.3.

Tabla A.3.- Cálculo de la fracción de valor

Producto [p]	Precio [p]	Fuente	Cantidad de producto salida w[p] (kg)	Producto precio x cantidad	Fracción de valor $f_v[p] = \frac{\text{precio}[p] \times w[p]}{\sum_{p=1}^z (\text{precio}[p] \times w[p])}$
	EUR2005/kg			precio [p] × w[p]	
Diesel	0,3700	Bosman, 2016	0,100	0,0370	0,135
Heavy fuel oil	0,1380	Bosman, 2016	0,176	0,0243	0,088
Kerosene	0,2970	Bosman, 2016	0,067	0,0198	0,072
Light fuel oil	0,2680	Bosman, 2016	0,268	0,0718	0,261
LPG	0,2760	Bosman, 2016	0,028	0,0078	0,028
Naphtha	0,2650	Bosman, 2016	0,068	0,0180	0,065
Petrol (gasolina)	0,4460	Bosman, 2016	0,215	0,0959	0,349
Pitch/bitumen	0,2323	Bosman, 2016	0,001	0,0002	0,001
Own energy consumption	N/A	N/A	0,060	N/A	N/A
$\sum_{p=1}^z (\text{precio}[p] \times w[p]) =$				0,27489	

Fuente.- Cálculo con base en (Bosman, 2016)

Cálculo de la Huella Hídrica (WF) del Diésel:

Para calcular la Huella Hídrica del diésel, se aplica el criterio que el único producto de entrada es el petróleo crudo por lo cual la Huella Hídrica (WF) del proceso (refinación) se divide por la fracción de producto específico (Bosman, 2016; Hoekstra et al., 2011). La ecuación para el cálculo de la Huella Hídrica de un solo producto es:

$$WF_{prod}[p] = \left(\frac{WF_{proc}[p]}{f_p[p, i]} + \sum_{i=1}^y \frac{WF_{prod}[i]}{f_p[p, i]} \right) \times f_v[p] \left[\frac{\text{volumen}}{\text{masa}} \right] \quad (12)$$

Como se trata de un único producto de entrada (petróleo crudo) (i=1), $WF_{prod}[i]$. La Sumatoria de las fracciones de los productos de salida $\sum f_p[p, i] = 1$. La Ecuación queda como sigue:

$$WF_{prod}[p] = \left(\frac{WF_{proc}[p]}{f_p[p, i]} + WF_{prod}[i] \right) \times f_v[p] \quad (13)$$

La Huella Hídrica promedio del petróleo crudo es de 1,058 m³/GJ (Gerbens-Leenes, Hoekstra, & Van Der Meer, 2008; Knook & Hogeboom, 2016). De donde, la Huella Hídrica del petróleo crudo en litros de agua es 1058 L/GJ.

Para la refinación de petróleo se utilizará un consumo promedio de agua de 1,53 galones de agua/galón de petróleo (Wu & Xu, 2018) o, 1,53 L agua/L crudo.

El Contenido energético del petróleo crudo se calcula con base en, 5,8 x 10⁶ BTU/Barril (EIA, 2019a), y con base en la tabla de equivalencias de energía, 1BTU=1055,05585262 Joules (EIA, 2019b).

$$5,8 \times 10^6 \frac{BTU}{Barril} \times \frac{1055,05585262}{1 BTU} \times \frac{1 Barril}{42 galones} \times \frac{1 gal}{3,785412 l} = 38,48 \frac{GJ}{l \text{ de crudo}}$$

De donde, el contenido energético del petróleo crudo es de 38.48 GJ/L de crudo.

Los cálculos de la Huella Hídrica del diésel y de los otros derivados del petróleo se presentan en la Tabla A.4.

Tabla A.4.- Cálculo de la Huella Hídrica de los subproductos del petróleo

Producto [p]	Fracción de producto: $f_p [p,i] = w[p]/w[i]$	Fracción de valor $f_v[p] = \frac{\text{precio}[p] \times w[p]}{\sum_{p=i} (\text{precio}[p] \times w[p])}$	WF proc [i] (WF refinación)			WF prod [i] (petróleo crudo)			$\frac{WF_{prod}[i]}{f_p[p,i]}$	$WF_{prod}[p] = \left(\frac{WF_{proc}[i]}{f_p[p,i]} + \sum_{i=1}^y \frac{WF_{prod}[i]}{f_p[p,i]} \right) \times f_v[p]$		
			(L. agua/L. crudo)	Nota:	(L. agua / GJ)	Nota:	L. agua / GJ	Nota:		L. agua/GJ	m ³ /GJ	Nota:
Diesel	0,100	0,135	1,53	a	0,03976	b	1058	c	0,3976	142,46	0,1425	d
Heavy fuel oil	0,176	0,088	1,53	a	0,03976	b	1058		0,2259	93,50	0,0935	
Kerosene	0,067	0,072	1,53	a	0,03976	b	1058		0,5952	76,40	0,0764	
Light fuel oil	0,268	0,261	1,53	a	0,03976	b	1058		0,1484	276,47	0,2765	
LPG	0,028	0,028	1,53	a	0,03976	b	1058		1,4050	30,10	0,0301	
Naphtha	0,068	0,065	1,53	a	0,03976	b	1058		0,5856	69,29	0,0693	
Petrol (gasolina)	0,215	0,349	1,53	a	0,03976	b	1058		0,1849	369,12	0,3691	
Pitch/bitumen	0,001	0,001	1,53	a	0,03976	b	1058		37,5103	0,98	0,0010	
Own energy consumption	0,060	N/A										
Sumas:	0,983	1,000									1,058	

Notas:	
a	Consumo promedio de agua para proceso de refinación de 1.53 galones de agua /galón de petróleo (Wu & Xu, 2018).
b	Contenido energético del petróleo crudo, 5.8×10^6 BTU/Barril, y de la tabla de equivalencias de energía, $1\text{BTU}=1055.0585262$ Joules (E.I.A., 2019). De donde, el contenido energético del petróleo crudo es de $38.48 \times \text{GJ/L}$ de crudo.
c	La Huella Hídrica del petróleo crudo calculado es de $1.058 \text{ m}^3/\text{GJ}$ (Gerbens-Leenes, Hoekstra, & Van Der Meer, 2008). De donde, la Huella Hídrica del petróleo crudo es 1058 L/GJ .
d	Como se trata de un único producto de entrada (petróleo crudo) ($i=1$), $WF_{prod}[i]$. La Sumatoria de las fracciones de los productos de salida $\sum f_p[p,i]=1$.

Fuente.- Elaboración propia

De donde se obtiene para el diésel $WF_{diésel} = 0.1425 \text{ m}^3/\text{GJ}$, agua Azul.

Para verificar el valor obtenido con respecto a otros trabajos, se confirma que el valor calculado se encuentra dentro del rango de valores de 28 a 376 L agua Azul/GJ, calculado por (Gerbens-Leenes, Hoekstra, & Bosman, 2017).

Cálculo de la Huella Hídrica de la electricidad

La Huella Hídrica de la electricidad (1116.0 kJ/kg de etileno), se calcula con base en la cantidad de electricidad requerida para producir 1 kg de etileno. Se asume que el suministro de energía eléctrica utilizada lo proporciona el sistema nacional brasileño, el cual proviene de varias fuentes de energía. En la Tabla A.5 se muestra la composición energética reportada por la “Empresa de Pesquisa Energética” (EPE) de Brasil, en el reporte de Balance Energético Nacional de 2018 (EPE, 2018).

Tabla A.5.- Composición energética por tipo de fuente en Brasil

Fuente tipo	Porcentaje	Fuente
Hidráulica	65,20%	Empresa de pesquisa energética Brasil, 2018
Gas Natural	10,50%	Empresa de pesquisa energética Brasil, 2018
Biomasa	8,20%	Empresa de pesquisa energética Brasil, 2018
Eólica	6,80%	Empresa de pesquisa energética Brasil, 2018
Oil	2,50%	Empresa de pesquisa energética Brasil, 2018
Nuclear	2,50%	Empresa de pesquisa energética Brasil, 2018
Coal	4,10%	Empresa de pesquisa energética Brasil, 2018
Solar	0,13%	Empresa de pesquisa energética Brasil, 2018

Fuente.- (EPE, 2018)

De (Gerbens-Leenes et al., 2008) se obtiene los valores de Huella Hídrica (WF) para las diferentes fuentes de energía y se calcula la proporción de HH correspondiente a la demanda de energía para el proceso de producción de etileno a partir de etanol, como se muestra en la Tabla A.6. Se asume que para la producción y cultivo de biomasa se utiliza enteramente agua verde, mientras que para los demás tipos de fuentes de energía se utiliza agua azul, la cual es utilizada en los sistemas de cada planta generadora principalmente para controlar la temperatura en sistemas de refrigeración y enfriamiento (Endah Putri, 2018; Gerbens-Leenes et al., 2008).

Tabla A.6.- Cálculo de la HH de la electricidad utilizada en el proceso

Fuente tipo	Porcentaje	Fuente	Fracción (Ei)	WF	Fuente	HH Azul	HH Verde	Nota:
	%		GJ	m ³ /GJ		m ³ /GJ	m ³ /GJ	
Hídrica	65,20%	a	0,6520	22,3	b	14,540		
Gas Natural	10,50%	a	0,1050	0,109	b	0,011		
Biomasa	8,20%	a	0,0820	61,2	b	-	5,018	c
Eólica	6,80%	a	0,0680	0,000	b	0,000		
Oil	2,50%	a	0,0250	1,058	b	0,026		
Nuclear	2,50%	a	0,0250	0,086	b	0,002		
Coal	4,10%	a	0,0410	0,164	b	0,007		
Solar	0,13%	a	0,0013	0,265	b	0,000		
TOTAL						14,587	5,018	

Notas:	
a	Empresa de Pesquisa Energética Brasil (EPE, 2018).- Balance Energético Nacional de Brasil - Reporte 2018
b	(Gerbens-Leenes et al., 2008) - Water footprint of bio-energy and other primary energy carriers - No. 29
c	Se asume que toda el agua utilizada para el cultivo de biomasa es agua verde y, que todas las demás tipos de fuente utilizan agua azul.

Fuente.- Elaboración propia con base en (Endah Putri, 2018; EPE, 2018; Gerbens-Leenes et al., 2008)

En la fase 1, la cantidad de electricidad utilizada se estima en 13,65 MJ/t caña, por lo cual las huellas hídricas se calculan como se indica a continuación.

$$HH_{azul} F1 = 13,65 \frac{MJ}{t \text{ caña}} \times \frac{1 GJ}{1000 MJ} \times 14,587 \frac{m^3}{GJ} = 0,1991 \frac{m^3}{t \text{ caña}}$$

$$HH_{verde} F1 = 13,65 \frac{MJ}{t \text{ caña}} \times \frac{1 GJ}{1000 MJ} \times 5,018 \frac{m^3}{GJ} = 0,0685 \frac{m^3}{t \text{ caña}}$$

Cálculo de la Huella Hídrica del transporte:

A continuación se realiza el cálculo de la huella hídrica para el transporte de la caña desde el campo de cultivo hasta la planta de procesamiento.

En la Tabla A.1 se consignó la distancia de transporte desde el campo de cultivo hasta la planta de producción de etanol de 19 km según (Gallagher et al., 2015) citado por (Mesfin M. Mekonnen et al., 2018), y también la distancia de 21 km según el modelo de logística óptima para producción en Brasil determinada por (Gonzales et al., 2010). En este trabajo se utiliza el valor de distancia de promedio de 20 km como distancia estimada, por lo cual el recorrido total estimado será de 40 km.

Para el transporte se asume que se utiliza camiones de transporte de caña estándar de 32 toneladas de capacidad de la marca Volvo, con un peso bruto total máximo de 40 toneladas. Se asume que el camión está totalmente lleno para el trayecto desde el campo de cultivo hasta la planta, y vacío en el trayecto desde la planta hacia el campo.

La información del consumo de combustible se toma del fabricante de Volvo, sin embargo el consumo final es variable y depende de las condiciones del vehículo, las condiciones del camino, la técnica de conducción, etc. Un camión estándar con capacidad para 40 toneladas, totalmente lleno consume en promedio 48 L/100km = 0,48 L/km, se aproxima el valor a 0,5 L/km. El camión vacío consume en promedio 29,5 L/100 km = 0,295 L/km, se aproxima el valor a 0,3 L/km (Mårtensson, 2018).

El promedio de consumo de combustible para el camión lleno y vacío = $(0,5+0,3)/2$
= 0,4 L/km por todo el trayecto.

El camión en el recorrido para una carga de 32 toneladas de caña consume: $40 \text{ km} \times 0,4 \text{ L/km} = 16 \text{ L diésel/32 t de caña} = 0,5 \text{ L de diésel/t de caña} \times 27,5 \text{ t de caña} / 1 \text{ t PE} = 13,75 \text{ L diésel/t PE}$.

El poder calorífico del diésel se obtiene de E.I.A. (U.S. Energy Information Administration, Conversión Energía) $1 \text{ galon de diésel} = 137381 \text{ Btu} = 144,945 \text{ MJ} = 3,785 \text{ L}$. De donde: $144,945 \text{ MJ} / 3,785 \text{ L} = 38,3 \text{ GJ/L}$ (EIA, 2020).

Por lo tanto: $13,75 \text{ L diésel/ t PE} \times 38,3 \text{ MJ/L} = 526,625 \text{ MJ/t PE} \times 1 \text{ t PE} / 1000 \text{ kg PE} \times 1 \text{ GJ/ 1000 MJ} = 5,26625 \times 10^{-4} \text{ GJ/kg PE}$ que se utiliza en el transporte.

La energía utilizada por el transporte de la caña desde el campo de cultivo hasta la planta de procesamiento de bioetanol es de $0,01915 \text{ GJ/t caña}$ ($0,5 \text{ L diésel/t caña} \times 38,3 \text{ MJ/L diésel} \times 1 \text{ GJ/1000 MJ} = 0,01915 \text{ GJ/ t caña}$).

La Huella hídrica del transporte se calcula con el valor correspondiente de la huella hídrica del diésel. $0,01915 \text{ GJ/t caña} \times 0,14246 \text{ m}^3/\text{GJ} = 0,00273 \text{ m}^3 \text{ agua/ t caña}$.

En la Tabla A.7 se registra los datos intermedios del proceso de cálculo.

Tabla A.7.- Inventario de insumos para el cultivo de caña en Brasil

Insumos de entrada	Unidad	Cantidad para cultivar caña de azúcar	Unidad	Cantidad de producto por tonelada de caña	Notas
Semilla	kg/Mg de cultivo	31,86	kg/t caña	31,86	
Fertilizantes:					
Nitrógeno	kg/Mg de cultivo	1,10	kg/t caña	1,10	
Fosfato	kg/Mg de cultivo	0,29	kg/t caña	0,29	
Potasio	kg/Mg de cultivo	1,32	kg/t caña	1,32	
Caliza agrícola	kg/Mg de cultivo	9,13	kg/t caña	9,13	
Agroquímicos:					
Fungicida	g/Mg de cultivo	0,01	kg/t caña	0,00001	
Herbicidas	g/Mg de cultivo	44,00	kg/t caña	0,044	
Insecticidas	g/Mg de cultivo	0,27	kg/t caña	0,00027	
Energía usada en la granja:	MJ/Mg de cultivo	150,00			
Diésel	%	38,3%	MJ/t caña	57,45	a
Gasolina	%	12,3%	MJ/t caña	18,45	a
LPG	%	18,8%	MJ/t caña	28,2	a
Gas natural	%	21,5%	MJ/t caña	32,25	a
Electricidad	%	9,1%	MJ/t caña	13,65	a
Agua directa utilizada en el cultivo:					
Agua Azul	m ³ /Mg de cultivo	4,00	m ³ /t caña	4,00	
Agua verde	m ³ /Mg de cultivo	101,00	m ³ /t caña	101,00	
Transporte desde el campo de cultivo hasta la planta de producción de etanol	km	20,00	GJ/t caña	0,01915	b

Notas:	
a	Valor calculado en MJ/t caña a partir del porcentaje correspondiente para cada fuente de energía.
b	Cálculo realizado en este trabajo.

Fuente.- Elaboración propia e información de (Mesfin M. Mekonnen et al., 2018)

A continuación, en la Tabla A.8 se consigna los valores de Huella Hídrica para cada insumo.

Tabla A.8.- Agua Azul y verde por insumo utilizado en la fase 1

Insumos de entrada	Unidad	Huella Hídrica				Referencia	Notas
		Agua Azul		Agua Verde			
		L/unidad	m ³ /unidad	L/unidad	m ³ /unidad		
Semilla	t caña	125,00	0,125	3208,00	3,2080	Mekonnen et al., 2018	c
Fertilizantes:							
Nitrógeno	t caña	1,750	0,00175			Mekonnen et al., 2018	c
Fosfato	t caña	0,130	0,000130			Mekonnen et al., 2018	c
Potasio	t caña	0,0030	0,000003			Mekonnen et al., 2018	c
Caliza agrícola	kg	83	0,083			University of Tennessee Center for Clean Products, 2008	c
Agroquímicos:							
Fungicida	-	-	-			-	
Herbicidas	t caña	0,057	0,000			Mekonnen et al., 2018	c
Insecticidas	t caña	0,001	0,000			Mekonnen et al., 2018	c
Energía usada en la granja:							
Diésel	GJ	142,46	0,14246			Este trabajo.	a
Gasolina	GJ	369,12	0,369			Este trabajo.	a
LPG	GJ	30,10	0,030			Este trabajo.	a
Gas natural	GJ	0,109	0,000			Gerbens Leenes et al 2008	
Electricidad	GJ		14,5870		5,0180	Este trabajo.	b
Agua utilizada en el cultivo:							
Agua Azul	m ³ /t caña		3,934			Mekonnen et al., 2018	c
Agua verde	m ³ /t caña		100,71			Mekonnen et al., 2018	c
Transporte desde el campo de cultivo hasta la planta de producción de etanol	GJ	142,46	0,14246			Este trabajo.	a

Notas:	
a	Cálculo de consumo de agua para los derivados del petróleo elaborado en este trabajo. 142,46 L agua azul / GJ de diésel; 369,12 L agua azul / GJ gasolina; 30,1 L agua azul / GJ LPG; 0,109 L agua azul / GJ gas natural
b	Cálculo de la huella hídrica de la electricidad elaborado en este trabajo.
c	Citado por (Mekonnen et al., 2018)

Fuente.- (Mesfin M. Mekonnen et al., 2018) y Fase 1 de este trabajo

Combinando los valores de las Tablas A.1 y A.8, se cuantifica las Huellas Hídricas azul y verde según la cantidad de los insumos utilizados en la fase 1. Estos valores quedan consignados en la Tabla A.9.

Tabla A.9.- Cuantificación de Huellas Hídricas Fase 1 (cultivo de caña de azúcar)

Insumos de entrada	Unidad	Cantidad de Agua (HH)		Fuente
		Agua Azul m ³ /unidad	Agua Verde m ³ /unidad	
Semilla	t caña	0,12500	3,208	Mekonnen et al., 2018
Fertilizantes:				
Nitrógeno	t caña	0,00175		Mekonnen et al., 2018
Fosfato	t caña	1,30E-04		Mekonnen et al., 2018
Potasio	t caña	3,00E-06		Mekonnen et al., 2018
Caliza agrícola	t caña	0,75779		Mekonnen et al., 2018
Agroquímicos:				
Fungicida		-		
Herbicidas	t caña	5,70E-05		Mekonnen et al., 2018
Insecticidas	t caña	1,00E-06		Mekonnen et al., 2018
Energía usada en la granja:				
Diésel	t caña	8,18E-03		a
Gasolina	t caña	6,81E-03		a
LPG	t caña	8,49E-04		a
Gas natural	t caña	3,52E-06		a
Electricidad	t caña	0,1991	0,0685	a
Agua utilizada en el cultivo:				
Agua Azul	t caña	3,934		Mekonnen et al., 2018
Agua verde	t caña		100,71	Mekonnen et al., 2018
Transporte desde el campo de cultivo hasta la planta de producción de etanol	t caña	0,00273		0,01915 x 0,14246=0,00273
HH Total Fase 1	t caña	5,04	103,98	

Notas:	
a	Cálculo con base en los valores de las Tablas A.1 y A.8.

Fuente.- (Mesfin M. Mekonnen et al., 2018)

Cálculo de la HH gris fase agrícola:

Para calcular la huella hídrica gris no se tiene información directa del proceso de producción específico a la empresa por lo cual, de la bibliografía se obtiene que para el cultivo de caña según (M. M. Mekonnen & Hoekstra, 2011) la HH total es de 137m³/t caña, sin incluir créditos de HH agua por coproductos, los cuales son aprovechados en la siguiente fase:

$$HH_{total}caña = 137 \frac{m^3}{t caña}$$

Con el valor de HH_{total} y los datos de la Tabla A.9:

$$HH_{Azul}cultivo de caña = 5,04 \frac{m^3 agua azul}{t caña}$$

$$HH_{Verde}cultivo de caña = 103,98 \frac{m^3 agua verde}{t caña}$$

Se calcula la HH gris como:

$$HH_{gris} = HH_{total} - (HH_{Verde} + HH_{azul})$$

$$HH_{gris}Cultivo de caña = 137 - (5,04 + 103,98) = 27,98 \frac{m^3}{t caña}$$

$$HH_{gris}Cultivo de caña = 27,98 \frac{m^3 agua gris}{t caña}$$

En la Tabla A.10 se presenta el resumen de la Huella Hídrica del Polietileno en metros cúbicos de agua por tonelada de caña y por kg de producto final PE.

Tabla A.10.- Resumen de resultados de la Fase 1

RESUMEN	Unidad	Huella Hídrica			
		HH Azul	HH Verde	HH Gris	HH TOTAL
		m ³ de agua/ Unidad			
Fase 1	t caña	5,04	103,98	27,98	137,0
	kg PE	0,139	2,860	0,769	3,8
Nota:	De 82,5 t de caña se produce 3 t PE = 0,0275 t caña/ kg PE				

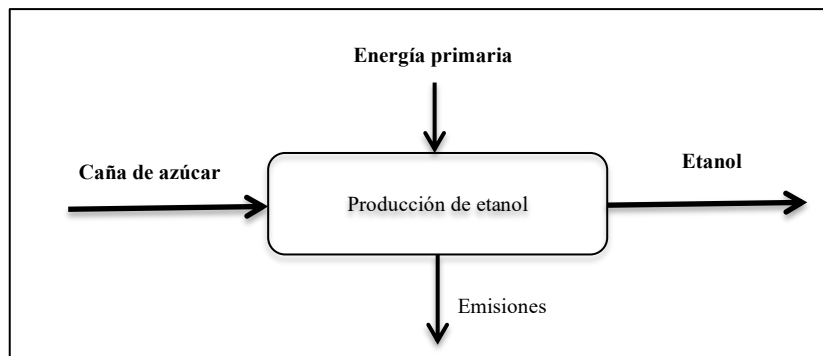
Fuente.- Elaboración propia

Anexo B: Cálculo de la Huella Hídrica en la Fase 2

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

Los productos de entrada y salida a la etapa de transformación de caña de azúcar a etanol se representan en la Figura B.1.

Figura B.1.- Fase 2 - Flujos de entrada y salida para la producción de bioetanol



Fuente.- (Liptow & Tillman, 2009)

Con base en la información disponible en (Mesfin M. Mekonnen et al., 2018) se determina que en esta fase se utiliza un promedio de 19,5 litros agua azul por litro etanol.

$$HH_{Azul} producción etanol = 19,5 \frac{l \text{ agua}}{l \text{ etanol}}$$

En esta fase además se genera **coproductos** como el bagazo, la torta de filtro y la vinaza los cuales son utilizados como fuente de energía (calor o, electricidad) o, en otros procesos y no forman parte del etanol por lo cual su huella hídrica es representada como créditos al contabilizar el consumo de agua de la fase. Sus valores son 10 litros de agua azul por litro de etanol y 155 litros de agua verde por litro de etanol (Mesfin M. Mekonnen et al., 2018).

Coproductos:

$$HH_{Azul}coproductos = 10 \frac{l\ agua}{l\ etanol}$$

$$HH_{Verde}coproductos = 155 \frac{l\ agua}{l\ etanol}$$

El cálculo de la huella hídrica aplicado para el Biopolietileno de Braskem, se realiza con los valores de su producción presentados (Tabla 4.1), en donde a partir de 82,5 t caña se obtiene 7200 litros de etanol y posteriormente 3 t de PE. En la Tabla B.1 se presenta el resumen de esta fase. En esta fase la huella hídrica gris es nula (Mesfin M. Mekonnen et al., 2018).

Tabla B.1.- Huella Hídrica azul y verde - Fase 2

Fase 2: Producción de bioetanol	Descripción	Unidad	Cantidad	Huella Hídrica			Fuente
				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				(Mesfin M. Mekonnen et al., 2018)
Agua	Agua azul utilizada en el proceso	L agua/L etanol	19,50	0,0468	0,00	-	(Mesfin M. Mekonnen et al., 2018)
Productos salida del proceso							
Masa	Etanol	L/t caña	87,27				(Macedo, Leal, & Azevedo-Ramos-da-Silva, 2004) y (Liptow & Tillman, 2012)
Producto de la cogeneración							
Energía cogenerada	Electricidad cogenerada	MJ/t caña	270,00	0,0240	0,3720	-	(Mesfin M. Mekonnen et al., 2018)
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 con base en (Mesfin M. Mekonnen et al., 2018)

En la Tabla B.2 se presenta los resultados de la fase 2.

Tabla B.2.- Resumen de la Fase 2

FASE 2	Huella Hídrica		
	Agua Azul	Agua Verde	Agua gris
	m ³ /kg PE	m ³ /kg PE	m ³ /kg PE
Producción de bioetanol	0,0468	0,000	0,000
Crédito por producción de energía a partir de los Coproductos	-0,024	-0,372	0,000
Total Fase 2	0,0228	-0,372	0,000

Fuente.- Elaboración propia

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

El Nogal: Cl- 79 n°. 11 - 45 | NIT: 860.026.058-1

Centro de contacto: (+57-1) 593 6464 | Bogotá D.C., Cundinamarca, Colombia, Suramérica

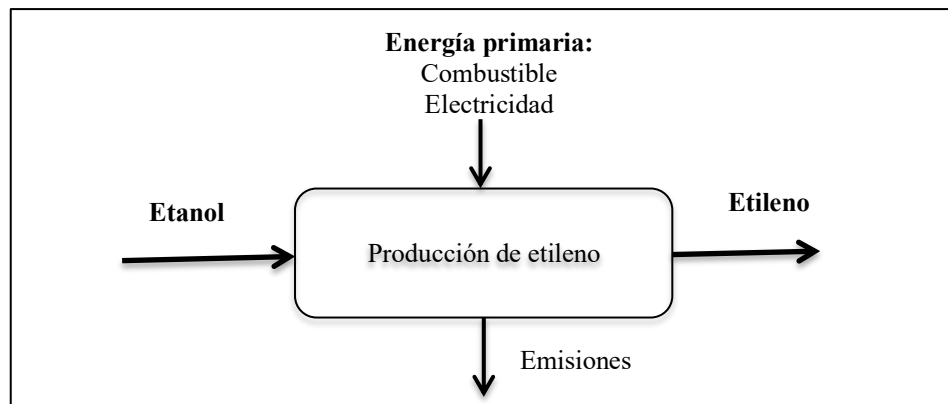
universidadean.edu.co

Anexo C: Cálculo de la Huella Hídrica en la Fase 3

Fase 3: Producción de etileno a base de bioetanol

Esta fase simplificada se representa en la Figura C.1, en la cual para procesar etanol y producir etileno, se requiere de combustible, para el proceso interno, para las operaciones externas y, el uso de electricidad. El inventario de insumos de entrada y productos de salida de esta fase representados en la Tabla C.1 se obtienen a partir de la revisión bibliográfica con base en el trabajo (Liptow & Tillman, 2012).

Figura C.1.- Fase 3 - Producción de Etileno en base a etanol



Fuente.- Elaboración propia

Tabla C.1.- Insumos y productos Fase de producción de etileno

Fase	Insumos	Cantidad		Fuente
		kJ/kg etileno	GJ/kg etileno	
3	Producción de etileno			
	Combustible interno	3736,0	3,736	Liptow and Tillman (2012)
	Combustible externo	1675,0	1,675	Liptow and Tillman (2012)
	Electricidad	1116,000	1,116	Liptow and Tillman (2012)

Fuente.- Liptow and Tillman (2012)

Para obtener la huella hídrica del combustible, en los dos casos se asume que se utiliza diésel. Mientras que la huella hídrica de la electricidad se evalúa de acuerdo con la composición por fuente de producción en Brasil. Cada tipo de fuente (hidroeléctrica, biomasa, carbón, gas natural, etc.), provoca una diferente huella hídrica afectando en distintas proporciones al proceso en estudio. Los resultados fueron calculados en el Anexo A. En la Tabla 4.1, se determinó que se requiere una cantidad de 2,4 litros de etanol para producir 1 kg de etileno (Glass, 2012).

La Huella Hídrica (WF) del Diésel se calculó en el Anexo A en donde:

$$\text{La HH}_{\text{diésel}} = 0,1425 \text{ m}^3/\text{GJ, agua Azul.}$$

La Huella Hídrica de la electricidad se calculó en el Anexo A, en donde se:

$$\text{HH azul electricidad} = 14,587 \text{ m}^3/\text{GJ}$$

$$\text{HH verde electricidad} = 5,018 \text{ m}^3/\text{GJ}$$

A continuación, en la Tabla C.2 se cuantifica los valores para el proceso de producción de etileno a base de etanol, Fase 3.

Tabla C.2.- HH total Fase 3 de producción de etileno en base a etanol de caña de azúcar

Fase	Productos		HH Azul	HH Verde	Nota:	Total Huella Hídrica Fase		
						HH Azul	HH Verde	HH Gris
3	Producción de etileno	GJ/kg etileno	m ³ /GJ	m ³ /GJ		m ³ / kg etileno	m ³ / kg etileno	m ³ / kg etileno
	Combustible interno	3,736	0,1425		a	0,532	-	-
	Combustible externo	1,675	0,1425		a	0,239	-	
	Electricidad	0,001116	14,59	5,02	b	0,016	0,0056	
TOTAL =						0,787	0,0056	-

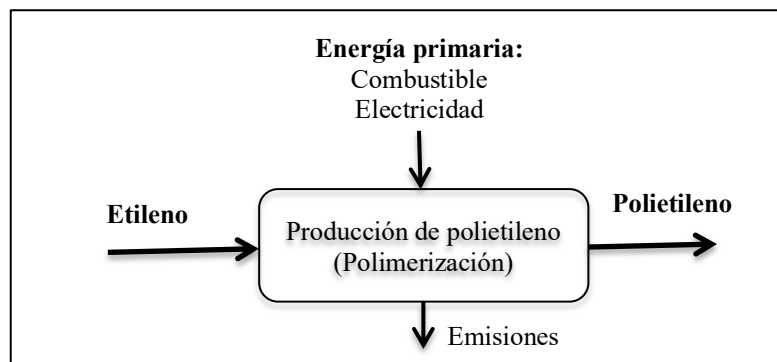
Notas:	
a	Cálculo de HH del diesel Apendice A (Tabla 18).
b	Cálculo de HH de la electricidad Apendice A (Tabla 21).

Anexo D: Cálculo de la Huella Hídrica en la Fase 4

Fase 4: Producción de Polietileno a base de etileno (polimerización)

Esta fase simplificada en la Figura D.1, requiere de combustible y electricidad para realizar el proceso de polimerización del etileno.

Figura D.1.- Fase 4 - Proceso sintetizado de polimerización del etileno



Fuente.- Elaboración propia

Los datos del inventario de insumos de entrada y productos de salida de esta fase son obtenidos a partir de la bibliografía con base en el trabajo de Liptow and Tillman. La electricidad consumida se asume que proviene del sistema nacional. Se asume que es diésel el combustible utilizado en este proceso. Las cantidades de inventario requerido se presentan en la Tabla D.1 (Liptow & Tillman, 2012).

Tabla D.1.- Insumos de entrada para la Polimerización del etileno

FASE	Insumos	Unidad	Cantidad	Fuente
4	Producción de Polietileno			
	Combustible interno	t/año	1748,0	Liptow and Tillman (2012)
	Combustible externo	t/año	1159,0	Liptow and Tillman (2012)
	Electricidad	MJ/año	1,50E+09	Liptow and Tillman (2012)

Fuente.- (Liptow & Tillman, 2012)

La Tabla D.2 muestra los insumos y productos de esta fase .

Tabla D.2.- Insumos y productos Fase de producción de etileno

FASE	Insumos	Unidad	Cantidad	Nota	Fuente	Cantidad / Fase 4	Nota
4	Polimerización					GJ/kg PE	
	Combustible interno para PEBD	t/año	1748,0	a	Liptow and Tillman (2012)	1,757E-04	f
	Combustible externo para PEBD	t/año	1159,0	b	Liptow and Tillman (2012)	1,165E-04	g
	Electricidad para PEBD	MJ/año	1,50E+09	c	Liptow and Tillman (2012)	3,333E-03	h

Notas:	
a,b,c	Fuente: Liptow and Tillman (2012) Para una producción anual de 450000 toneladas/año
f	1748 t de diesel/año es el consumo de combustible anual para la producción. Teniendo en cuenta que la producción anual de Polietileno Verde en Braskem es de 450000 t/año. La densidad del diésel es 0,84 g/cm ³ (Ficha de datos del Diesel-500 YPF). 1 ton diesel = 1000/0,84 = 1190,5 L de diesel. Cálculo: 1748 t diesel / año x 1190,5 L diesel/1 t diesel x 38 MJ/1 L diesel x 1 año/450000 t de PE = 175,728 MJ/t PE x 1GJ/1000MJ = 1,75728 x 10 ⁻⁴ GJ/kg PE. 175,728 MJ/t PE = 1,75728 x 10 ⁻⁴ GJ/ kg PE
g	1159 t diesel/año * 1190,5*38/450000/1000000 = 1,165 x 10 ⁻⁴ GJ/kg PE
h	1,5 x 10 ⁹ MJ/kg x 1GJ/1000MJ x 1 año/450000 t PE x 1 t/1000 kg = 3,333 x 10 ⁻³ GJ/kg PE

Fuente.- Liptow and Tillman (2012)

El cálculo de la huella hídrica para la polimerización en la Tabla D.3 se realiza con base en los cálculos realizados para el combustible (diésel) y la electricidad realizados en la Fase 1 (Anexo A).

Tabla D.3.- Cálculo de la Huella Hídrica de la Fase 4 (Polimerización)

Fase	Insumos	Cantidad	Fuente	HH Azul	HH Verde	Fuente	Huella Hídrica		
							HH Azul	HH Verde	HH Gris
4	Polimerización	GJ/kg PE		m ³ /GJ	m ³ /GJ		m ³ / kg PE	m ³ / kg PE	m ³ / kg PE
	Combustible interno para PEBD	1,757E-04	Tabla D.2	0,1425		a	0,000025	-	-
	Combustible externo para PEBD	1,165E-04	Tabla D.2	0,1425		a	0,000017		
	Electricidad para PEBD	3,333E-03	Tabla D.2	14,587	5,018	b	0,048622	0,0167	
Total Fase =							0,0487	0,0167	-
Notas:									
a	Cálculo en el Apéndice A en la sección de HH del diesel, Tabla A.4								
b	Cálculo en el Apéndice A, HH de la electricidad Tabla A.6								

Fuente.- Elaboración propia

Anexo E: Resumen de la Huella Hídrica del Proceso Completo

En la Tabla E.1 se consigna los valores generales de las huellas hídricas de todas las fases y del proceso de producción de Biopolietileno.

Tabla E.1.- Huella Hídrica -Resultado del proceso completo

FASES	Insumos /Productos	Descripción	Resultados en unidades estándar a este trabajo					Notas	
			Energía		TOTALES POR FASE	Huella Hídrica en unidades			
			Unidad	Cantidad		HH Azul	HH Verde		HH Gris
m ³ de agua/kg PE									
FASE 1	Insumos de entrada:				TOTAL FASE 1				
	Masa	Semilla, Fertilizantes, Agroquímicos	kg/kg PE			0,0243	0,0882	0,7695	a
	Energía	Granja, transporte	GJ/kg PE	4,126		0,0060	-		
	Agua	Cultivo	m ³ /kg PE	2,878		0,1082	2,7694		
	Productos salida del proceso								
	Masa	Caña de azúcar				0,1385	2,8577	0,7695	
FASE 2	Insumos de entrada				TOTAL FASE 2				
	Masa	Caña de azúcar	t caña						
	Energía	Electricidad utilizada en el proceso	GJ/kg PE	8,8E-04					
	Agua	Agua azul utilizada en el proceso	m ³ agua/ kg PE	0,0468		0,0468			b
	Productos salida del proceso								
		Masa	Bagazo, torta de filtro, Vinaza						
	Energía	Electricidad cogenerada	GJ/kg PE	7,43E-03		-0,024	-0,372	0,0000	c
	Etanol					0,0228	-0,3720	0,0000	
FASE 3	Insumos de entrada:				TOTAL FASE 3				
	Masa	Bioetanol suministro de entrada	L etanol /kg PE	2,40					
	Energía	Combustible Interno, externo y electricidad	GJ/kg PE	5,41					
	Agua	Agua directa e indirecta utilizada				0,787	0,006	0,00	d
	Productos salida del proceso:								
	Masa	Bioetileno	kg			0,7871	0,0056	0,0000	
FASE 4	Insumos de entrada:				TOTAL FASE 4				
	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	0,0000	
	Productos salida del proceso:								
	Masa	Bio-Polietileno	kg			0,0487	0,0167	0,0000	

HH Total por tipo m ³ /kg PE	0,9971	2,5080	0,7695
--	--------	--------	--------

HH TOTAL PROCESO m ³ /kg PE	4,27
---	------

Notas	
a	0,275 kg caña/ kg PE
b	2,4 litros etanol/kg PE
c	Créditos por coproductos
d	1 kg etileno / 1 kg PE

Fuente.- Elaboración propia

Tabla E.2.- Resultados totales por fase e impacto de coproductos

Fases	Descripción	Huella Hídrica			Total	
		HH Azul	HH Verde	HH Gris	m ³ de agua/kg PE	Porcentaje total
		m ³ de agua/kg PE				
1	Cultivo y transporte	0,1385	2,8577	0,7695	3,766	80,63%
	Porcentajes fase	3,7%	75,9%	20,4%		
2	Producción de bioetanol	0,0468	0,0	0,0	0,047	1,00%
	Porcentajes fase	100%	0%	0%		
3	Producción de etileno	0,7871	0,0056	0,0	0,793	16,97%
	Porcentajes fase	99,3%	0,7%	0,0%		
4	Polimerización	0,0487	0,0167	0,0	0,065	1,40%
	Porcentajes fase	74,4%	25,6%	0,0%		
	HH Total sin la reutilización de coproductos	1,02	2,88	0,77	4,67	100,00%
	Aprovechamiento de los coproductos de la fase 2 (a)	-0,0240	-0,3720	0,0	-0,396	-8,48%
	Total General HH del proceso	1,00	2,51	0,77	4,27	
	Porcentajes generales	23,33%	58,67%	18,00%		

Notas:	
a	Se observa la reducción del 8,5% por la reutilización de los coproductos.

Fuente.- Elaboración propia