

Impactos ambientales de biorrefinería integrada con etapa de sacarificación ácida

Sotelo Navarro Perla Xochitl^{1*}, Poggi Varaldo Héctor Mario², Ponce Noyola María Teresa²,
Chargoy Amador Juan Pablo³, Sojo Benítez Amalia³, Espinosa Valdemar Rosa María⁴

¹Cátedra CONACYT-Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Doctorado Transdisciplinario en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad, Apdo. Postal 14-740, 07000, CDMX, México.

²Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Grupo de Biotecnología Ambiental y de Energías Renovables, DCTS y DBB, Apdo. Postal 14-740, 07000, CDMX, México.

³Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Desarrollo Sustentable, CADIS, Av. Convento de Actopan 24, Habitacional Jardines de Santa Mónica, 54050 Tlalnepantla de Baz, México.

⁴Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Azcapotzalco, Departamento de Energía, Área de Tecnologías Sustentables

*Autor para correspondencia: r4cepe@yahoo.com; perla.sotelo@conacyt.mx

Recibido:

27/febrero/2020

Aceptado:

11/diciembre/2020

Palabras clave:

Biorrefinería,
sacarificación,
impacto ambiental

Keywords:

Biorefinery,
saccharification,
environmental impact

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar los impactos ambientales producidos en una biorrefinería que procesa la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos para la obtención de bioenergías y productos de valor agregado tales como concentrado de ácidos orgánicos y solventes, concentrado de enzimas celulolíticas y xilanolíticas conocida como HMZS. Se utilizó la técnica de Análisis de Ciclo de Vida. La etapa S de sacarificación consistió en la hidrólisis ácida de residuos donde se desdobra los polisacáridos a azúcares reductores dando licores hidrolizados (HL). Se encontró que el uso de carbón activado en la detoxificación de los HL de la sacarificación contribuyó notablemente a los impactos ambientales. A su vez, esos impactos se relacionaron también con la minería de carbón y su procesamiento para convertirlo en carbón activado. Desde el punto de vista energético global, la biorrefinería resultó deficitaria en carga térmica y productora neta de energía eléctrica.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the environmental impacts of a biorefinery that processes the organic fraction of municipal solid waste. The biorefinery is known as HMZS. This is crucial because it can produce bioenergy's and value-added products such as organic acids, solvents, cellulolytic, and xylanolytic enzymes. The Life Cycle Analysis technique was used. Stage S consisted of acid hydrolysis of residues where the polysaccharides are splitted into reducing sugars giving hydrolyzed liquors (HL). It was found that the use of activated carbon in the detoxification of HL contributed significantly to environmental impacts. In turn, these impacts were also related to coal mining and its processing into activated carbon. From the overall energy point of view, the biorefinery was found to be deficient in thermal load and net producer of electrical energy.

Introducción

La falta de aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos en México puede comprometer la calidad ambiental, la salud humana y la pérdida de recursos secundarios. Dicha falta de aprovechamiento se refleja en la manera de disponer los residuos (relleno sanitario, incineración). Si embargo, se puede dar gran importancia a la obtención de bioenergías tomando con sustrato de alimentación a los residuos.

Biorrefinería (BRF) se define como procesamiento sostenible de biomasa para producir un amplio espectro de productos comerciales que puede incluir materiales, productos químicos, alimentos, alimentos animales, y energía (Fava et al., 2015; Poggi-Varaldo et al., 2014). La opción de BRF de residuos orgánicos (no de cualquier biomasa), a su vez, se basa en el aprovechamiento de dichos residuos para la obtención de bioenergías y productos de valor agregado.

Un análisis previo ha demostrado que una biorrefinería que procesa FORSU en un esquema H-M-Z-S, con sacarificación enzimática, supera al relleno sanitario para las condiciones de México (Escamilla-Alvarado et al., 2017). Interesantemente, también se demostró que esta BRF contribuye muy poco con el efecto invernadero.

La evaluación del ciclo de vida (LCA) es una herramienta que evalúa e identifica los impactos ambientales y los puntos críticos más relevantes durante el ciclo de vida de cualquier producto o proceso (ISO, 2006a).

El objetivo de este trabajo fue evaluar los impactos ambientales producidos en una biorrefinería que procesa la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos para la obtención de bioenergías y productos de valor agregado tales como concentrado de ácidos orgánicos y solventes, concentrado de enzimas celulolíticas y xilanolíticas conocida como HMZS. Se utilizó la técnica de Análisis de Ciclo de Vida. La etapa S de sacarificación consistió en la hidrólisis ácida de residuos donde se desdobra los polisacáridos a azúcares reductores dando licores hidrolizados (HL).

Metodología

Definición de objetivo y alcance

El objetivo de este trabajo fue evaluar los impactos ambientales producidos en una biorrefinería que procesa la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos para la obtención de bioenergías y productos de valor agregado tales como concentrado de ácidos orgánicos y solventes, concentrado de enzimas celulolíticas y xilanolíticas conocida como HMZS.

Unidad Funcional

Según la norma ISO 14040, la unidad funcional (UF) proporciona un punto de referencia para las entradas y salidas en un estudio de LCA (ISO, 2006b). En el presente estudio, se tomó como UF la gestión del tratamiento de 1000 kg de FORSU con humedad típica de 35% en una biorrefinería HMZS.

Límite del sistema

La BRF consistió en 5 grandes etapas: H-M-E-Z-S, aunque en la denominación abreviada se omite la E (etapa de extracción de ácidos orgánicos y solventes de bajo peso molecular) y típicamente se la refiere como BRF H-M-Z-S.

El agua para el acondicionamiento de la FORSU al principio de la BRF es agua residual doméstica (o efluentes internos recirculados al acondicionamiento); esta agua residual se considera disponible sin costo de material ni de transporte (tubería y válvulas cercanas a o en la BRF).

Para este análisis, se consideró el destino de ciertas corrientes selectas de salida de materiales orgánicos generados en la BRF (por ejemplo, sólidos de la sacarificación a relleno sanitario, etc.).

Inventario de Ciclo de vida

Los datos requeridos para el ICV de este trabajo fueron obtenidos de diferentes artículos experimentales y teóricos. Todos los balances de masa y energía fueron ajustados a la unidad funcional. También se llevó a cabo la asignación a los procesos que así lo requirieron (Escamilla-Alvarado et al., 2013a; Escamilla-Alvarado et al., 2015; Escamilla-Alvarado et al., 2014; Escamilla-Alvarado et al., 2013b; Escamilla-Alvarado et al., 2012).

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo general de biorrefinería tipo HMZS que convierte la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) en bioenergía y bioproductos tales como: bioH₂, metano, enzimas y sacarificados con sacarificación ácida.

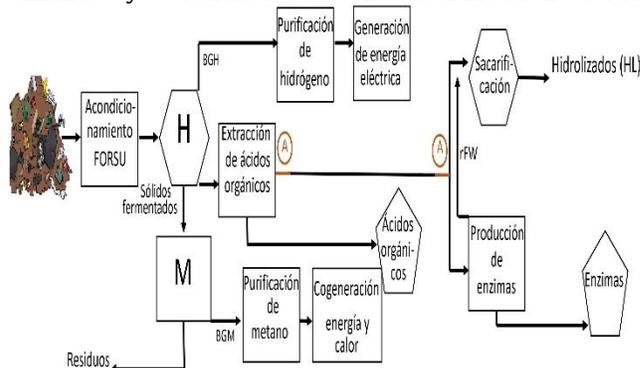


Figura 1. Diagrama de la biorrefinería HMZS.

La Figura 2 muestra el diagrama específico para la etapa de sacarificación ácida, es importante resaltar esta etapa ya que algunos estudios pueden trabajar con sacarificación enzimática. Tal como fue abordado por Escamilla-Alvarado et al., 2017, donde se demostró que una biorrefinería que procesa FORSU en un esquema H-M-Z-S, con sacarificación enzimática, supera al relleno sanitario para las condiciones de México (Escamilla-Alvarado et al., 2017). Interesantemente, también se demostró que esta BRF contribuye muy poco con el efecto invernadero.

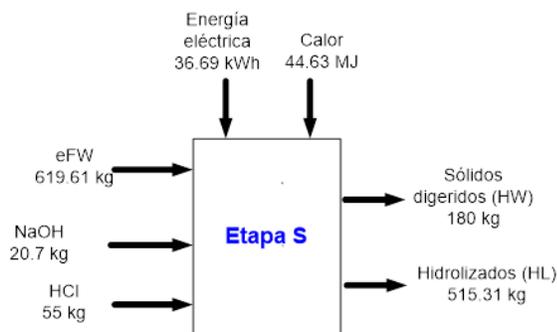


Figura 2. Diagrama de flujo de la etapa S (Sacarificación ácida).

Evaluación de impacto del ciclo de vida

La evaluación ambiental se realizó de acuerdo con los factores de caracterización reportados en el método de punto medio ReCiPe (World-H) 2016 utilizando el software Simapro 9 LCA. Las categorías de impacto evaluadas fueron potencial de calentamiento global

(GWP) (kg CO₂-eq.), Potencial de agotamiento del ozono (ODP) (kg CFC11eq.), Potencial de radiación ionizante (IRP) (kBq Co-60eq.), Acidificación terrestre potencial (TAP) (kg SO₂eq.), potencial de eutrofización de agua dulce (FWEP) (kg Peq.), potencial de ecotoxicidad de agua dulce (FEP) (kg 1,4-DCBeq.), potencial de ecotoxicidad marina (MEP) (kg 1,4-DCB eq.), Potencial de toxicidad humana (HTP) (kg 1,4-DCB eq.) Y potencial de uso de la tierra (LUP) (m² por cultivo eq.).

Resultados y discusión

La Tabla 1 muestra los principales impactos debidos a la BRF-HMZS de las 18 categorías de impacto evaluadas en la que se puede apreciar que la etapa Z de producción de enzimas tiene una mayor contribución en 11 de las 18 categorías evaluadas, seguida de la etapa de extracción de solventes y ácidos con tres, la etapa de obtención de metan con 2 y sacarificación y etapa H con 1 cada una. Cabe destacar que la contribución atribuida a la etapa de sacarificación se encuentra en la categoría de radiación ionizante con lo un 51 % de contribución por lo que se recomienda hacer un análisis de proceso para identificar la fuente de esta contribución. Se encontró que el uso de carbón activado en la detoxificación de los HL de la sacarificación contribuyó notablemente a los impactos ambientales. A su vez, esos impactos se relacionaron también con la minería de carbón y su procesamiento para convertirlo en carbón activado.

Tabla 1. Identificación de asuntos significativos por cada categoría de impacto.

Categoría de impacto	Unidades	BRF-ETAPA EXT.	BRF-ETAPA H	BRF-ETAPA M	BRF-ETAPA SACARIF.	BRF-ETAPA Z	TOTAL
Calentamiento global	%	5.78	21.65	27.3	16.16	29.12	100.
	kg CO ₂ eq	33.79	126.64	159.73	94.53	170.34	585.03
Agotamiento del ozono estratosférico	%	0.21	44.2	42.84	4.09	8.67	100.
	kg CFC11 eq	0.0000	0.0010	0.0009	0.0001	0.0002	0.0022
Radiación ionizante	%	4.53	12.19	4.11	50.8	28.37	100.
	kBq Co-60 eq	0.65	1.75	0.59	7.30	4.08	14.37
Formación de ozono, salud humana	%	60.74	9.1	6.86	8.72	14.58	100.
	kg NOx eq	1.21	0.18	0.14	0.17	0.29	1.997
Formación de partículas finas	%	1.79	30.4	48.64	8.2	10.98	100.
	kg PM2.5 eq	0.05	0.76	1.22	0.21	0.28	2.52
Formación de ozono, ecosistemas terrestres	%	70.21	6.77	5.07	6.45	11.5	100.
	kg NOx eq	1.91	0.18	0.14	0.18	0.31	2.73
Acidificación terrestre	%	0.66	32.89	59.01	2.58	4.87	100.
	kg SO ₂ eq	0.11	5.40	9.68	0.42	0.80	16.41
Eutrofización de agua dulce	%	4.54	19.6	5.57	27.9	42.38	100.
	kg P eq	0.01	0.02	0.01	0.04	0.05	0.13
Eutrofización Marina	%	0.58	3.62	1.11	5.86	88.84	100.
	kg N eq	0.000	0.002	0.001	0.003	0.050	0.06
Ecotoxicidad terrestre	%	40.12	10.1	3.4	9.74	36.64	100.
	kg 1,4-DCB	272.23	68.50	23.10	66.06	248.57	678.46
Ecotoxicidad de agua dulce	%	5.8	13.85	3.83	16.95	59.58	100.
	kg 1,4-DCB	0.36	0.87	0.24	1.06	3.73	6.26
Ecotoxicidad marina	%	3.81	15.79	4.4	19.26	56.74	100.
	kg 1,4-DCB	0.30	1.23	0.34	1.50	4.41	7.77
Toxicidad humana cancerígena	%	2.12	5.14	1.57	8.92	82.25	100.
	kg 1,4-DCB	0.60	1.44	0.44	2.51	23.14	28.13
Toxicidad humana no cancerígena	%	4.4	20.67	5.86	22.23	46.85	100.
	kg 1,4-DCB	6.03	28.30	8.02	30.43	64.15	136.93
Uso de suelo	%	0.28	6.06	0.78	1.12	91.76	100.
	m ² a crop eq	0.11	2.45	0.32	0.46	37.17	40.5
Escasez de recursos minerales	%	0.22	0.94	0.05	0.63	98.16	100.
	kg Cu eq	0.00	0.02	0.00	0.01	1.73	1.77
Escasez de recursos fósiles	%	14.56	15.6	4.53	20.69	44.62	100.
	kg oil eq	16.91	18.11	5.27	24.03	51.83	116.14
Consumo de agua	%	10.97	23.28	5.01	17.3	43.44	100.
	m ³	0.97	2.05	0.44	1.52	3.83	8.81

Cabe destacar que la etapa Z tiene una contribución por arriba del 80 % en las categorías de uso de suelo, toxicidad humana cancerígena, escasez de recursos minerales y eutrofización marina, todo lo anterior se atribuye a las necesidades del proceso de materiales para conformar el medio mineral, la cantidad de calor requerido para esterilizar el medio, así como para mantener el proceso a una temperatura de 30 °C por un periodo de 5 d, también puede estar relacionado con la emisión de un efluente importante a la planta de tratamiento de aguas residuales.

Para tratar de visualizar las categorías de impacto más afectadas se llevó a cabo la normalización de los datos.

Notablemente las categorías con mayor impacto normalizado son las correspondientes a ecotoxicidad y toxicidad, como lo muestra la Figura 3, es evidente que la etapa Z es la que representa la mayor proporción de efecto sobre estas categorías.

Emerge en la parte inferior impactos modestos en la categoría de acidificación terrestre, en este sentido la etapa M es la que representa la mayor parte de este efecto. Esto posiblemente está relacionado con las subetapas de purificación de metano (que emite CO₂ y H₂S) y cogeneración de calor y energía eléctrica a partir del metano purificado.

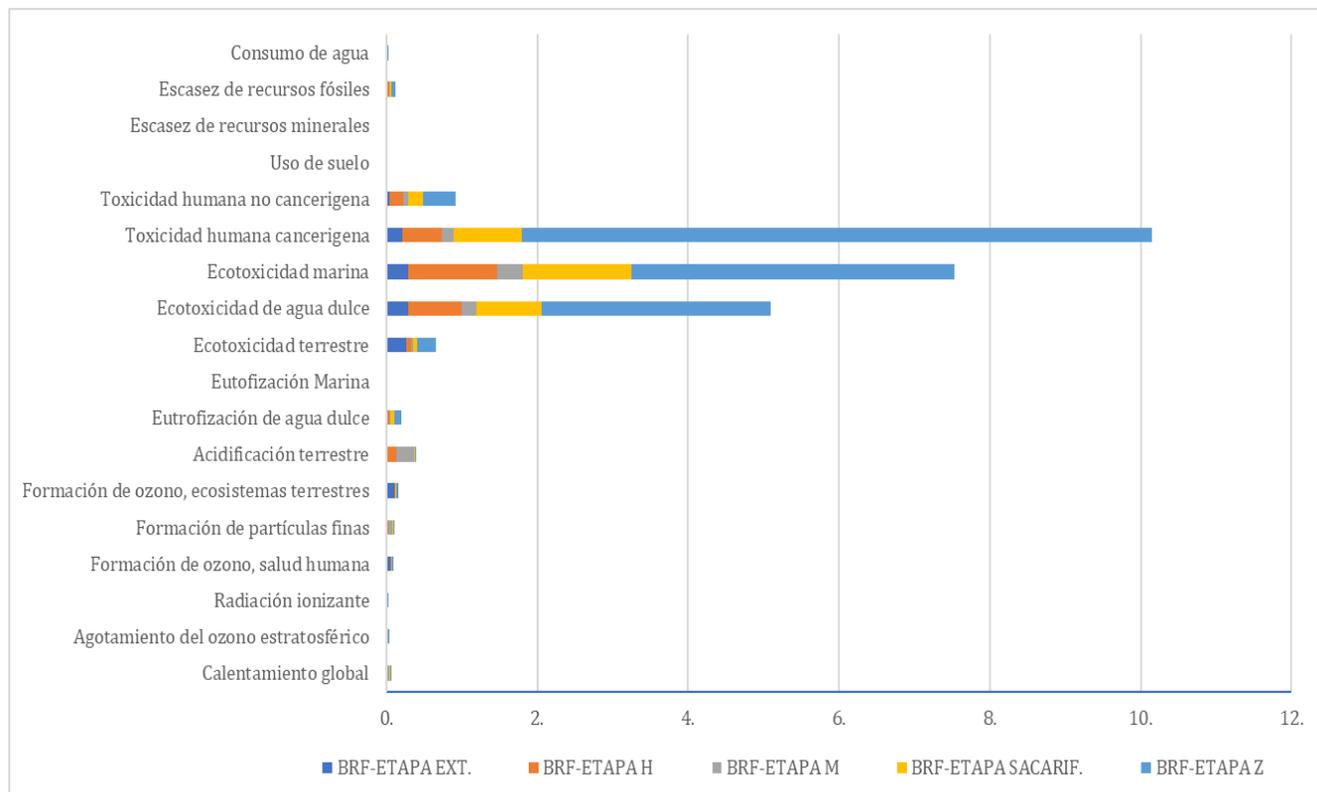


Figura 3. Tendencias de los efectos normalizados en puntos medios de las etapas de la BRF H-M-Z-S sobre las categorías de impactos.

Conclusiones

Se encontró que el uso de carbón activado en la detoxificación de los HL de la sacarificación contribuyó notablemente a los impactos ambientales. A su vez, esos impactos se relacionaron también con la minería de carbón y su procesamiento para convertirlo en carbón activado. Desde el punto de vista energético global, la biorrefinería resultó deficitaria en carga térmica y productora neta de energía eléctrica.

Se encontró que la etapa Z de la BRF tiene una mayor contribución en 11 de las 18 categorías de impacto por lo que se sigue una evaluación exhaustiva de la etapa para identificar si los productos obtenidos compensan el impacto de esta etapa en la BRF global.

Agradecimientos

Agradecimiento a los patrocinadores, o colaboradores que ayudaron en la investigación.

Referencias

- ISO (2006a). Organizacion Internacional de Normalizacion, 2006. ISO 14044: Environmental Management, Life Cycle Assessment, Requirements and Guidelines.
- ISO (2006b). Organizacion Internacional de Normalizacion ISO-norm, I.S.O., 2006. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework ISO 14040: 2006. ISO, Geneva, Switzerland.
- Escamilla-Alvarado C., Poggi-Varaldo H.M., Ponce-Noyola M.T. (2017). Bioenergy and bioproducts from municipal organic waste as alternative to landfilling: a comparative life cycle assessment with 14 prospective application to Mexico. *Environ. Sci. Pollution Res.* 24 (33): 25602–25617
- Escamilla-Alvarado C., Poggi-Varaldo H.M., Ponce-Noyola M.T. (2013 a). Use of organic waste for the 16 production of added-value holocellulases with *Cellulomonas flavigena* PR-22 and *Trichoderma reesei* MCG 80. *Waste Manage Res* 31 (8): 849-858 18
- Escamilla-Alvarado C., Poggi-Varaldo H.M., Ponce-Noyola T., Ríos-Leal, E., Robles-Gonzalez, I., Rinderknecht-Seijas, N. (2015). Saccharification of fermented residues as integral part in a 20 conceptual hydrogen-producing biorefinery. *I. J. of Hydrogen Energy* 40:17200-17211. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.164>. 22
- Escamilla-Alvarado C., Ponce-Noyola M.T., Poggi-Varaldo H.M., Ríos-Leal E., García-Mena J., Rinderknecht-Seijas N. (2014). Energy analysis of in-series biohydrogen and methane 24 production from organic wastes. *International Journal of Hydrogen Energy* 39(29): 16587-16594.
- Escamilla-Alvarado, C., Ponce-Noyola, M.T., Ríos-Leal, E., Poggi-Varaldo, H.M. (2013 b) A multivariable 26 evaluation of biohydrogen production by solid substrate fermentation of organic municipal wastes in semi-continuous and batch operation. ,(28): 12527-28 12538. ISSN: 0360-3199
- Escamilla-Alvarado, C., Ríos-Leal, E., Ponce-Noyola, M.T., Poggi-Varaldo, H.M. (2012). Gas biofuels 30 from solid substrate hydrogenogenic-methanogenic fermentation of the organic fraction of municipal solid waste. *Process Biochemistry* 47: 1572–1587 32
- Fava F., Totaro G., Diels L., Reis M., Duarte J., Carioca O.B., Poggi-Varaldo, H.M. Ferreira B.S. (2015). Biowaste biorefinery in Europe: opportunities and research & development needs. *New 34 Biotechnology* 32 (1): 100-108. DOI 10.1016/j.nbt.2013.11.003
- Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J., Elshout P.M.F., Verones F., Vieira M.D.M., Hollander A., Zijp M., Zelm., Stam G., (2017). ReCiPe 2016-A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization RIVM Report 2016-0104. National Institute for 38 Public Health and the Environment P.O. Box 1 | 3720 BA Bilthoven the Netherlands www.rivm.nl/en
- PRé various authors (2019). SimaPro Database Manual Methods Library. *Report v 4.14.2*, PRé 40 Sustainability, Amersfoort, The Netherlands.
- Poggi-Varaldo H.M., Munoz-Paez K.M., Escamilla-Alvarado C., Robledo-Narváez P.N., Ponce-Noyola 42 M.T., Calva-Calva G., Ríos-Leal E., Galíndez-Mayer J., Estrada-Vázquez C., Ortega-Clemente A., Rinderknecht-Seijas N.F. (2014). Biohydrogen, biomethane and bioelectricity as crucial components 44 of biorefinery of organic wastes: A review. *Waste Management & Research* 34 (1): 1–13.
- Rojas-Rejón O.A., Poggi-Varaldo H.M., Cristiani-Urbina E., Alfredo Martínez A., Ramos-46 Valdivia C., Torre M., Ponce-Noyola T. (2016). Enzymatic saccharification of sugar cane bagasse by continuous xylanase and cellulase production from *Cellulomonas flavigena* PR-22. 48 *Biotechnol Progress* DOI 10.1002/btpr.2213