

Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos

Huella de Carbono en Acapulco, México

Yuridia A. Salmerón-Gallardo¹, René Bernardo Elías Cabrera-Cruz², Ana L. Juárez-López¹,
María L. Sampedro-Rosas¹, José L. Rosas-Acevedo¹ y Julio C. Rolón-Aguilar²

Unidad Académica de Ciencias de Desarrollo Regional¹, División de Estudios de Posgrado e Investigación²
Universidad Autónoma de Guerrero¹, Universidad Autónoma de Tamaulipas²
Acapulco de Juárez, Gro.¹, Tampico, Tamps.²; México
rcabreracruz@docentes.uat.edu.mx

Abstract— The carbon footprint in the solid waste management was determined through the tool for calculating greenhouse gas emissions using the life cycle analysis method. The study area is located in the Status Quo, 94% of the waste is deposited in landfills, wild dumps, burned outdoors and deposited in a dispersed way. Annually are generated 378.93 Gg of carbon dioxide equivalent, nationally representing 0.85% of emissions from the waste sector. The data obtained provide local information for the application of mitigation strategies in order to promote the transition towards sustainable management.

Keyword— Greenhouse gases, carbon footprint, solid waste management, landfills.

Resumen— Se determinó la huella de carbono en el manejo de los residuos sólidos urbanos a través de la herramienta para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero mediante el método de análisis de ciclo de vida. El área de estudio se sitúa en el *Status Quo*, el 94% de los residuos son depositados en vertederos, tiraderos silvestres, quemados al aire libre y depositados de manera dispersa. Anualmente se generan 378.93 Gg de dióxido de carbono equivalente, a nivel nacional representa el 0.85% de las emisiones del sector de los desechos. Los datos obtenidos aportan información local para la aplicación de estrategias de mitigación a fin de promover la transición hacia la gestión sustentable.

Palabras claves— Gases de efecto invernadero, huella de carbono, manejo de residuos sólidos, vertederos.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población, la creciente urbanización y el desarrollo socioeconómico representan un desafío para los países en vías de desarrollo, debido a las características de los municipios en los que el manejo de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se lleva a cabo. En la actualidad, la generación total de residuos a nivel mundial es de 17 millones de toneladas anuales, para el 2050 se estima que llegará a 27 millones de toneladas; de esta cantidad, 1.3 millones de toneladas son RSU y para el 2015 las proyecciones indican que se generarán hasta 2.2 millones de toneladas [1]. Entre 1990 y 2005, las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) globales generadas por RSU depositados en vertederos, aumentaron en aproximadamente 12%. Actualmente las emisiones de Metano (CH₄) ocupan el quinto lugar entre todas las fuentes de Dióxido de Carbono equivalente (CO_{2-eq}), siendo una fuente de contaminación y afectación económica, social y ambiental [2]. Las emisiones aportadas por el biogás que se produce durante la descomposición de RSU en los vertederos, contienen Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄) y Óxido Nitroso (N₂O), contaminantes que generan una problemática al ambiente y bienestar público, intensificado de esta manera las concentraciones de GEI en la atmósfera y contribuyendo al efecto invernadero natural a través de emisiones antropogénicas que aportan al cambio climático [3].

En todas las etapas del manejo de RSU (generación, recolección, transporte, compostaje, y disposición) se producen emisiones; a nivel global, el manejo de RSU y el manejo de aguas residuales representan el 2.7% de las emisiones, siendo altamente relevantes por el alto porcentaje de componentes biodegradables [4]. La Huella de Carbono (HdC) calcula las emisiones de GEI a la atmósfera de manera directa e indirecta, teniendo en cuenta todas las fuentes dentro de un sistema espacial y temporal, se diseña como una herramienta de mitigación que obedece a preocupaciones de desarrollo social, económico y ambiental que ayuda en la toma de decisiones y el análisis de políticas para dar seguimiento a los impactos del cambio climático [5]. La Asociación Internacional de Residuos Sólidos plantea el uso de métodos indirectos, para desarrollar y garantizar la aplicación de instrumentos de política ambiental con la finalidad de cumplir objetivos y metas ambientales en el manejo de RSU [6]. Existen diversos métodos para la determinación de GEI, los métodos directos se consideran más aceptables; sin embargo, requieren monitoreo y mediciones *in situ*, las dificultades se centran en los altos costos que representan, la inseguridad para acceder a los puntos de muestreo y la necesidad de infraestructura física, técnica y de recursos humanos especializados. Los métodos indirectos para la estimación de GEI en términos de la HdC se realizan mediante el enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) basados en factores de emisión, cálculos de ingeniería y modelos matemáticos para obtener datos aceptables que ayuden en la formulación, aplicación, evaluación de estrategias y medidas de política ambiental para promover la gestión sustentable de RSU.

A nivel nacional, las emisiones de CH₄ incrementaron 59.8% en 2010 con respecto a 1990, las principales fuentes de emisión corresponden a las categorías de desechos, energía y agricultura. En la categoría de desechos las emisiones incrementaron de manera significativa como consecuencia del manejo y disposición de RSU en Sitios de Disposición Final (SDF). Desde el punto de vista normativo los SDF se clasifican en controlados y no controlados [7], aunque en ambos casos ocasionan impactos y afectaciones sobre el agua, aire, suelo y vegetación así como daños a la salud pública [3]. El cálculo de las emisiones de GEI surge como una necesidad ante el incremento de generación de RSU y SDF no controlados. En lugares que presentan un índice de desarrollo humano bajo, como el estado de Guerrero, no existen inventarios de emisiones por lo que resulta relevante determinar el impacto potencial de efecto invernadero en el manejo de los RSU mediante métodos indirectos para la determinación de la HdC. En este trabajo se considera el municipio de Acapulco de Juárez porque es la mayor ciudad de Guerrero, la única zona metropolitana del estado y uno de los principales destinos turísticos de México [8]. En una primera parte, se determina la HdC a través de la herramienta de cálculo para las emisiones de GEI en el manejo de los RSU como segmento del diagnóstico de gases de efecto invernadero. En una segunda parte, se estima el potencial de generación y reducción de emisiones a través de la captura de biogás como medida de mitigación de GEI. Este trabajo permitirá hacerlo extensivo a los demás municipios del estado de Guerrero para aportar elementos que permitan fortalecer la política estatal en materia de RSU y mitigación ante el cambio climático.

II. METODOLOGÍA

Se utilizó la herramienta MRS-GEI para el cálculo de las emisiones de GEI en el manejo de RSU, desarrollada en el año 2009 con fondos del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania. La herramienta se basa en Excel como una hoja de cálculo en la que se cuantifican las emisiones totales de GEI en toneladas anuales de CO₂-eq. En la Figura 1, se presenta el diagrama de flujo para el cálculo de las emisiones en el manejo de los RSU y en adelante se describen las etapas metodológicas del proceso.

A. Cantidad, composición, reciclaje y disposición de RSU

En la primera etapa metodológica se insertaron datos de entrada sobre cantidad, composición y características de los residuos en las hojas de trabajo de la herramienta MRS-GEI. La generación de RSU se estimó mediante el número de población total del municipio [8] y a través del índice de generación per cápita del estado, el cual contempla el ingreso, educación y actividad productiva [9]. Los porcentajes de residuos reciclados como vidrio, papel, cartón, plásticos, metales, aluminio, textiles y residuos orgánicos así como el tipo de disposición de los residuos restantes, se obtuvieron de las tasas de reciclaje incluidas en el diagnóstico básico para la gestión integral de residuos [10].

B. Cálculo de la huella de carbono

En la segunda etapa metodológica, se definieron valores por *default* recomendados por el IPCC [11] y el IFEU para el cálculo de las emisiones de GEI en países en vías de desarrollo [12]. El cálculo se basa en la estimación de residuos per cápita en kilogramos por día (kg/cap/día) y la generación total de RSU en toneladas anuales (ton/año) en combinación con el número de habitantes calculado para 365 días como factor de conversión. En la Tabla I, se muestra la información para la composición de RSU y los porcentajes de residuos húmedos para Economías de Bajos Ingresos (EBI). Las características de los residuos que se generan en el municipio, se puntualizan siguiendo la regla general del contenido de agua: inferior al 40% (bajo) y superior al 40% (alto).

Tabla I. Valores por *default* para la composición de los RSU y contenido de carbono para EBI.

<i>Componentes</i>	<i>Default EBI</i>	<i>Carbono total % de residuos húmedos</i>
Residuos de comida	41.9%	15.2%
Residuos de jardines y parques	14.0%	19.6%
Papel, cartón	9.3%	41.4%
Plásticos	6.5%	75.0%
Vidrio	1.9%	0%
Metales ferrosos	1.9%	0%
Aluminio	0.5%	0%
Textiles	3.3%	40.0%
Hule, piel	1.9%	56.3%
Pañales	4.0%	28.0%
Madera	6.0%	42.5%
Residuos minerales	3.0%	0.0%
Otros	5.8%	2.7%

La Tabla II, contiene el valor calorífico en Megajoule por Kilogramo (MJ/Kg) basado en la composición y la indicación del contenido de agua de los residuos que se generan en el área de estudio. El contenido de agua alto se considera para la fracción orgánica y la fracción no especificada (otros), porque estas dos fracciones suelen ser las que más varían en el contenido de agua. Otras fracciones de residuos como papel/cartón, plásticos, vidrio, metales y textiles suelen tener un contenido de agua relativamente estable y se pueden especificar con un valor calorífico fijo. El factor de emisión que se utiliza para la estimación de la huella de carbono se selecciona por *default* para la red eléctrica del país, en relación a la importancia de las emisiones de metano de los SDF y las futuras emisiones generadas durante la degradación de los RSU, este factor de emisión es igual a 607 g CO₂-eq/kWh.

Tabla II. Valor calorífico de fracciones de residuos.

<i>Fracción</i>	<i>Valor Calorífico MJ/Kg residuos húmedos</i>
Residuos orgánicos, bajo contenido de agua	4
Residuos orgánicos, alto contenido de agua	2
Papel	11.5
Plásticos	31.5
Vidrio	0.0
Metales	0.0
Textiles, hule, piel	14.6
Madera	15.0
Residuos minerales	0.0
Otros bajo contenido de agua	8.4
Otros alto contenido de agua	5.0

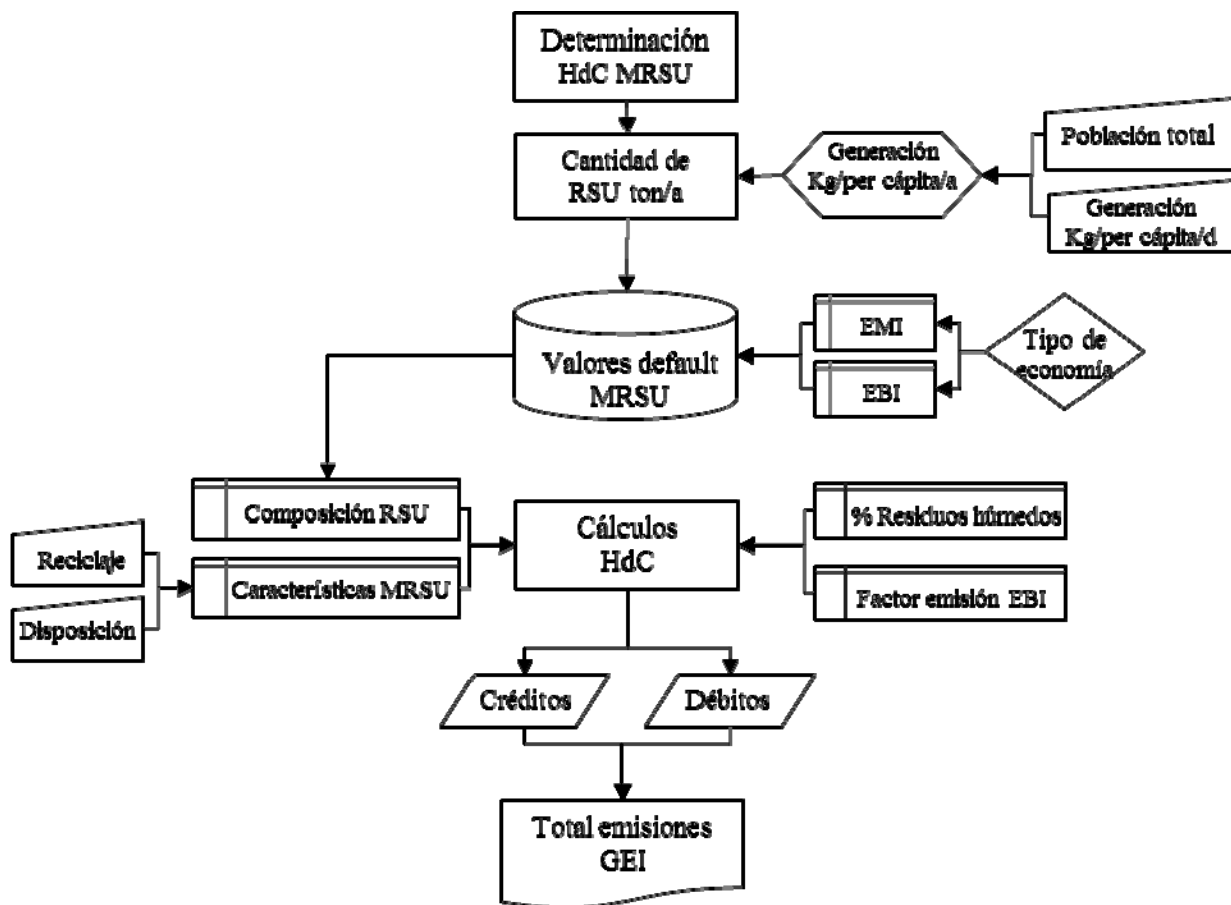


Fig. 1. Proceso metodológico para la determinación de la huella de carbono en el manejo de RSU.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El municipio de Acapulco de Juárez; Guerrero, México se localiza al sur del país, entre los paralelos 16° 41' 05'' y 17° 11' 37'' de latitud norte y meridianos 99° 30' 00'', y 99° 59' 49'' de longitud oeste. En la Figura 1, se muestra el área rural, el área urbana y el SDF controlado; el municipio está integrado por 234 localidades, 14 de las cuales (incluyendo la cabecera municipal) superan los 2,000 habitantes en una extensión territorial de 1,882.6 km², lo que representa el 2.95% de la superficie estatal total [8].

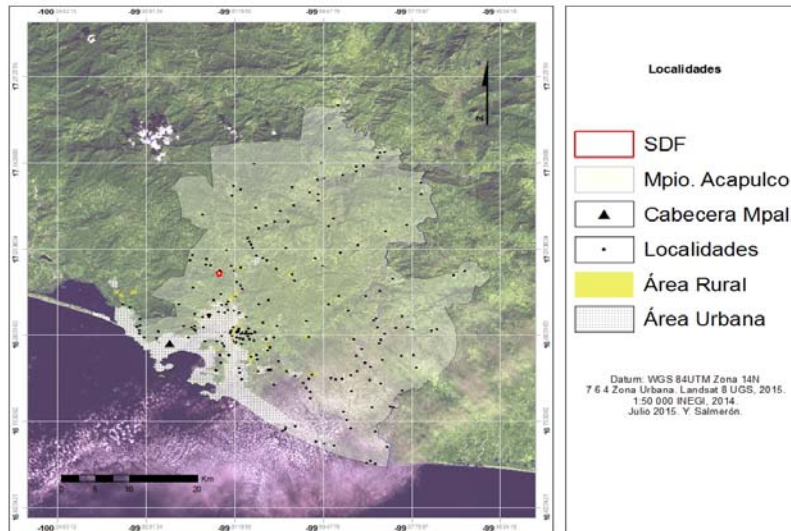


Fig. 2. Ubicación geográfica del municipio de Acapulco de Juárez; Gro., México.

Los resultados obtenidos con la herramienta MRS-GEI describen el escenario actual (*Status Quo*). En la Figura 2, se observa un manejo inadecuado de RSU; el reciclaje se realiza por el sector informal sin condiciones sanitarias. Existen colonias y localidades sin cobertura de servicios de recolección que depositan los residuos en tiraderos no administrados, en condiciones anaerobias produciendo metano, y en pequeños montones, en condiciones aeróbicas produciendo dióxido de carbono. Los residuos dispersos se queman produciendo contaminación atmosférica extrema.



Fig. 3. Condición actual en el SDF de Acapulco de Juárez; Gro., México.

A. Cantidad, composición y características de los RSU

En la Tabla III, se presenta la tasa específica de generación de RSU (1.10 kg/Per cápita/día). Se estima que la generación diaria es de 869 toneladas y 317,173 toneladas anuales, siendo el municipio con mayor generación de RSU en el estado de Guerrero, debido al índice de generación per cápita, el cual se basa en el número de habitantes, ingreso, educación y actividad económica según datos del Programa de Prevención y Gestión de Residuos del Estado de Guerrero [9].

Tabla III. Tasa específica de generación de residuos sólidos urbanos en Acapulco, Guerrero.

<i>Número de habitantes</i>	<i>Kg/Per cápita/día</i>	<i>Kg/Per cápita/año</i>	<i>Toneladas/día</i>	<i>Toneladas/año</i>
789, 971	1.10	402	869	317, 173

En la Tabla IV, se presenta la composición de residuos y el porcentaje de peso húmedo con valores por *default* para EBI. La composición de RSU, incluye residuos de comida durante la preparación y después del consumo; plásticos como el Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Polietileno Tereftalato (PET), Poliestireno (PS) y Cloruro de Polivinilo (PVC); el aluminio es el único metal no ferroso que se considera por separado, y en la clasificación de “otros” se contemplan las fracciones de residuos como chatarra electrónica, cadáveres y huesos. El 64.6% de los residuos que se generan en el municipio son orgánicos, asumen propiedades físicas de 63% fósil y 27% renovable con valor calorífico de 6.8 MJ/kg, un contenido total de carbono de 24.1% y un porcentaje de humedad superior al 40%.

Tabla IV. Composición de los RSU y porcentaje de peso húmedo para EBI.

<i>Componentes</i>	<i>Valores EBI</i>	<i>% Residuos húmedos</i>
Residuos de comida	55.4%	41.9%
Residuos de jardines y parques	9.2%	14.0%
Papel, cartón	3.7%	9.3%
Plásticos	2.8%	6.5%
Vidrio	1.2%	1.9%
Metales ferrosos	1.4%	1.9%
Aluminio	0.2%	0.5%
Textiles	1.4%	3.3%
Hule, piel	1.4%	1.9%
Pañales desechables	0%	4.0%
Madera	3.5%	6.0%
Residuos minerales	6.0%	3.0%
Otros	13.8%	5.8%
Total	100.0%	100.00%

Hermann, B. G., Debeer, L., Wilde, B., Blok, K. y Patel, M. K. [4], señalan el compostaje doméstico como la mejor opción de tratamiento de residuos orgánicos ya que se tiene el beneficio adicional de producir un acondicionador de suelos; además, la temperatura natural que se utiliza en el hogar para realizar el compostaje tiene un gran efecto sobre la reducción de CH₄ y N₂O; por tal razón, el compostaje doméstico tiene mayor crédito en términos de reducción de la HdC. Por otra parte, Eriksson, M., Strid, I. y Hansson, P. A., [13], señalan que los vertederos son la peor opción para el tratamiento de los residuos orgánicos y sugieren que la incineración con recuperación de energía es la mejor opción para el manejo de residuos con alto porcentaje de humedad como en el caso de los residuos que se generan en el área de estudio.

B. Reciclaje y disposición final de residuos

En la Figura 4, se presenta la situación actual del manejo de los RSU en el municipio de Acapulco de Juárez. Anualmente se generan 317,173 toneladas de RSU, el 6% de los residuos generados (19,728 ton/a) se reciclan por el sector informal. Los materiales que se reciclan en mayor porcentaje son: papel y cartón (45%), plásticos (31%), metales ferrosos (12%), textiles (5%), vidrio (3%) y aluminio (3%). El 94% (297,445 ton/a) de los residuos son depositados bajo prácticas deficientes. El 60% (178,467 ton/a) se deposita en el SDF controlado del municipio; el 20% correspondiente al porcentaje que se dispone (59,489 ton/a) se sitúa en tiraderos silvestres, el 10% (29,745 ton/a) se queman al aire libre y el 10% (29,745 ton/a) se deposita de manera dispersa.

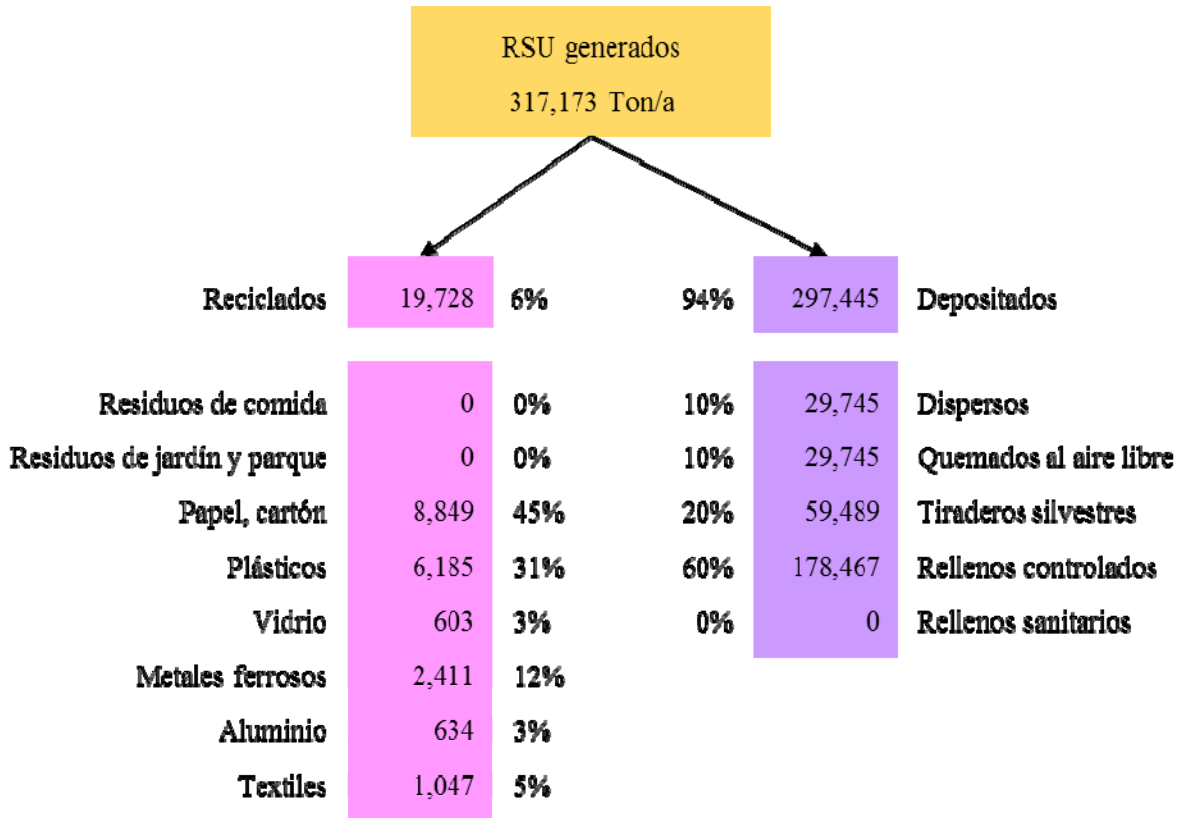


Fig. 4. Reciclaje y disposición de los RSU que se generan en Acapulco de Juárez; Gro., México (*Status Quo*).

Fitzgerald, G. C., Krones, J. S. y Themelis N. J. [14], señalan que el impacto ambiental ocasionado por las emisiones asociadas a la industria del reciclaje, desde una perspectiva holística sobre la base de tonelaje y el tipo de material reciclado, el combustible y la electricidad consumida en las actividades de recolección y separación, es poco significativo en comparación con las emisiones evitadas por el consumo de materia prima. Cifrian, E., Galan, B., Andres, A. y Viguri, J. R. (2012) [5], sugieren el uso de indicadores individuales para las tasas de reciclaje de fracciones separadas y la implementación de plantas de incineración para disminuir la cantidad de residuos biodegradables en los vertederos, lo cual favorecería una reducción de la HdC de entre 9% y 79%. En los estados y municipios como Acapulco, Guerrero, se debe promover el reciclaje a través de instalaciones de recuperación de materiales mediante el reciclaje de flujo único, considerando que la eliminación de residuos mezclados es más cara que el tratamiento en el que los residuos se almacenan por separado según el tipo y naturaleza donde el aprovechamiento de materias primas reciclables puede ser de hasta 50%.

En la Tabla V, se presentan las estimaciones de GEI expresadas en cargos, créditos, y resultados netos para las actividades de reciclaje, disposición, y la suma de estas actividades como el total de RSU. Los cargos, son las emisiones que se originan durante la disposición de los RSU y durante el proceso de producción de los residuos reciclados. La fracción de residuos reciclados por el sector informal (6%) genera 8,459 ton/a CO_{2-eq}, una vez que ingresa al procedimiento de transformación como materia prima reciclable. El depósito de residuos en el SDF controlado, en tiraderos silvestres, dispersos y quemados al aire libre generan 403,908 ton/a CO_{2-eq}; esto representa un total de cargos de 412,367 ton/a CO_{2-eq}. Los créditos (-33,437 ton/a CO_{2-eq}) se presentan en números negativos porque son emisiones evitadas por el 6% de residuos reciclados; la disposición de RSU, no proporciona créditos debido a las prácticas bajo las cuales se realiza el manejo de RSU en el municipio. Los cargos por los residuos reciclados (8,459 ton/a CO_{2-eq}), menos los créditos por las emisiones evitadas (-33,437 ton/a CO_{2-eq}) generan un resultado neto de -24,978 ton/a CO_{2-eq}. El resultado neto derivado de los residuos reciclados (-24,978 ton/a CO_{2-eq}) menos el resultado neto de las actividades de disposición final (403,908 ton/a CO_{2-eq}), totalizan las emisiones de GEI en 378,930 ton/a CO_{2-eq} (378.93 Gg).

Tabla V. Emisiones de GEI en cargos, créditos y resultados netos (*Status Quo*).

	<i>Residuos reciclados</i> ton/a CO _{2-eq}	<i>Disposición final</i> ton/a CO _{2-eq}	<i>Total RSU</i> ton/a CO _{2-eq}	<i>Descripción</i>
Cargos	8,459	403,908	412,367	Emisiones generadas por la disposición
Créditos	-33,437	0	-33,437	Emisiones evitadas por el reciclaje
Resultado Neto	-24,978	403,908	378,930	Emisiones de GEI en términos de HdC

En la Figura 5, se muestra un gráfico con el balance de emisiones. Los cargos (color azul) son las emisiones de GEI causadas por el 6% de los residuos que se reciclan al ingresar al proceso de producción y por el 94% de los residuos que se depositan en el SDF controlado, en tiraderos silvestres, dispersos y quemados al aire libre. Los créditos en valores negativos (color naranja) representan el ahorro de emisiones por la materia prima evitada durante el reciclaje; la diferencia entre los débitos y los créditos representan el resultado neto de emisiones generadas por el manejo de los RSU en el municipio.

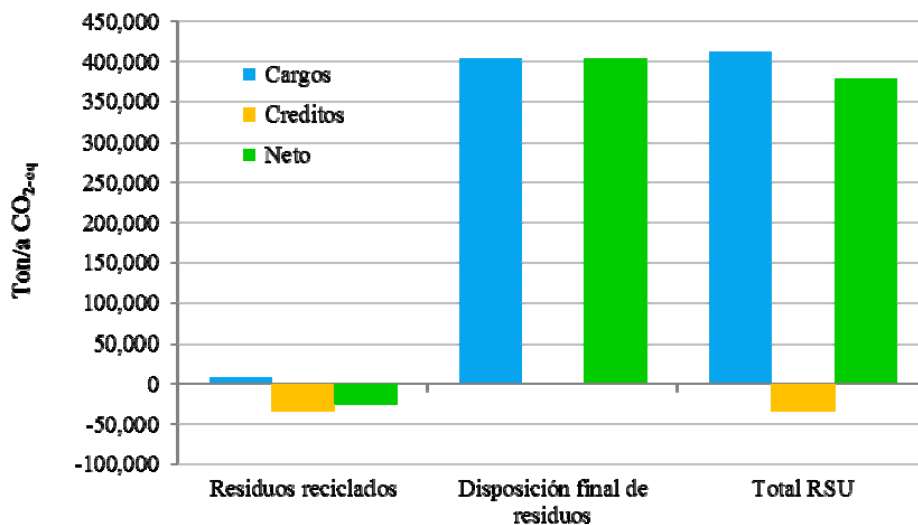


Fig. 5. Balance de emisiones de GEI en el reciclaje, disposición final y total de RSU (*Status Quo*).

A nivel nacional la categoría de energía genera 503,817 Gg CO_{2-eq} (67.3%); el sector de agricultura, 92,184 Gg CO_{2-eq} (12.3%); los procesos industriales, 61,226 Gg CO_{2-eq} (8.2%); el uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura, 46,892 Gg CO_{2-eq} (6.3%) y desechos, 44,130 Gg CO_{2-eq} (5.9%) [2]. Valdez, M. E., Orozco, M. E., Romero-Salazar, L. y Aguilar, C. [15], calculan las emisiones de metano y óxido nitroso de los residuos agrícolas, y concluyen que las emisiones de N₂O se deben a la quema y aplicación de fertilizantes sintéticos. Saldaña-Munive, J. A., Lozada-Carrera, A., Valera-Pérez, M. Á. y Otazo-Sánchez, E. M. [16], determinan las emisiones de N₂O en municipios del estado de Puebla, en ambos estudios se concluye que la quema de residuos agrícolas y el manejo del estiércol del ganado son fuentes importantes de GEI en la agricultura (0.182 Gg CO_{2-eq}); por lo tanto, las medidas de mitigación deben dirigirse a la reducción de aplicación de fertilizantes y a la búsqueda de alternativas sustentables de producción debido a que la agricultura es la segunda categoría de contribución de GEI en el país.

La categoría de desechos representa el 5.9% (44,130 Gg) de las emisiones de GEI en términos de CO_{2-eq}. Investigaciones desarrolladas en la Universidad Tecnológica de Salamanca por Vargas, O., Alvarado, E., López, C. y Cisneros, V. [17], señalan la necesidad de implementar programas de gestión de RSU en las instituciones educativas mediante propuestas de acciones específicas para la reducción de la HdC, teniendo como parte de los elementos esenciales la formación de comités para la ejecución de campañas de difusión a través de la educación ambiental. Arellano-Wences, H. J., Sampedro-Rosas, M. L., Cabrera-Cruz, R. B. E. y Juárez-López, A. L. [18], también mencionan la importancia de realizar programas de mitigación para la reducción de la HdC en las universidades, luego del estudio realizado en 2015 en el que estimaron las emisiones de GEI en Unidades Académicas de la Zona Sur de la Universidad Autónoma de Guerrero, reportando 15,987 t/a CO_{2-eq} (15.987 Gg CO_{2-eq}); este resultado representa el 4.21% en relación a la HdC que se estima para el municipio de Acapulco, Guerrero (378.93 Gg CO_{2-eq}). Los cálculos para la determinación de la HdC del municipio se realizaron con un factor de emisión de GEI específico de México para la producción de electricidad (607 g CO_{2-eq}/kWh); el resultado obtenido representa el 0.85% de las emisiones del sector de los desechos a nivel nacional y está fuertemente determinado por la generación de CH₄ en el SDF de Acapulco, Guerrero. Woon, K. S. y Lo, I. M. C. (2013) [19], indican que la generación de metano en los SDF constituye una amenaza y una oportunidad en función del manejo de los RSU que se lleve a cabo, proponen la reducción del CH₄ a través de la electricidad, generada a partir de sistemas de recuperación de biogás como una medida que ha de adoptarse para hacer frente a las emisiones.

Otra medida de mitigación se propone por Cifrian, E., Galan, B., Andres, A. y Viguri, J. R. [5] a través de la medición de la HdC en el reciclaje; mediante estimaciones realizadas durante los años 2005 al 2010 en Cantabria, España reportaron cargos de 74,443 t/a CO_{2-eq} en 2005 a 67,697 t/a de CO_{2-eq} en 2010 y créditos de -179,527 CO_{2-eq} en 2005 a -310,566 t/a de CO_{2-eq} en 2010, concluyendo que el mayor ahorro de emisiones de GEI proviene del incremento en las tasas de reciclaje. Fitzgerald, G. C., Krones, J. S. y Themelis N. J. [14], proyectan un ahorro de 710 kg CO_{2-eq} por tonelada de residuos reciclados debido al consumo de materiales vírgenes evitados. Las estimaciones de la HdC para el municipio de Acapulco arrojan cargos de 8,459 ton/a CO_{2-eq} y créditos de -24,978 ton/a CO_{2-eq} por el consumo de materia prima evitada procedente del 6% (19,728 ton/a) de residuos que se reciclan por el sector informal, esto indica que el reciclaje se presenta como una oportunidad de reducción de GEI para el área de estudio. Sánchez-Santillán, N., Lanza-Espino, G., Garduño, R. y Sánchez-Trejo, R. [20], afirman que la influencia antropogénica en el comportamiento del clima ocasiona un grave impacto por el cambio en el uso del suelo; por consiguiente, surge la necesidad de realizar estimaciones que brinden información confiable ante el incesante aumento de generación de RSU en el estado de Guerrero con la finalidad de plantear estrategias de mitigación y adaptación ante el cambio climático.

IV. CONCLUSIONES

Se estimó una generación diaria de 869 toneladas de RSU y una generación de 317,173 toneladas anuales de residuos con una tasa específica de generación per cápita de 1.10 kg/día, siendo el municipio de Acapulco de Juárez el mayor generador de RSU en el estado de Guerrero, debido al número de habitantes y a la actividad económica del lugar. El 6% de los residuos que generados son reciclados por el sector informal, principalmente papel y cartón, plásticos, metales ferrosos, textiles, vidrio y aluminio; el 94% se deposita en el SDF controlado, en tiraderos silvestres y dadas las características del escenario actual (*Status Quo*), existen colonias y localidades que no cuentan con servicio de recolección, esto ocasiona que el 20% de los residuos sean quemados al aire libre y depositados de manera dispersa; no existe ningún tipo de tratamiento para el 64.6% de los residuos orgánicos que se generan en el municipio. Las emisiones de GEI en términos de la huella de carbono (378.93 Gg CO₂-eq), representa el 0.85% de las emisiones del sector de los desechos a nivel nacional. El resultado obtenido está fuertemente determinado por la generación de CH₄ en el SDF del municipio a causa del bajo porcentaje de residuos que son reciclados y el alto contenido de residuos orgánicos que tienen un porcentaje de humedad superior al 40%.

La composición de los RSU y la determinación de la HdC, aporta información local pertinente para las decisiones de planificación regional. Los resultados muestran el escenario actual sobre el manejo de los RSU, señalan las actividades de mayor emisión de GEI, aportan elementos que podrían fortalecer la política estatal en materia de RSU a fin de implementar acciones encaminadas a la promoción de los modelos de consumo responsables, el compostaje de residuos orgánicos y el aumento de la tasa de recuperación de materiales que propicien la reducción de la HdC y la transición hacia la gestión sustentable de RSU. La herramienta GEI-MRS se basa en valores por *default* para economías de bajos ingresos, esto podría representar una limitante ante la ausencia de información precisa; sin embargo, ante los altos costos de los métodos directos y la inseguridad para acceder a los puntos de muestreo, ofrece una aproximación cuantitativa confiable que brinda una línea base para futuras investigaciones haciendo extensiva la metodología para evaluar la situación actual de los municipios del estado de Guerrero.

RECONOCIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de estudios de doctorado con número de registro 333627. A la División de Estudios de Posgrado e Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil “Arturo Narro Siller” de la Universidad Autónoma de Tamaulipas por el acceso a las bases de datos internacionales durante la estancia de movilidad nacional.

REFERENCIAS

- [1] T. Karak, P. Bhattacharyya, T. Das, R. K. Paul, and R. Bezbaruah, “Non-segregated municipal solid waste in an open dumping ground: a potential contaminant in relation to environmental health,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 10, pp. 503–518, 2013.
- [2] INECC, *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2010, p. 53.
- [3] G. Tchobanoglous and F. Kreith, *Handbook of solid waste management*, 2^o ed. New York, U. S. A.: McGraw-Hill, 2002, p. 820.
- [4] B. G. Hermann, L. Debeer, B. De Wilde, K. Blok, and M. K. Patel, “To compost or not to compost: Carbon and energy footprints of biodegradable materials’ waste treatment,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 96, no. 6, pp. 1159–1171, Jun. 2011.

- [5] E. Cifrian, B. Galan, A. Andres, and J. R. Viguri, "Material flow indicators and carbon footprint for MSW management systems: Analysis and application at regional level, Cantabria, Spain," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 68, pp. 54–66, Nov. 2012.
- [6] ISWA, "Waste and climate change," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 68, 2012.
- [7] SEMARNAT, "Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos." Secretaría de Medio Ambiente Y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación., 2004.
- [8] INEGI, "Indicadores Principales del Banco de Información," Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2010. [Online]. Available: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=12>. [Accessed: 07-Aug-2016].
- [9] SEMAREN, Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos de Guerrero. Guerrero, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2009, p. 43.
- [10] SEMARNAT, "Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos," Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012. [Online]. Available: <http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcnica/diagnosticobasico2012.pdf>. [Accessed: 08-May-2016].
- [11] IPCC, "Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero; Volumen 5: Desechos," Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2006. [Online]. Available: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol5.html>. [Accessed: 20-Sep-2016].
- [12] IFEU, Manual de la herramienta de cálculo de gases de efecto invernadero en el manejo de residuos sólidos. Frankfurt am Main: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 2009, p. 66.
- [13] M. Eriksson, I. Strid, and P. A. Hansson, "Carbon footprint of food waste management options in the waste hierarchy – a Swedish case study," *J. Clean. Prod.*, vol. 93, pp. 115–125, Apr. 2015.
- [14] G. C. Fitzgerald, S. J. Krones, and J. N. Themelis, "Greenhouse gas impact of dual stream and single stream collection and separation of recyclables," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 69, pp. 50–56, Dec. 2012.
- [15] M. E. Valdez, M. E. Orozco, L. Romero-Salazar, and C. Aguilar, "Modelo de emisión-captura de gases de efecto invernadero en el Estado de México," *Rev. Iberoam. Ciencias*, vol. 2, no. 3, pp. 31–42, 2015.
- [16] J. A. Saldaña-Munive, A. Lozada-Carrera, M. Á. Valera-Pérez, and E. M. Otazo-Sánchez, "Emisiones de N₂O estimadas mediante la Evaluación Rápida de Fuentes de Contaminación Ambiental," *Rev. Iberoam. Ciencias*, vol. 2, no. 4, pp. 79–94, 2015.
- [17] O. Vargas, E. Alvarado, C. López, and V. Cisneros, "Plan de manejo de residuos sólidos generados en la Universidad Tecnológica de Salamanca," *Rev. Iberoam. Ciencias*, vol. 2, no. 5, pp. 83–91, 2015.
- [18] H. J. Arellano-Wences, M. L. Sampedro-Rosas, R. B. E. Cabrera-Cruz, A. L. Juárez-López, J. L. Rosas-Acevedo, and E. Cortes-Badillo, "Generación de emisiones de gases efecto invernadero en unidades académicas de la Universidad Autónoma de Guerrero," *Rev. Iberoam. Ciencias*, vol. 2, no. 7, pp. 61–67, 2015.
- [19] K. S. Woon and I. M. C. Lo, "Greenhouse gas accounting of the proposed landfill extension and advanced incineration facility for municipal solid waste management in Hong Kong," *Sci. Total Environ.*, vol. 458–460, pp. 499–507, Aug. 2013.
- [20] N. Sánchez-Santillán, G. Lanza-Espino, R. Garduño, and R. Sánchez-Trejo, "La influencia antropogénica en el Cambio Climático bajo la óptica de los Sistemas Complejos," *Rev. Iberoam. Ciencias*, vol. 2, no. 6, pp. 69–84, 2015.