

# Evaluación y Selección de una Tecnología para el tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales en la ciudad de Arequipa -2020

Ruben A. Matheos Herrera, Magister<sup>1</sup>, Nancy I. Orihuela Ordoñez, Magister<sup>2</sup>, Olivia A. Paz Corrales<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, rmatheos@unsa.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, norihuelao@unsa.edu.pe

<sup>3</sup>Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, anyelinapazc@hotmail.com

**Abstract--** El trabajo de investigación tuvo como propósito encontrar la tecnología apropiada para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos municipales; para tal fin se analizaron los tratamientos aplicados a la fecha en la localidad, como incineración, digestión anaeróbica, compostaje, pirolisis, gasificación por plasma y relleno sanitario. Para el análisis se utilizaron las variables establecidas en el análisis Jerárquico Multicriterio, seleccionando los criterios con la matriz de impacto cruzado obteniéndose 19 ítem, agrupados en criterios técnicos, sociales, económicos y ambientales. Finalmente se calculó la importancia con la tabla de ponderación quedando con los siguientes resultados Gasificación por Plasma con 357 puntos, pirolisis 350, 329 incineración, 325 Digestión anaeróbica, 314 destinado al compostaje y la disposición final en un relleno sanitario con 285 puntos. A partir de los resultados obtenidos con las herramientas anteriores, se propone que la tecnología de Gasificación por plasma es la apropiada para el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos municipales, eliminando así el material de mayor volumen generado (58.74%), con la propuesta de destruirlos térmicamente hasta la obtención de elementos básicos.

**Keywords:** gasificación por plasma, residuo sólido orgánico municipal, tecnología

## I. INTRODUCCION

La generación de residuos sólidos en Arequipa es en promedio 709.46 ton/día de acuerdo al Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos – PIGARS 2017-2028[1] de la Municipalidad Provincial, siendo su composición: 58.74% residuos orgánicos, 16.43% potencialmente reciclables, que sumados son 75.17% residuos potencialmente reaprovechados y un 24.83% no reaprovechables, que originan la contaminación ambiental en la ciudad, causando grandes afecciones a la salud de la población por la generación de olores y la proliferación de vectores.

El presente trabajo de investigación tiene por finalidad seleccionar la tecnología adecuada para el tratamiento de residuos sólidos Municipales orgánicos, según una de las tres formas de tratamiento: Bioquímico, Térmico, en vertederos [2]-[3] (digestión anaerobia, aeróbico-anaeróbico, pila de combustible microbiana; tratamiento hidrotérmico, oxidación supercrítica del agua, oxidación de aire húmedo, pirolisis, gasificación, Incineración, co-incineración; Químico-mecánico: ultrasonificación) y a partir de la Matriz de Impacto Cruzado se determina los criterios de evaluación y la tabla de ponderación para definir la selección.

Un manejo adecuado de la basura, indica el cumplimiento de la Ley N°1278, de Gestión Integral de los residuos sólidos y evita la aplicación de multas por parte del Organismo de Evaluación y Fiscalización ambiental (OEFA). Al ser la materia orgánica la que se genera en mayor cantidad, requiere un tratamiento, para evitar que se convierta en una fuente de dióxido de carbono, de gas efecto invernadero, ocasione el deterioro del paisaje, etc. La acumulación de residuos sólidos en los vertederos ocasiona contaminación del aire por la descomposición de los materiales en forma de gases y vapores; y la contaminación del suelo por percolación de los contaminantes a través de sus horizontes. A la fecha existen en la ciudad dos plantas de tratamiento de aguas residuales, las que producen biosólidos para el mejoramiento de la calidad del suelo. La tecnología del compostaje está orientada a la producción de abono orgánico, la cual competiría con los biosólidos producido por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales-PTAR La Escalerilla – Arequipa que actualmente no se comercializa por falta de demanda.

## II. MÉTODOS PARA TRATAMIENTO DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES ORGANICOS

Para el trabajo de investigación se empleó el método deductivo porque analizando las diversas tecnologías existentes y por comparación se escoge la mejor tecnología.

La investigación es del tipo aplicado por la utilización de tecnologías ya probadas, corresponde al nivel descriptivo porque se describe propiedades y es del enfoque cuantitativo.

El diseño es no experimental porque no se controla las variables. Las tecnologías más usadas [4]-[5]-[6] para el tratamiento de residuos sólidos son:

A. *Por procesos físicos:*

1) *Relleno sanitario:* Los residuos que no se pueden reciclar y no se dispone de ningún otro mecanismo, se proceden a compactar para reducir su volumen y prolongar el tiempo de vida útil del relleno. Técnicamente está diseñado para la disposición final controlada, sin causar peligros o riesgos para la salud. Debiendo considerar para su diseño el volumen de la generación de lixiviados, la impermeabilización y el drenaje de lixiviado [7].

### *B. Por procesos biológicos:*

1) *Compostaje*: Consiste en metabolizar los compuestos orgánicos, por las deshidrogenasas y las hidrolasas, en condiciones de temperatura, humedad y oxígeno para obtener una materia que puede ser utilizada como mejorador de suelos y descomponerse en el suelo. La composición del compost depende de la materia utilizada. En este proceso se trabajan con microorganismos mesófilos y termófilos; en presencia y /o ausencia de oxígeno y los factores que afectan el proceso son:

- Temperatura que deben estar en el rango de 35-55°C; para eliminar microorganismos patógenos.
- Tamaño de las partículas debe ser reducido para facilitar la eliminación de la materia inerte.
- Humedad se requiere entre el 40-60%, con valores mayores se produce la putrefacción de la materia y con valores menores de humedad la actividad de los microorganismos disminuye.
- El pH influye en la actividad de los hongos (5-8) y para las bacterias un rango de 6-7.5.
- Movimiento de la materia permite que el compostaje sea aeróbico, la presencia del oxígeno es esencial para el desarrollo del proceso.
- Relación C/N equilibrada debe ser 25/35 pero puede variar en función de la calidad de materia prima.

Las ventajas son la reducción de la materia prima, su integración al ciclo natural como mejorador del suelo y aumenta el tiempo de vida del relleno sanitario y las desventajas son que requiere personal capacitado, el mercado para el compost es reducido, se requiere extensiones grandes de terreno y el costo de transporte es elevado [8],[18].

### *C. Por procesos térmicos:*

1) *Gasificación por plasma*: La gasificación con aporte de calor externo a alta temperatura, está orientada a la producción de combustibles gaseosos; es la transformación térmica de la materia orgánica, en atmosferas controladas con temperaturas que oscilan entre 5000 a 15000°C; mediante el uso del arco de plasma. Las ventajas de este método son: el reducido espacio que ocupa los equipos de transformación, la generación de residuos de composición elemental, que se pueden utilizar para generar energía eléctrica; logrando reducir el 90% del volumen de la basura clasificada.

El reactor propuesto se alimenta por la parte superior, las antorchas de plasma, se ubican en la parte inferior del reactor, la alta temperatura y la ausencia de oxígeno producen gases como monóxido de carbono, hidrógeno molecular, nitrógeno, cloro y azufre [9].

### *D. Por recuperación de energía:*

1) *Digestión anaeróbica*: Se presenta cuando los residuos orgánicos se tratan en reactores cerrados en ausencia de oxígeno y producen gas con un volumen del 20 al 30% del volumen del digestor por día y compost. Las ventajas son el requerimiento de espacio es menor que el empleado en el compostaje, el olor generado se reduce en un 80%, es una fuente de energía renovable, produce un abono rico en nutrientes, reduce la

emisión dióxido de carbono a la atmosfera produce un combustible de alta calidad. Las desventajas son el costo elevado de implementación y el tiempo de vida útil del biodigestor de 10 años, requiere un tratamiento de reducción de tamaño del material, el gas metano que se produce es explosivo si su concentración supera del 5-15%, es sensible a cambios de temperatura [10]

2) *Incineración*: Se realiza para reducir el volumen y cambiar la composición física del residuo sólido municipal, mediante oxidación térmica, si pretratamientos, solo debe tener una humedad máxima del 30%. Las ventajas son que puede reducir hasta el 90% del volumen y el 75% en peso, se puede recuperar energía. Las desventajas son la alta inversión, la falta de flexibilidad en el tipo de residuo a tratar.

## III. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS PARA TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES ORGÁNICOS

Respecto al tratamiento y disposición de los residuos sólidos municipales en Perú, específicamente los residuos orgánicos (que son más del 50% del total generado) no existe diversificación de tecnologías, las autoridades municipales y regionales, no cuentan con elementos suficientes para poder tomar una decisión a este respecto.

La aplicación de las tecnologías existentes no siempre es la más adecuada, ya que la eficacia del sistema y la eficiencia de su proceso, depende de ciertas características geográficas, sociales y económicas, además de las características en generación, composición y parámetros fisicoquímicos de los residuos sólidos que se generan.

En el Perú, se generan aproximadamente 19000 toneladas diarias de residuos sólidos municipales, observándose que el destino final de la basura se concentró en mayor medida en 34 rellenos sanitarios (52%) y el resto en 1585 botaderos a cielo abierto (48%). Habiéndose dispuesto 3.7 millones de toneladas de residuos sólidos en rellenos sanitarios en el 2017 [11] Tomando en cuenta que en lugares donde existe un amplio territorio, baja densidad de población y bajo nivel de ingresos, predomina el uso de botaderos; mientras en lugares con escaso territorio, alta densidad de población y alto nivel de ingresos, predomina el relleno sanitario. Podemos ver que el nivel de tratamiento está relacionado con el nivel económico, mientras el método de tratamiento está ligado a las características geográficas, sociales y de generación de residuos sólidos.

Además, los costos de inversión inicial como los de operación y mantenimiento muestran una alta variabilidad según el país, debido a:

- Tipo de tecnología usada en la planta.
- Ubicación y capacidad de la planta.
- Costo local de la mano de obra.
- Costo de la energía y el combustible.
- Mercado local de los subproductos.

**A. Paso 1:**

Se ha identificado las posibles tecnologías de tratamiento y disposición final de los RSU [12], de las cuales se seleccionó las posibles tecnologías a ser evaluadas [4]-[5]-[6].

La metodología usada para la evaluación técnica, económica, ambiental y social de las tecnologías para el tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales[13], se basa en la aplicación de la herramienta matemática MIC (Matriz de Impacto Cruzado), mediante la cual se seleccionan los criterios de evaluación que nos permitirán establecer la tecnología apropiada para el tratamiento de los Residuos Sólidos Orgánicos Municipales y para la metodología de jerarquización se emplea el AHP(Proceso de Jerarquía Analítica) que permite determinar los pesos de los sub-criterios, que posibilita la evaluación de las tecnologías disponibles [14].

**B. Paso 2**

La siguiente tabla presenta las posibles tecnologías de solución para Arequipa, exceptuando las que se encuentran en desarrollo ver [2]-[3],[14].

TABLA I  
ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS ORGÁNICOS

Etapa	Tecnología
Tratamiento	Planta de compostaje (tratamiento biológico aerobio)
	Digestión anaerobia (biodigestor)
	Incineración (oxidación térmica)
	Pirolisis
	Gasificación Por plasma
Disposición final	Relleno sanitaria

**C. Paso 3**

Resultado de una lluvia de ideas de los miembros del equipo de estudio, funcionarios involucrados y con el apoyo de un especialista con experticia en Tecnologías de Tratamiento de RSM, así como los obtenidos en los reportes de la literatura, se elaboró el listado de variables técnicas, económicas, ambientales y sociales representativas, que caracterizan a las tecnologías de tratamiento y disposición final de RSU a los cuales se aplicaron las herramientas Matriz de Impacto Cruzado (MIC) y Análisis Jerárquico Multicriterio (AHP) [15]-[16].

- 1) Variables técnicas; 14 variables
- 2) Variables ambientales: 10 variables
- 3) Variables sociales: 6 variables
- 4) Variables económicas: 5 variables

**D. Paso 4**

Como resultado de la aplicación del método Matriz de Impacto Cruzado (MIC), se obtienen los sub-criterios de evaluación que se emplearan para seleccionar la tecnología apropiada [17]

**Criterios técnicos (30%)**

1. Capacidad de tratamiento de la tecnología (Volumen de residuos/día).

2. Composición de residuos que ingresan al proceso. (Orgánicos, Inorgánicos).
3. Parámetros fisicoquímicos de residuos que ingresan al proceso (humedad, peso volumétrico, poder calorífico).
4. Área requerida para instalación de tecnología.
5. Necesidad de tratamiento o disposición final del rechazo de la tecnología (porcentaje de rechazo)
6. Aprovechamiento de los residuos valorizables
7. Madurez de la tecnología

**Criterios ambientales (35%)**

8. Generación y/o proliferación de fauna nociva
9. Generación de agentes patógenos.
10. Emanación de olores desagradables.
11. Contaminación atmosférica.
12. Contaminación acústica.
13. Contaminación acuática.
14. Afectación de suelos.

**Criterios sociales (14%)**

15. Distancia de amortiguamiento a la zona urbana
16. Nivel de capacitación (mano de obra calificada)

**Criterios económicos (21%)**

17. Costos de Inversión
18. Costos de Operación
19. Ingresos obtenidos por la venta de productos resultantes

**E. Paso 5**

Las ponderaciones cuantitativas del modelo AHP se calcularon para identificar las prioridades de las alternativas y se estableció su ponderación para el cálculo posterior.

En la metodología AHP, el desarrollo de las matrices de comparación por pares permite expresar una preferencia sobre un sub-criterio considerados de dos a dos (por pares), mediante una escala de 1/9, 1/8, ...1/2, 1, 2, ...8, 9 que evalúa nivel de importancia entre los criterios. Determinar estas prioridades requiere de una consulta a la literatura y a expertos que valoren el comportamiento de cada tecnología frente a cada criterio.

Una vez desarrollada la matriz de comparación por pares se calcula la prioridad de cada uno de los sub-criterios mediante un juicio de sintetización para establecer las prioridades relativas de los elementos a comparar, por ende determina el establecimiento de las ponderaciones de todos los sub-criterios.

El AHP nos proporciona un método para medir el grado de consistencia en juicio de comparación por pares; en el que los valores de relación de consistencia (CR) de 0.1 o inferiores se consideran con un nivel razonable de consistencia [16]-[17].

No se considera, el primer sub-criterio de evaluación ya que evaluamos todas las tecnologías para un volumen promedio de tratamiento de 400 Toneladas/ día de residuos sólidos orgánicos, generados en la ciudad de Arequipa.

El procedimiento para calcular las prioridades de cada alternativa de solución, se hace considerando la prioridad de cada sub-criterio como un coeficiente de ponderación que refleje su importancia. La prioridad general se obtiene sumando el producto de las ponderaciones por la prioridad de las alternativas

de decisión de cada sub-criterio. Este procedimiento se observa en las Tablas II – V, a las cuales se les ha aplicado su respectiva prueba de relación de consistencia (CR).

**TABLA II**  
**CRITERIOS TÉCNICOS (30%)**

Criterio	2	3	4	5	6	7	Promedio	Pond.
2	0,040540541	0,280373832	0,392523364	0,006451613	0,020979021	0,018867925	0,113622716	3
3	0,013513514	0,093457944	0,261682243	0,258064516	0,048951049	0,050314465	0,120997288	4
4	0,013513514	0,046728972	0,130841121	0,361290323	0,146853147	0,301886792	0,166852311	5
5	0,324324324	0,018691589	0,018691589	0,051612903	0,587412587	0,025157233	0,170981704	5
6	0,283783784	0,280373832	0,130841121	0,012903226	0,146853147	0,452830189	0,217930883	7
7	0,324324324	0,280373832	0,065420561	0,309677419	0,048951049	0,150943396	0,196615097	6

CI = 13,28410714

CR = 0,093344625

**TABLA III**  
**CRITERIOS AMBIENTALES (35%)**

Criterio	8	9	10	11	12	13	14	Promedio	Pond.
8	0,045906656	0,418410042	0,197802198	0,014510278	0,373831776	0,010799136	0,013215859	0,153496564	5
9	0,009181331	0,083682008	0,021978022	0,362756953	0,093457944	0,345572354	0,046255507	0,137554874	5
10	0,015302219	0,251046025	0,065934066	0,145102781	0,280373832	0,021598272	0,015418502	0,113539385	4
11	0,229533282	0,016736402	0,032967033	0,072551391	0,018691589	0,345572354	0,27753304	0,141940727	5
12	0,011476664	0,041841004	0,021978022	0,362756953	0,093457944	0,172786177	0,092511013	0,113829682	4
13	0,367253252	0,020920502	0,263736264	0,018137848	0,046728972	0,086393089	0,462555066	0,180817856	6
14	0,321346595	0,167364017	0,395604396	0,024183797	0,093457944	0,017278618	0,092511013	0,158820911	6

CI = 13,54562769

CR = 0,097448419

**TABLA IV**  
**CRITERIOS SOCIALES (14%)**

Criterio	15	16	Promedio	Pond.
15	0,5	0,5	0,5	7
16	0,5	0,5	0,5	7

CI = 1

CR = 0

**TABLA V**  
**CRITERIOS ECONOMICOS (21%)**

Criterio	17	18	19	Promedio	Pond.
17	0,33333333	0,33333333	0,33333333	0,33333333	7
18	0,33333333	0,33333333	0,33333333	0,33333333	7
19	0,33333333	0,33333333	0,33333333	0,33333333	7

CI = 0

CR = 0

**TABLA VI**  
**PONDERACION DE CRITERIOS DE EVALUACION**

	Criterios de Evaluación	Niveles de Evaluación					Pond.
Criterios técnicos (30%)	1. Capacidad de tratamiento de la tecnología (Volumen de residuos/día).	NSC	NSC	NSC	NSC	NSC	0
	2. Composición de residuos que ingresan al proceso (orgánicos, Inorgánicos).	(5) Únicamente residuos sólidos orgánicos	(4) mínimo 99.5% de residuos sólidos orgánicos	(2) mínimo 85% de residuos sólidos orgánicos		(1) acepta residuos sólidos orgánicos excepto vidrio y metal	3
	3. Parámetros fisicoquímicos de residuos que ingresan al proceso (humedad, peso)	(5) Este criterio no es limitante	(3) Humedad >= 20% PCI >= 1500 Kcal/Kg		(1) Humedad mayor al 3% y menor al 25%		4

	volumétrico, poder calorífico).				PCI $\geq$ 1600 Kcal/Kg		
	4. Área requerida para instalación de tecnología para 400 ton/día	(5). Menor a 1.5 hectáreas	(4). Menor a 1.7 hectáreas y $\geq$ 1.5 hectárea	(3) Menor 2 hectáreas y $\geq$ 1.7 hectáreas	(2) Menor de 20 hectáreas y $\geq$ 2 hectáreas	(1) Mayor de 20 hectáreas	5
	5. Necesidad de tratamiento o disposición final del rechazo de la tecnología (porcentaje de rechazo)	(5). No generan ningún tipo de rechazo	(4). Requiere un tratamiento alterno del 0.5% de residuos sólidos inorgánicos	(3). Requiere un tratamiento alterno $\geq$ 4% de residuos sólidos inorgánicos	(2). Requiere un tratamiento alterno $\geq$ 5% de residuos sólidos inorgánicos	(1). Requiere un tratamiento alterno $\geq$ 15% de residuos sólidos inorgánicos	5
	6. Aprovechamiento de los residuos valorizables	(5) Mayor a 800 KWh/ton	(4) Mayor a 600 KWh/ton y $\leq$ 800 KWh/ton	(3) Mayor a 550 KWh/ton y $\leq$ 600 KWh/ton	(2) Mayor a 450 KWh/ton y $\leq$ 550 KWh/ton	(1) Menor de 450 KWh/ton	7
	7. Madurez de la tecnología	(5) Mayor desarrollo		(2) No tiene gran desarrollo		(1) No se encuentra desarrollado	6
Criterios ambientales (35%)	8 Generación y/o proliferación de fauna nociva.	(5) No existe generación o proliferación	(4) Generación y proliferación controlable	(2) Generación y proliferación difícil de controlar		(1) Proliferación y migración no controlable	5
	9. Generación de agentes patógenos.	(5) No existen agentes patógenos	(4) Generación de agentes patógenos controlables	(2) Generación de patógenos difícil de controlar		(1) Generación de patógenos no controlable	5
	10. Emanación de olores desagradables.	(5) No se producen olores desagradables	(3) Olor moderadamente perceptible	(1) Olor desagradable perceptible		(1) Olor nauseabundo	4
	11. Contaminación atmosférica	(5), Las emisiones son despreciables	(4), El impacto es moderado y local	(3), El impacto es moderado y regional	(2), El impacto es irreversible con afectación local	(1), El impacto es irreversible con afectación global	5
	12. Contaminación acústica	(5), Generación de ruido sin molestia o afectación.	(4), Generación de ruido dentro de las instalaciones	(2), Afectación por ruido dentro de las instalaciones		(1), Afectación por ruido en las inmediaciones	4
	13. Contaminación acuática.	(5), Las descargas contaminantes son despreciables	(4), El sistema cuenta con tratamiento de lixiviado y/o agua contaminada (sanitarias o aceitosas)	(2), El volumen de las descargas generadas es mínimo		(1), El sistema descarga directamente lixiviado y agua contaminada (sanitarias o aceitosas).	6
	14. Afectación de suelos	(5), Sin afectación al suelo	(4), Afectación al suelo con leve impacto y controlable	(2), Afectación al suelo con impacto moderado difícil de controlar		(1), Afectación al suelo no controlable e irreversible	6
Criterios sociales (14%)	15. Distancia de amortiguamiento a la zona urbana	(5), No se requiere distancia de amortiguamiento	(4), Distancia de amortiguamiento dentro de la zona urbana.	(2), Requiere ser ubicada fuera de la zona urbana en un radio $\geq$ 0.1 km y $<$ 1 km		(1), Requiere ser ubicada fuera de la zona urbana en un radio $\geq$ 1 km	7
	16. Nivel de capacitación (mano de obra calificada).	(5), No se requiere mano de obra calificada	(4), Se requiere poca mano de obra calificada	(2), Se requiere mano de obra altamente calificada		(1), Únicamente mano de obra calificada	7
Criterios económicos (21%)	17. Costos de inversión	(5) Bajo		(3) Medio		(1) Alto	7
	18. Costos de operación	(5) Bajo		(3) Medio		(1) Alto	7
	19. Ingresos obtenidos por la venta de productos resultantes	(5) Altos		(3) Medios		(1) Bajos	7

TABLA VII  
SELECCION DE TECNOLOGIA

Criterios de Evaluación	Tecnología a evaluar												Ponderación
	Planta de Compostaje		Digestión Anaerobia		Incineración		Pirólisis		Gasificación por Plasma		Relleno Sanitario		
	Peso Local	Peso Global	Peso Local	Peso Global	Peso Local	Peso Global	Peso Local	Peso Global	Peso Local	Peso Global	Peso Local	Peso Global	
2. Composición de residuos que ingresan proceso (orgánicos, Inorgánicos).	3	9	5	15	1	3	1	3	1	3	5	15	3
3. Parámetros fisicoquímicos de residuos que ingresan al proceso (humedad, peso volumétrico, poder calorífico).	5	20	5	20	1	4	3	12	3	12	5	20	4
4. Área requerida para instalación de tecnología para 400 ton/día	2	10	2	10	3	15	4	20	4	20	1	5	5
5. Necesidad de tratamiento o disposición final del rechazo de la tecnología (porcentaje de rechazo)	4	20	5	25	2	10	3	15	3	15	5	25	5
6. Aprovechamiento de los residuos valorizables	1	7	1	7	3	21	4	28	5	35	1	7	7
7. Madurez de la tecnología	2	12	2	12	5	30	2	12	2	12	5	30	6
8 Generación y/o proliferación de fauna nociva.	4	20	4	20	5	25	5	25	5	25	2	10	5
9. Generación de agentes patógenos.	4	20	4	20	5	25	5	25	5	25	2	10	5
10. Emanación de olores desagradables.	3	12	3	12	3	12	3	12	3	12	1	4	4
11. Contaminación atmosférica	3	15	3	15	3	15	3	15	3	15	2	10	5
12. Contaminación acústica	4	16	4	16	4	16	4	16	4	16	4	16	4
13. Contaminación acuática.	4	24	4	24	4	24	4	24	4	24	4	24	6
14. Afectación de suelos	4	24	4	24	4	24	4	24	4	24	4	24	6
15. Distancia de amortiguamiento a la zona urbana	4	28	4	28	4	28	4	28	4	28	2	14	7
16. Nivel de capacitación (mano de obra calificada).	4	28	4	28	2	14	2	14	2	14	4	28	7
17. Costos de inversión	1	7	1	7	3	21	3	21	3	21	1	7	7
18. Costos de operación	3	21	3	21	5	35	5	35	3	21	3	21	7
19. Ingresos obtenidos por la venta de productos resultantes	3	21	3	21	1	7	3	21	5	35	3	21	7
RESULTADO	314		325		329		350		357		291		100

#### IV. CONCLUSIONES

La selección de la mejor alternativa tecnológica, se consigue haciendo uso de una tabla de ponderación que nos permita la comparación relativa acerca de la preferencia de tecnologías respecto a cada uno de los sub-criterios de evaluación.

De esta manera la aplicación de la tabla VI (abajo descrita) nos proporcionará el resultado de la alternativa tecnológica más idónea.

##### F. Paso 6

Una vez desarrolladas las matrices de comparación y establecidas sus ponderaciones, el resultado se muestra en la Tabla VI; lo que permite evaluar las diferentes tecnologías en función a los sub-criterios establecidos. Esta evaluación se llevó a cabo considerando los reportes de la literatura y la participación de expertos en el área; que nos permite establecer la preferencia de los sub-criterios para la evaluación de las diferentes tecnologías de tratamiento.

##### G. Paso 7

Finalmente evaluamos todas las alternativas, para ello se multiplica la evaluación de cada criterio por su ponderación y se procede a realizar la sumatoria para cada tecnología, a fin de poder comparar y escoger aquella tecnología que tenga el mayor valor ponderado, resultados que se detallan en la Tabla VII considerando todos los sub-criterios y en la Tabla VIII, las evaluaciones que integran cada uno de los cuatro criterios: técnicos, ambientales, sociales y económicos.

##### H. Paso 8

Observamos en la tabla VIII, como resultado de la aplicación de la herramienta, que la Gasificación por Plasma (357p) es la alternativa elegida para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos municipales. Obtuvo junto a la Pirolysis (350p) las preferencias en los criterios ambientales, debido que las tecnologías de tratamiento térmico permiten obtener una reducción de volumen y recuperación de energía [18], así como un menor impacto ambiental [19], pero se observa un mejor aprovechamiento de los residuos valorizables con menores costos operativos respecto a la pirolisis.

La Incineración (329p) tiene un menor costo que la Digestión Anaerobia, pero produce mayores emisiones al medio ambiente. La Digestión Anaerobia (325p) en este momento posee un menor aprovechamiento de residuos valorizables, y costos de inversión elevados; pero tiene un reconocido potencial de contribuir a la producción de biogás de alto volumen que en un futuro brindará mayores ventajas en criterios técnicos, económicos y ambientales que las otras tecnologías. [20].

Siendo el Relleno Sanitario (285p) la alternativa tecnológica propuesta por el Estado, pero conviviendo con los botaderos no autorizados.

La selección de la tecnología adecuada para el tratamiento de RSU es un proceso complejo de criterios múltiples. Este estudio considera un conjunto mínimo de criterios relevantes de evaluación y selección de tecnologías apropiadas para el tratamiento de RSU económica y ambientalmente sostenibles.

Por lo tanto, se ha demostrado que el empleo de la Matriz de Impacto Cruzado (MIC) y Análisis Jerárquico Multicriterio (AHP) ha permitido desarrollar una herramienta que favorece a las autoridades tomar decisiones informadas para conseguir resultados óptimos al momento de seleccionar una tecnología de tratamiento de RSU.

Las Tecnologías WTE (Waste to Energía) estudiadas [5], se están convirtiendo en una de las opciones más importantes para lograr la recuperación de energía partir de los RSU.

La gasificación por plasma que es la alternativa seleccionada, es un procedimiento que descompone las moléculas a altas temperaturas, proporcionando un gas sintético (gas de síntesis) que puede producir electricidad, combustibles y productos químicos; tiene un menor impacto ambiental, ya que reduce el volumen en un 90%; además de generar gas, forman escoria que pueden vitrificarse y utilizarse como material de construcción. Representa altos costos de capital, pero permite altos ingresos, reduciendo costos operativos.

Dentro de las tecnologías WTE, la gasificación por plasma es reciente y, por lo tanto, no se aplica aun en nuestro medio.

TABLA VIII  
SELECCION DE TECNOLOGIA

Criterios de Evaluación	Tecnología a evaluar					
	Planta de Compostaje	Digestión Anaerobia	Incineración	Pirolisis	Gasificación por Plasma	Relleno Sanitario
Criterios técnicos (30%)	78	89	83	90	97	102
Criterios ambientales (35%)	131	131	141	141	141	98
Criterios sociales (14%)	56	56	42	42	42	49
Criterios económicos (21%)	49	49	63	77	77	43
Resultado de la ponderación	314	325	329	350	357	292

Fuente: Todas las tablas presentadas en este trabajo, son de elaboración propia.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a *UNSA INVESTIGA* de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa por el financiamiento al Proyecto de Investigación con Contrato N° IAI-030-2018-UNSA, propicio el desarrollo del presente trabajo.

## REFERENCES

- [1] (2107) The MPA website. [En línea]. Disponible: <http://www.muniarequipa.gob.pe/descargas/gestionmanejoresiduos/PIGARS%202017-2028/PIGARS%20final%2022%20de%20Diciembre.pdf>
- [2] N. AlQattan *et al.*, "Reviewing the potential of Waste-to-Energy (WTE) technologies for Sustainable Development Goal (SDG) numbers seven and eleven", *Renewable Energy Focus*, vol 27, Pages 97-110, dic. 2018.
- [3] E. Kazuva and J. Zhang, "Analyzing Municipal Solid Waste Treatment Scenarios in Rapidly Urbanizing Cities in Developing Countries: The Case of Dar es Salaam, Tanzania," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, no. 11, p. 2035, Jun. 2019.
- [4] A. Gallardo, F. Colomer, R. Campos y D. Arias-Aguilar, *Aprovechamiento energético de residuos sólidos*. Castelló de la Plana, España: Publicaciones de la Universitat Jaume I, 2019.
- [5] S. A. T. Muawad and A. A. M. Omara, "Waste to Energy as an Alternative Energy Source and Waste Management Solution," *2019 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*, Khartoum, Sudan, 2019, pp. 1-6.
- [6] A. Romyantseva, *et al.* "Modern technologies of processing municipal solid waste: investing in the future", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Ekaterinburg, Russia, vol. 72, no. 1.
- [7] S. M. A. Abuabdou, *et al.* "Applicability of anaerobic membrane bioreactors for landfill leachate treatment: review and opportunity", *2018 IOP IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 140, no. 1.
- [8] M. Negro, *et al.* "Gestión y producción del compost. Dirección General de Tecnología", Centro de Técnicas Agrarias Gobierno de Aragón Departamento de Agricultura, Aragón, España, Tech. Rep. 88, 2000.
- [9] A. Ramos, *et al.* "Life cycle costing for plasma gasification of municipal solid waste: A socioeconomic approach," *Energy Conversion and Management*, vol. 209, jan. 2020.
- [10] T. Tsui, J. Wong, "A critical review: emerging bioeconomy and waste-to-energy technologies for sustainable municipal solid waste management", Zhejiang University Press, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42768-019-00013-z>
- [11] Sistema Nacional de Información Ambiental [En línea]. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/indicador/1601>, [Accedido: 20-Jun-2020]
- [12] The Energy and Resources Institute, "Waste to Resources: A Waste Management Handbook" TERI Press, New Delhi, India, 2014.
- [13] A. Carneiro, R. Moreira, M. A. Souza, "Tecnologia Apropriada em Saneamento: uma nova Abordagem com o Emprego de Análise Multiobjetivo e Multicritério", *ABES 2000 - 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Brasil,
- [14] M.G. Kharat, *et al.*, "The application of Delphi and AHP method in environmentally conscious solid waste treatment and disposal technology selection", *Management of Environmental Quality*, 2016, Vol. 27 No. 4, pp. 427-440. <https://doi.org/10.1108/MEQ-09-2014-0133>
- [15] M.T. Orta, *et al.*, "Estudio de Evaluación de Tecnologías alternativas o complementarias para el tratamiento o disposición final de los residuos sólidos urbanos", Instituto de Ing. UNAM, México, Inf. Tec. 9335, Nov. 2009.
- [16] D. Jato-Espino *et al.* "Análisis Multicriterio Integral para optimizar la Gestión de Residuos Sólidos Municipales," *Conf. 7º Encuentro de Expertos en Residuos sólidos y 3er Foro Nacional de Ingeniería y Medio Ambiente*, Toluca, 2014, pp. 111-125.
- [17] A. Ishak and N. Hidayati, "Determination of Criteria and Sub-criteria in Urban Solid Waste Processing Technology," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol 722, doi:10.1088/1757-899X/722/1/012057
- [18] Golomeova S. Srebrenkoska V. Krsteva S. Spasova S "Solid Waste Treatment Technologies," *Scientific Proceedings X International Congress Machines, Technologies, Materials*, 2013, pp. 63-65.
- [19] A. Ramos *et al.*, "Life cycle costing for plasma gasification of municipal solid waste: A socio-economic approach", *Energy Conversion and Management*, vol. 209, pp. 16-30, abr. 2020.
- [20] D. Octavianthy and W. W. Purwanto, "Municipal Solid Waste to Electricity Using Anaerobic Digestion and Incineration Conversion Technologies: A Comparative Study," *2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD)*, Jakarta, Indonesia, pp. 1-6.