



Julio 2020

# Tecnologías de Conversión de Residuos en Energía

## “Waste to Energy” (WtE)

Informe de Vigilancia Tecnológica

VERSIÓN FINAL

# AGENDA

**Antecedentes**

**Análisis de Mercado**

**Análisis Tecnológico**

**Análisis Estratégico**

**Elementos para la discusión**

## OBJETIVO DEL INFORME

El presente trabajo ha sido desarrollado por *Discovery & Watch* bajo el alero del proyecto de elaboración de la **Hoja de Ruta para Economía Circular de Chile**.

El objetivo es obtener una mirada general actualizada sobre el desarrollo de las tecnologías **Waste to Energy** (conversión de residuos en energía) identificando las **tendencias en el desarrollo tecnológico, las tendencias del mercado y tendencias en investigación**, entre otros puntos de interés.

Dada la amplitud del tema en cuestión, es importante destacar que este informe no aborda elementos de prefactibilidad de proyectos WtE, así como tampoco aspectos ambientales, sociales y/o legales, los cuales si bien entendemos son muy relevantes en el marco del tema de estudio, no forman parte del alcance de este trabajo.

# METODOLOGÍA

## Foco

- ❑ Entregar una mirada general sobre las tecnologías **Waste to Energy** (conversión de residuos en energía) identificando las principales tendencias en el desarrollo tecnológico, las tendencias del mercado y tendencias de investigación, entre otros puntos de interés.

## Fuentes de información

- ❑ Las principales fuentes de información utilizadas en este informe corresponden a bases de datos tecnológicas como **EPO**, que cubre patentes en más de 90 países y se actualiza semanalmente; la base de datos científica **ISI Web of Knowledge**, y la base de datos de mercado **EMIS**, así como las herramientas de análisis **Wizdom** y **Patentinspiration**. Adicionalmente, se realizó una revisión de papers, documentos técnicos, web de empresas, organismos internacionales y portales especializados.

## Estrategias de búsqueda

- ❑ Se llevó a cabo una búsqueda general de patentes y literatura científica para el período 2010 a 2020 (hasta junio), utilizando el código internacional Cooperative Patent Classification (CPC) en el caso de las patentes. En el caso de las publicaciones científicas se hizo a través de keywords con énfasis en título y abstract.

## Análisis de información

- ❑ A partir de los datos recuperados se llevó a cabo un análisis cuantitativo y cualitativo apoyado con software de data mining y la participación del equipo consultor.



DISCOVERY & WATCH

ANTECEDENTES

## ¿QUÉ ES WASTE TO ENERGY?

Waste to Energy o tecnologías de conversión de residuos en energía (WtE) consisten en cualquier proceso de tratamiento de residuos que crea energía en forma de electricidad, calor o combustibles de transporte (por ejemplo, Diesel) de una fuente de desechos (World Energy Council, 2013).

El alcance del término "Waste to Energy" es muy amplio, abarcando una amplia **gama de tecnologías** de diferentes escalas y complejidad como la incineración, coprocesamiento, digestión anaeróbica, recolección de gases de vertedero, pirólisis, gasificación, entre otras.

Para cada una de estas tecnologías se aplica **diferentes tratamientos, procesos y manejos** según el flujo de residuos, las características, necesidades y requerimiento específico.



Figura 1. Render de NESS Energy Project, la nueva planta WtE en construcción en Aberdeen, Escocia.

## ¿CÓMO FUNCIONA?

Una planta Waste to Energy (WtE), dependiendo de la tecnología utilizada y el tipo de residuo, realiza un tratamiento térmico, termoquímico o biológico de los residuos domésticos y similares que quedan después del proceso de clasificación de los residuos mediante reciclaje y reutilización.

En una planta WtE, el proceso se puede simplificar en 4 grandes etapas:

- ✓ El tratamiento de los residuos
- ✓ La recuperación de energía
- ✓ La limpieza de gases
- ✓ La utilización de la energía



Figura 2. Arriba se observa la representación del proceso en una planta WtE con tecnología de gasificación.



Figura 3. A la izquierda una representación del proceso en una planta WtE con tecnología de incineración con recuperación de energía.



## ¿QUÉ TIPO DE ENERGÍA GENERA?

Las plantas WtE generan energía principalmente en forma de **calor, electricidad o agua caliente**, y son capaces de generar determinados productos derivados del procesamiento de los residuos como gas, electricidad, vapor, syngas, carbón vegetal, hidrógeno, entre otros.

- ✓ La electricidad se inyecta al sistema eléctrico del operador local.
- ✓ El agua caliente, dependiendo de la infraestructura local, puede ser enviada a través de una red para calentar o refrigerar hogares, hospitales, oficinas, etc.
- ✓ El vapor puede ser usado por la industria cercana a la planta en sus procesos de producción o para generar energía eléctrica.

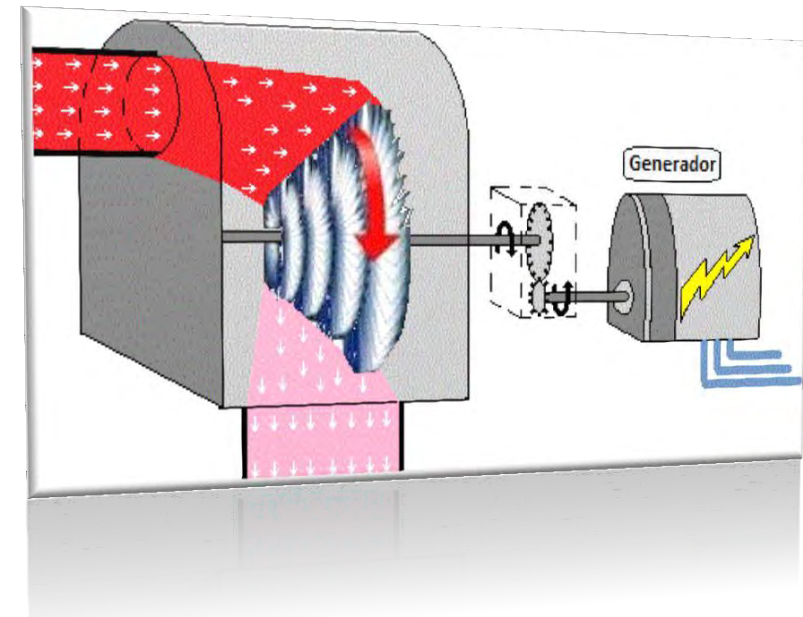
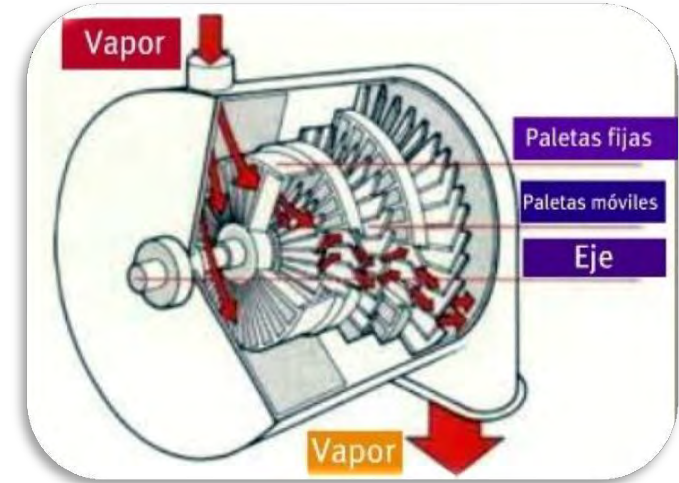


Figura 4. Representación de la generación de vapor y energía eléctrica.



## TIPOS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

En el uso de las tecnologías Waste to Energy, los residuos corresponden a la **materia energética primaria**, por lo que su correcta **caracterización** resulta fundamental para poder estimar de forma precisa la energía a generar por una planta.

La eficiencia del proceso de conversión de los residuos en energía esta directamente relacionada con la composición de éstos, por lo que es uno de los factores a tener en consideración.

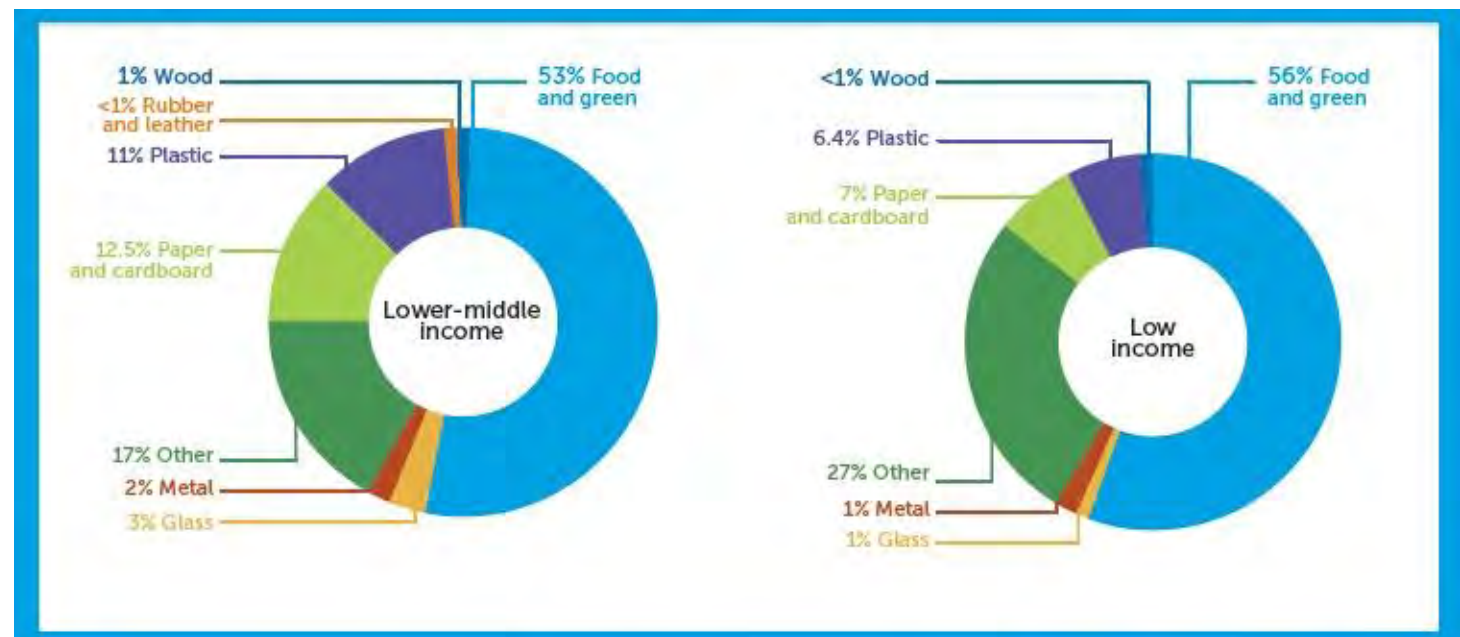
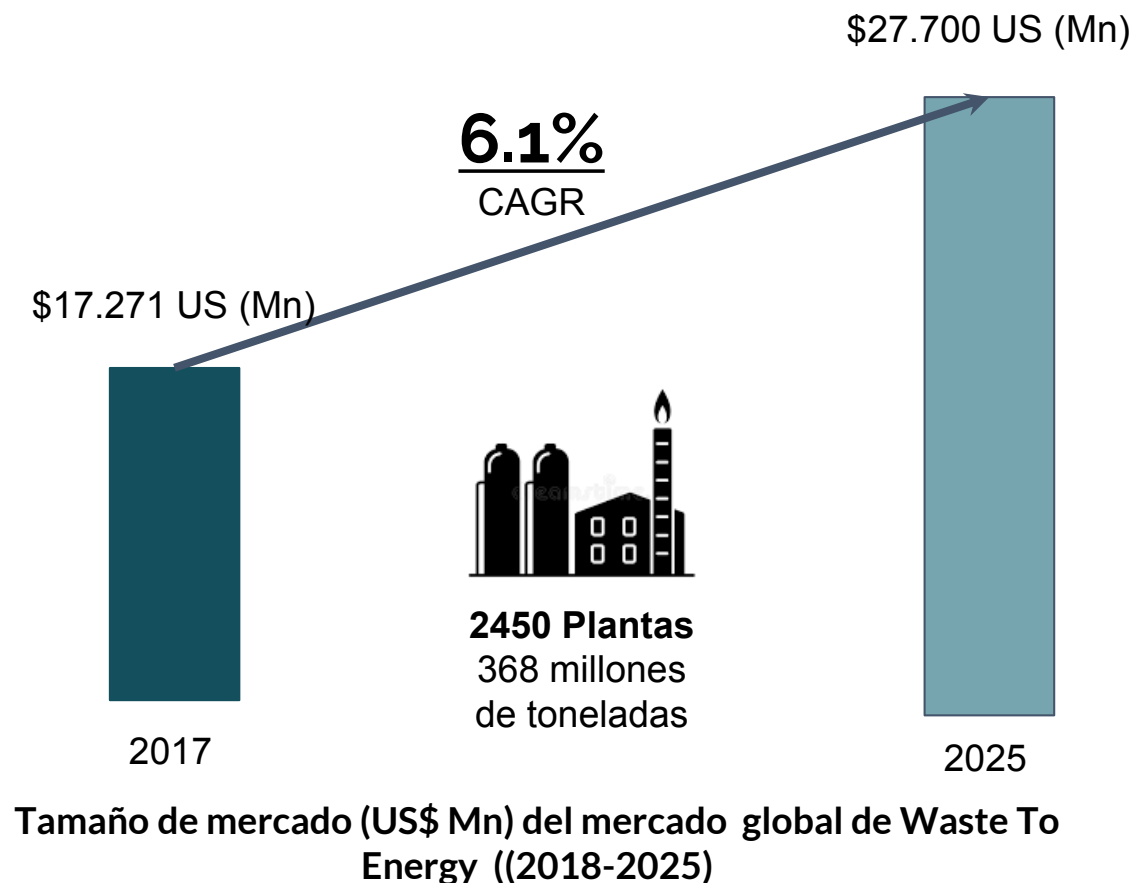


Figura 5. Composición de los residuos sólidos municipales en países en desarrollo (Banco Mundial 2018).



# ANÁLISIS DEL MERCADO

## TAMAÑO DEL MERCADO



- El mercado global de Waste to Energy (WtE) fue valorado en **\$17.271,4 millones** de dólares en 2017, y se proyecta que alcance los **\$27.700,8 millones** de dólares en 2025, con un **CAGR del 6,1%** de 2018 a 2025. En 2020 el tamaño de mercado sería en torno a los **USD \$20.700 millones de dólares**.
- El **segmento térmico** representa casi el **87%** del mercado en 2020 y la incineración con recuperación de energía ocupa casi **55%** del segmento.
- Actualmente se estima que alrededor de **2.450 plantas WtE** de diferente tecnología están activas en todo el mundo con una capacidad de alrededor de **368 millones** de toneladas de desechos por año.
- Sólo en 2018, se instalaron más de 60 nuevas plantas con una capacidad total de tratamiento de más de 14 millones de toneladas por año.

# CRECIMIENTO DEL MERCADO POR TECNOLOGÍA

TABLE 03. GLOBAL WASTE TO ENERGY MARKET, BY TECHNOLOGY, 2017-2025, (\$MILLION)

TECHNOLOGY	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	CAGR% (2018-2025)
Thermal	14,987.7	15,922.0	16,902.4	17,933.1	19,016.3	20,154.6	21,350.5	22,606.8	23,926.1	6.0
Biological	2,283.7	2,436.8	2,598.2	2,768.6	2,948.7	3,138.8	3,339.4	3,551.2	3,774.6	6.5
Total	17,271.4	18,358.8	19,500.6	20,701.7	21,965.0	23,293.4	24,689.9	26,158.0	27,700.8	6.1

Source: Primary Research, Government Publications, and AMR Analysis

Se estima que el mercado mundial de WtE a través de la **tecnología térmica** (incineración, pirólisis y gasificación) fue de 14.987,7 millones de dólares en 2017 y se prevé que alcance los \$23.926,1 millones de dólares a finales de 2025.

De igual forma la previsión del mercado de WtE a través de la **tecnología biológica** (digestión anaeróbica, composataje, landfill gas y fermentación) fue de \$2.283,7 millones de dólares en 2017 y se prevé que alcance los 3.774,6 millones de dólares para 2025, con una tasa de crecimiento anual promedio del 6,5%.

## CRECIMIENTO DEL MERCADO




- Europa tiene la mayor cuota de mercado de WtE, siendo Alemania el mercado clave en esta región.
- Los crecientes esfuerzos por reducir la huella de carbono y minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero para controlar el calentamiento global (por ejemplo minimizando la generación de gas metano en rellenos sanitarios) influyen en el crecimiento del mercado de WtE.
- La región Asia - Pacífico cuenta con la tasa de crecimiento más alta (CAGR 6.1%) y la mayor cantidad de nuevos proyectos.




# DINÁMICA DEL MERCADO


## Drivers

- 
- Aumento de la demanda de consumo de electricidad
  - Carbono Neutral y Cero vertimientos
  - Valor agregado a los desechos
  - Prolongación de la vida útil de los rellenos
  - Falta de espacio para construcción de nuevos rellenos
  - Calentamiento Global
  - Incentivos por uso de residuos sólidos en generación de energía.

## Restricciones

- 
- Altos costos CAPEX y OPEX
  - Fuentes energéticas alternativas de menor costo en CAPEX y OPEX
  - Altas barreras sociales a la “Quema de residuos”.
  - Reciclaje disminuye el volumen de residuos disponibles como materia prima
  - El reciclaje asegura la sostenibilidad económica

## Tendencias

- 
- Predominancia de tecnologías térmicas, particularmente incineración y gasificación
  - Crecimiento sostenido de tecnologías biológicas
  - Nuevas tecnologías buscan mitigar la contaminación

➤ La **región de Asia Pacífico** dominó el mercado mundial, con la mayor parte de la demanda proveniente de **China y Japón**, y la apertura de nuevos mercados como **Australia, Malasia y Vietnam** entre otros.

➤ Las tecnologías térmicas avanzadas, como la **gasificación y la pirólisis**, y los sistemas biológicos de **digestión anaeróbica** están entrando con fuerza y se espera que aumenten sus cuotas de mercado debido al interés global en el marco de gestión integrada de residuos en áreas urbanas.

➤ El mercado WtE térmico con incineración está restringido por el **alto costo** de los incineradores y la disminución de los **precios de la energía**, lo cual sumado a una baja en el volumen necesario de residuos podría dificultar la cobertura de los **costos de operación**.

➤ Varios países europeos y Japón planean centrarse más en el **reciclaje**, lo que ahorra más energía y, por lo tanto, restringe el mercado WtE.

➤ Se observa una tendencia en el desarrollo de **marcos regulatorios** cada vez más **estrictos** en relación a las emisiones y desechos, lo cual obliga a los proyectos, particularmente de incineración, a invertir en tecnologías con este fin.





# ANÁLISIS TECNOLÓGICO

# ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA Y ANÁLISIS DE PATENTES

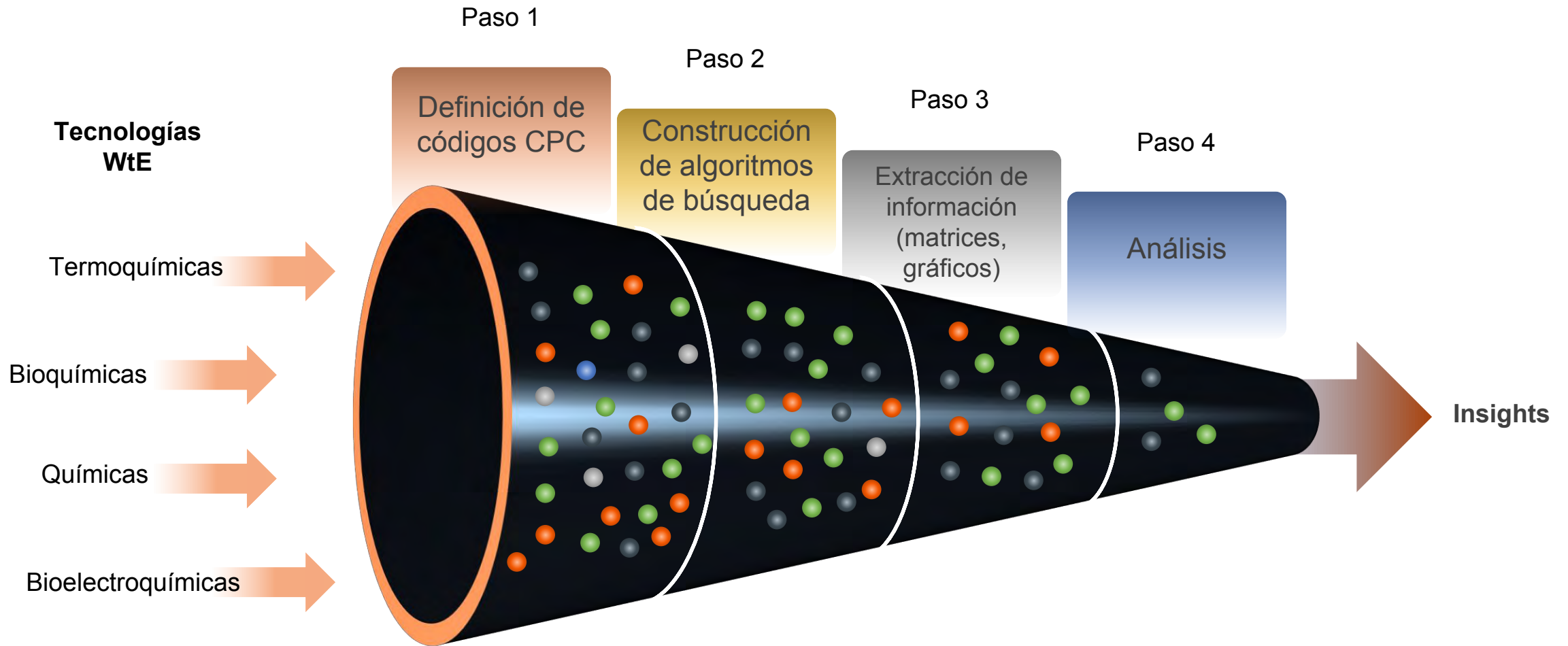


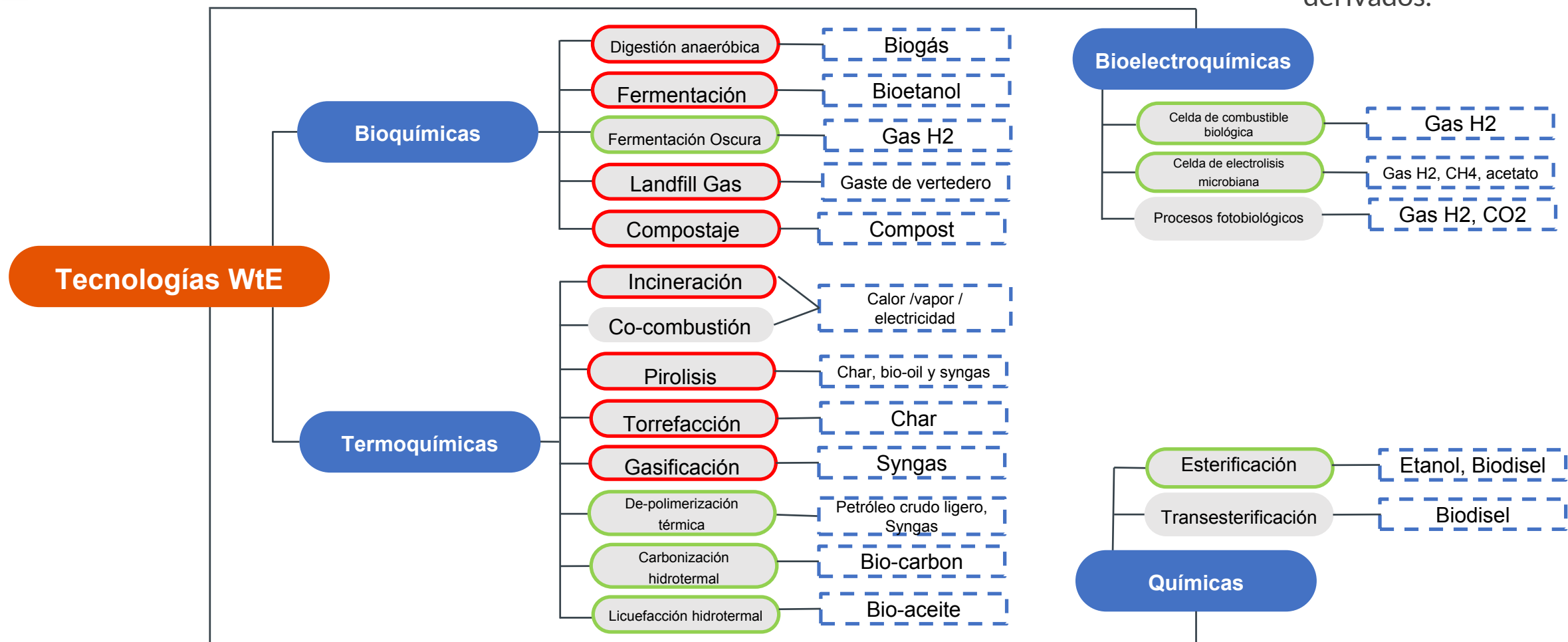


Figura 7. Esquema de la metodología para la búsqueda y análisis de patentes.

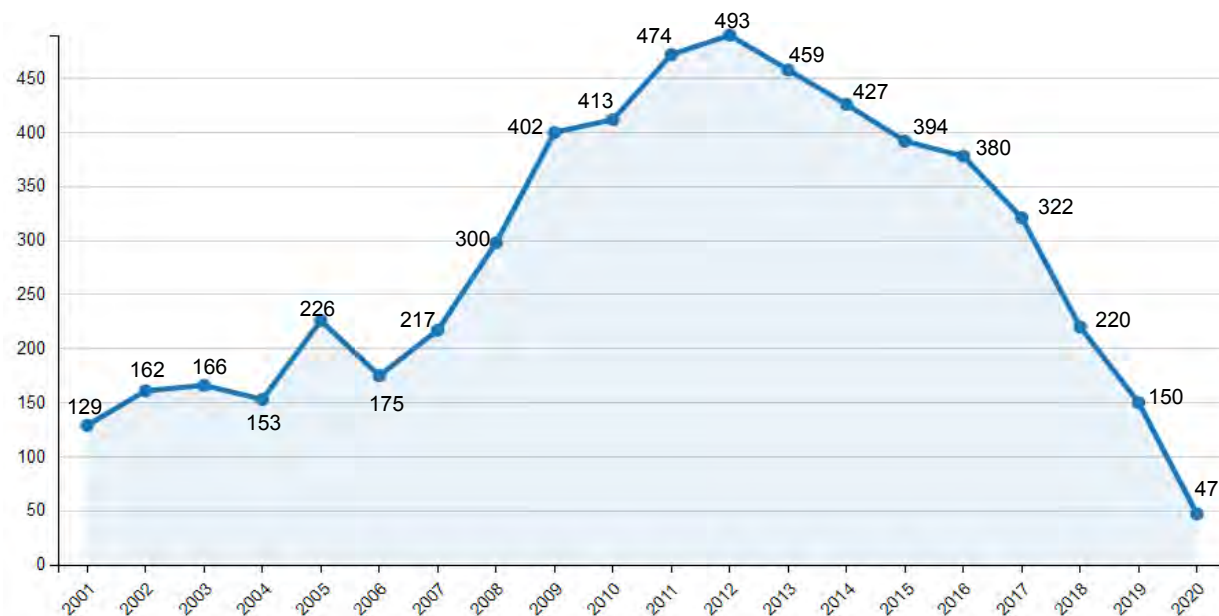
# TECNOLOGÍAS WtE

-  Tecnologías maduras  
 Tecnologías emergentes



# I+D ASOCIADA A WtE

## EVOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD

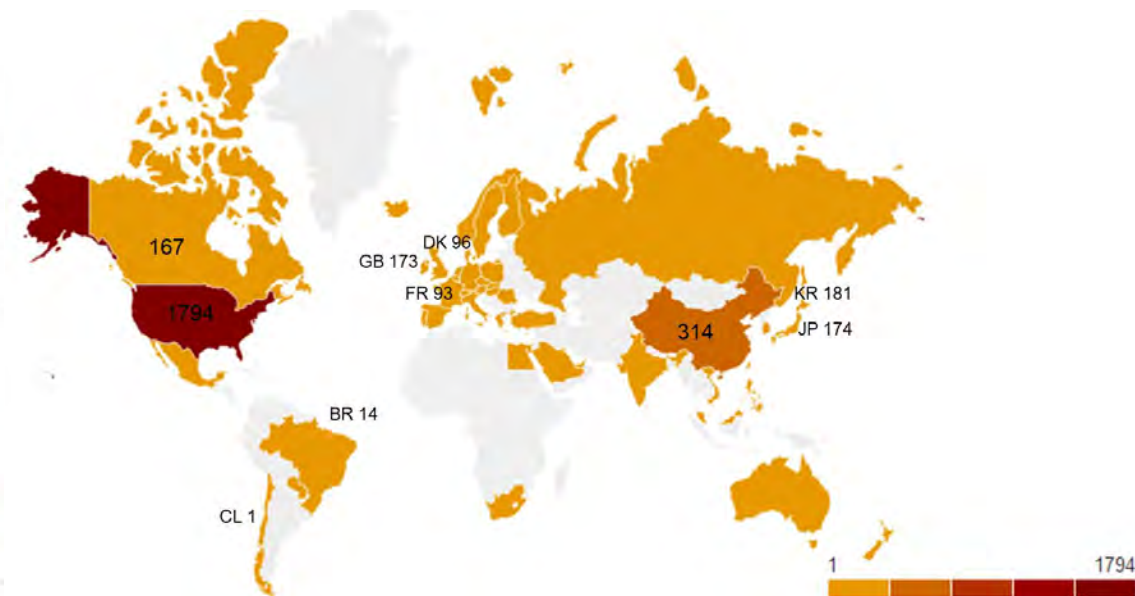


El gráfico permite visualizar la evolución de la actividad de patentamiento para los últimos 20 años a nivel mundial en tecnologías WtE, período en el que se generaron **5824** solicitudes, el **65%** en los últimos 10 años, con un peak en 2012 de 493 registros.

No obstante esta importante actividad, se observa una **caída sostenida** en el desarrollo tecnológico debido a la **madurez** que han alcanzado algunas tecnologías de amplio uso comercial como las de digestión anaeróbica, incineración, fermentación, pirólisis y gasificación.

Fuente: Discovery & Watch con datos EPO y Patentinspiration (Junio 2020)

## PAÍSES QUE PATENTAN

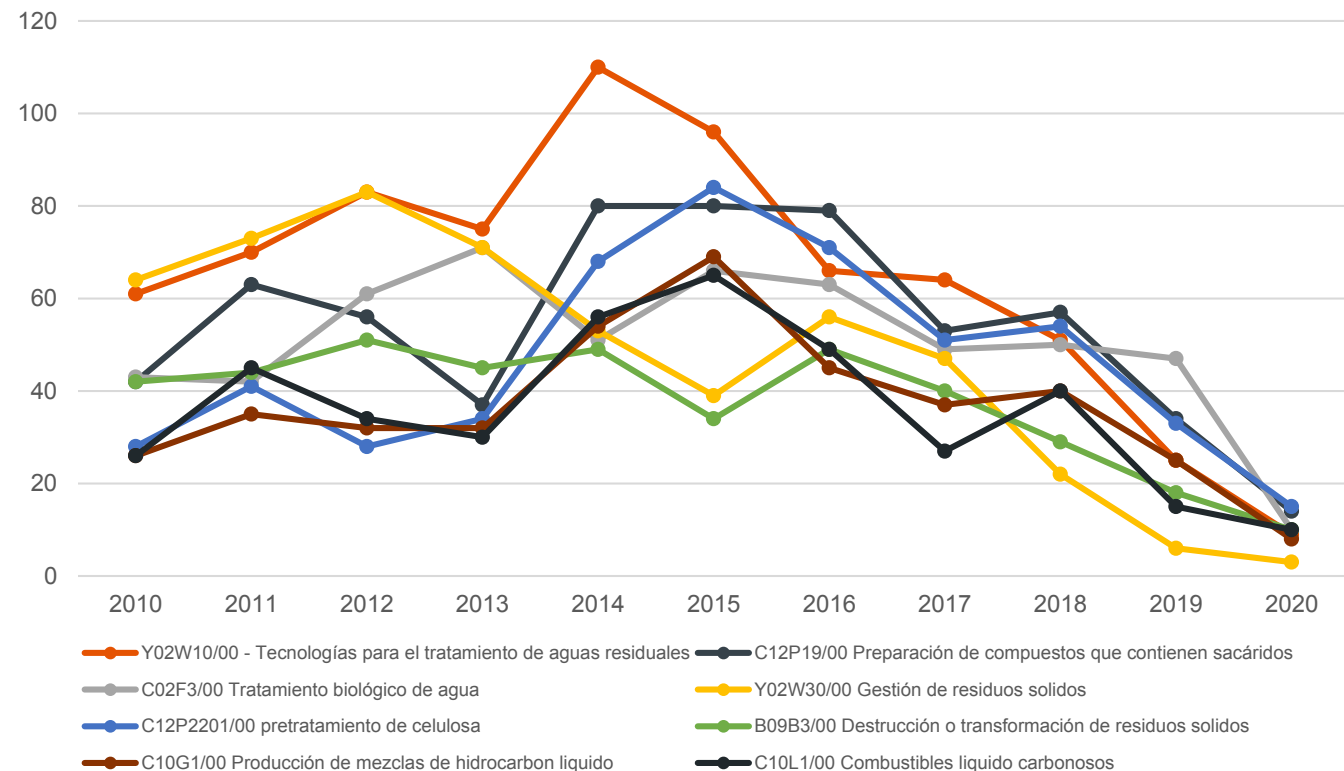


Respecto a los países líderes en desarrollo tecnológico, **Estados Unidos** domina con 1794 registros (**31%**), seguido de lejos por **China** con 314 (**5.4%**), **Corea del sur** con 181 (**3.1%**) y **Japón** con 174 (**3%**) en el tercer y cuarto puesto respectivamente, **Reino Unido** con 173 (**2.97%**), **Dinamarca** con 96 (**1.6%**) y **Francia** con 93 (**1.6%**) entre otros países.

A nivel latinoamericano, destaca Brasil con 14 registros y Chile con 1 ("Producción de combustibles destilados a partir de un proceso integrado de conversión de desechos sólidos municipales (triglicéridos)").

# I+D ASOCIADA A WtE

## EVOLUCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS



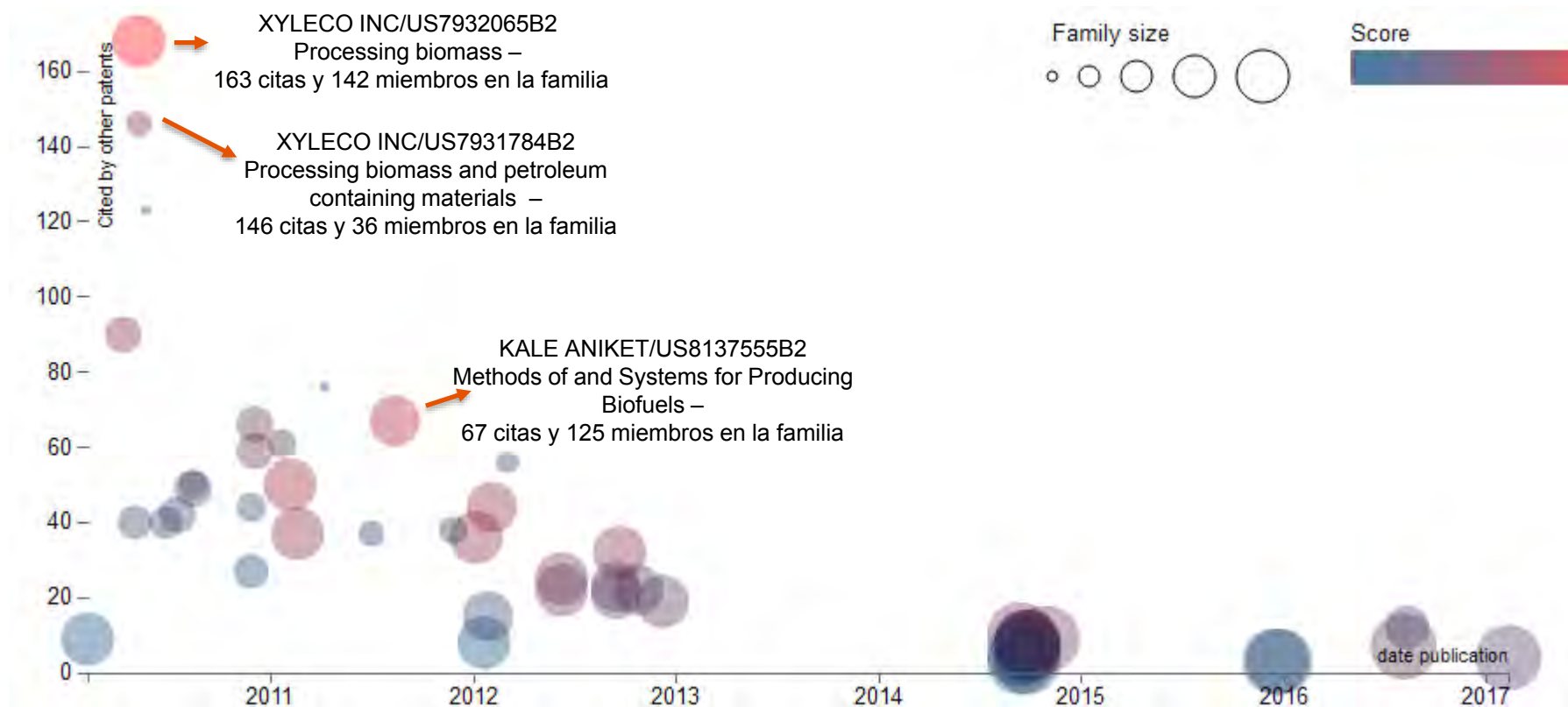
## PROBLEMAS A RESOLVER



En cuanto a la evolución en el tiempo para las principales clasificaciones tecnológicas según su CPC (Cooperative Patent Classification), se observa un interés por las tecnologías relacionadas con **pretratamiento**, **tratamiento biológico**, **destrucción de residuos solidos** como la **biomasa celulósica**, **producción de hidrocarburos** y líquidos carbonosos, entre otras.

Los desarrollos tecnológicos se enfocan en la solución de algunos problemas puntuales, entre los que se encuentran: los problemas de **polución**, los problemas de **disposición de residuos** y el aspecto de **viabilidad**, específicamente la económica donde el proceso de **generación de combustibles sintéticos** debe encontrar un punto de equilibrio según la región donde se desarrolle el proyecto.

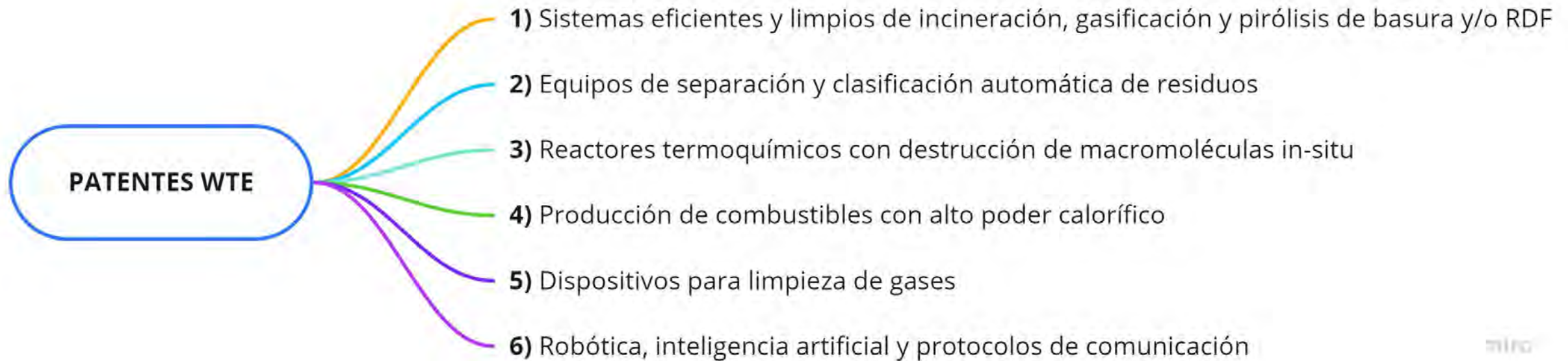
## PATENTES MÁS VALIOSAS



El gráfico muestra la relación entre número de citas eje Y (tamaño de la familia) de una patente, a través del tiempo eje X. Se observa un marcado interés por las patentes de la empresa **Xyleco**, especialmente por su fortaleza en el desarrollo en tecnologías de **procesamiento de biomasa celulósica** para la producción de biocombustibles. Estas patentes sirvieron de base para nuevos desarrollos tecnológicos en el área de WtE.



# TENDENCIAS EN EL DESARROLLO TECNOLÓGICO



mina

# TENDENCIAS EN EL DESARROLLO TECNOLÓGICO

## 1) Sistemas eficientes y limpios de incineración, gasificación y pirólisis de basura y/o RDF

Diferentes configuraciones y modos de operación de plantas WtE, se destaca:

- Ajuste de flujo de aire y precalentamiento del agua por medio de economizadores.
- Aprovechamiento del calor de gases de chimenea en secado de residuos.
- Gasificador horizontal con transferencia lateral de calor para minimizar pérdidas.
- Plantas compactas basadas en módulos con ensamble estándar.
- Manejo de residuos con un sistema de tratamiento simbiótico industrial acorde a la calidad sectorial de la basura en una ciudad.
- Método auto-catalítico in-situ para remoción de azufre y cloro.
- Combinación de microondas y arco eléctrico/plasma para vitrificación de cenizas.
- Planta WtE móvil para usarse cerca a la fuente o punto de recolección de basuras.
- Integración de un gasificador con un gasificador plasma. En el primero se produce el gas de síntesis, en el segundo, se eliminan las sustancias peligrosas.
- Calor reciclado de un incinerador es usado en un pirolizador.
- Disposición alternativa de residuos en hornos de cemento y cocción de ladrillos

## 2) Equipos de separación y clasificación automática de residuos.

Etapas de procesamiento de basuras realizadas automáticamente y que consisten principalmente en: selección primaria, trituración, rompimiento de bolsas, tamizado, suspensión con aire(o agua) que hace que la basura se expanda o desdoble y que al caer forme capas. La capa superior es de material menos húmedo y menos denso, mientras la inferior es la más húmeda. Cada capa se separa y se somete a tratamientos diferentes. Es común el uso de separadores electrostáticos para retener los metales ferrosos. Se identificó una patente que propone la separación automática de materiales inorgánicos que no pirolizan y orgánicos como plásticos que contienen dioxinas.

## TENDENCIAS EN EL DESARROLLO TECNOLÓGICO

3) Reactores termoquímicos con destrucción de macromoléculas in-situ.

Apropiados principalmente para aprovechamiento energético a partir de cauchos y plásticos. Los reactores de oxidación, con corrientes cíclicas al interior y antorchas plasma, permiten la destrucción de dioxinas y furanos in-situ.

4) Producción de combustibles con alto poder calorífico.

Los desarrollos en termo-valorización de residuos se están enfocando en:

- Secadores de lecho fluidizado.
- Conversión en hidrocarburos sintéticos como diésel y gasolina.
- Producción de gas de síntesis con alto contenido de H<sub>2</sub> mediante la reacción shift entre el agua y el CO catalizada por microorganismos.
- Deshidratación mecánica de basura por compresión y empuje. También se hace en piscinas tecnificadas con incorporación de calentamiento y tubos de escape.
- Producción de bio-oil a partir de MSW (Municipal Solid Waste) mediante pirólisis.
- Diferentes métodos para la preparación de RDF.
- Producción de material carbonáceo. Conversión de residuos en coque o carbono puro.

5) Dispositivos para limpieza de gases.

Purificación de gases mediante dispositivos empleados en captura de material particulado fino, cracking de alquitranes, disminución de acidez, desulfurización, desodorización y remoción de dioxinas.

## TENDENCIAS EN EL DESARROLLO TECNOLÓGICO

### 6) Robótica, inteligencia artificial y protocolos de comunicación

- Reconocimiento y remoción de residuos no combustibles en una gran área usando aspas robóticas (controladas por inteligencia artificial con reconocimiento de objetos). Por su inteligencia juzgan según el tamaño, dimensiones, color, brillo y resistencia a la tracción.
- Monitoreo de todas las corrientes de plantas de incineración con redes que usan un protocolo de comunicación de alto nivel (ZigBee)

# NUEVAS TECNOLOGÍAS WtE

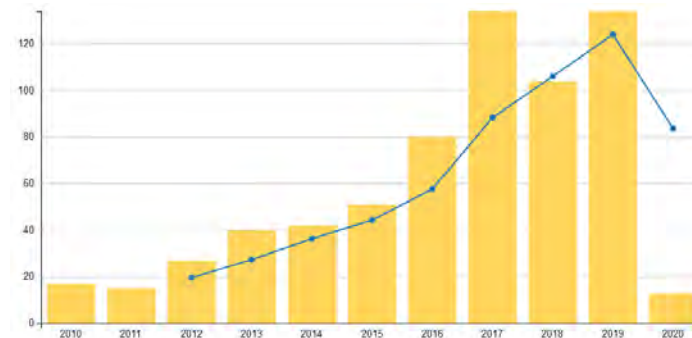
## “hydrothermal liquefaction”

123 patentes



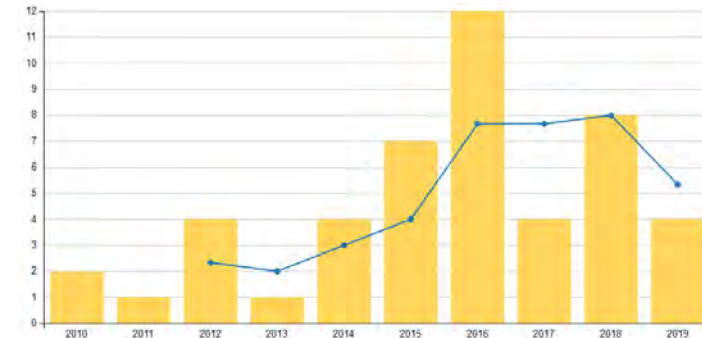
## “hydrothermal Carbonization”

657 patentes



## “Dark fermentation”

47 patentes



## “thermal depolymerization”

33 patentes



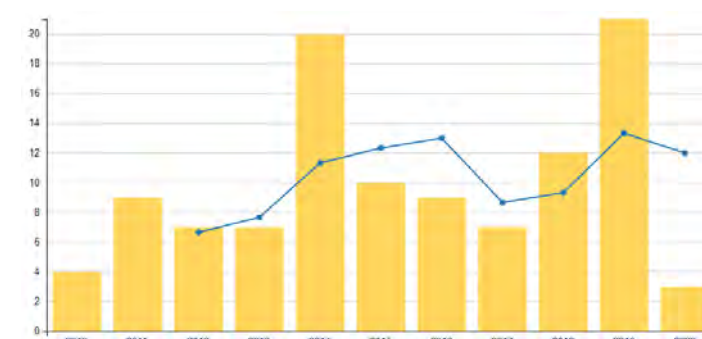
## “Microbial fuel cell”

1421 patentes



## “Microbial electrolysis cell”

109 patentes





# DESCRIPCIÓN NUEVAS TECNOLOGÍAS

## Hydrothermal liquefaction

### ¿Qué es?

Proceso de despolimerización térmica

### ¿Qué genera?

Aceite crudo, a veces denominado bio-aceite o biocrudo

Residuo tratado

Biomasa húmeda

## Hydrothermal Carbonization

### ¿Qué es?

Proceso químico para la conversión de compuestos orgánicos a carbonos estructurales

### ¿Qué genera?

Bio-carbón o hidrocarbon (hydrochar)

Residuo tratado

Biomasa húmeda

## Dark fermentation

### ¿Qué es?

Descomposición anaeróbica bacteriana en ambientes con ausencia de oxígeno y luz

### ¿Qué genera?

Biohidrógeno y Bioelectricidad

Residuo tratado

Sustratos orgánicos

## Microbial fuel cell

### ¿Qué es?

Dispositivos bio-electroquímicos que generan fenómenos orgánicos a partir de una amplia gama de sustratos mediante el uso de microorganismos bio-electrogénicos

### ¿Qué genera?

Bioelectricidad, biohidrógeno, tratamiento de aguas residuales

Residuo tratado

Biomasa y plásticos difíciles de procesar por otras tecnologías

## Microbial electrolysis cell

### ¿Qué es?

Tecnología inversa a las células de combustible microbiana que opera con una corriente eléctrica

### ¿Qué genera?

Biohidrógeno y metano

Residuo tratado

Residuos municipales

## Thermal depolymerization

### ¿Qué es?

Proceso de despolimerización que utiliza la pirólisis hidratada para la reducción de materiales orgánicos complejos

### ¿Qué genera?

Petróleo crudo ligero, Syngas

Residuo tratado

Biomasa y plásticos difíciles de procesar por otras tecnologías





# COMPARACIÓN TECNOLOGÍAS WtE

## TECNOLOGÍAS TERMOQUÍMICAS

Tecnología	Beneficios	Limitaciones	Producto primario	Aplicación
Incineración	<ul style="list-style-type: none"><li>• Adecuado para su alto poder calorífico</li><li>• Reduce el volumen y la masa hasta 80% y 70% respectivamente</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Altos costos de capital, mantenimiento y operación.</li><li>• Produce contaminantes nocivos</li><li>• Genera residuos sólidos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Calor</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Generación, electricidad y vapor / calor.</li></ul>
Co-combustión	<ul style="list-style-type: none"><li>• Permite utilizar la infraestructura instalada</li><li>• Mejora los rendimientos y flexibiliza la operación</li><li>• Reduce las emisiones de NOx</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Costos de operación e incertidumbres sobre el comportamiento de equipos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Calor</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Centrales térmicas, hornos Clinker</li></ul>
Pirólisis	<ul style="list-style-type: none"><li>• Produce combustible de alta calidad.</li><li>• Reduce el tratamiento de gases de combustión.</li><li>• Adecuado para residuos carbonosos</li><li>• Disminuye el volumen de residuos hasta 50-90%</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Alta viscosidad de pirolisis.</li><li>• Alto costo CAPEX y OPEX</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Carbón vegetal, bio-oil y syngas</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Electricidad, producción de químicos y solventes.</li></ul>
Torrefacción	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se obtiene un producto sólido hidrofóbico, bio- resistente, fácil de triturar y que retiene entre 70-90% del poder calorífico de la biomasa sin tratar, en menos del 80% de su peso</li><li>• Facilita el transporte y almacenamiento de pellets o briquetas (mayor densidad de energía)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Costos de adecuación de la biomasa</li><li>• Requiere etapas de densificación (peletización), es un proceso específico para biomasa celulósica</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Carbón vegetal</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Calentadores domésticos, generación de calor, Co-combustión</li></ul>

# COMPARACIÓN TECNOLOGÍAS WtE

## TECNOLOGÍAS TERMOQUÍMICAS

Tecnología	Beneficios	Limitaciones	Producto primario	Aplicación
Gasificación	<ul style="list-style-type: none"><li>• Producción de gas combustible/petróleo, que puede utilizarse para diversos fines.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tecnologías inmaduras, inflexibles y menos competitivas.</li><li>• Alto riesgo de falla.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Syngas</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Generación de electricidad y productos químicos</li></ul>
De-polimerización térmica	<ul style="list-style-type: none"><li>• Facilita el tratamiento de desechos plásticos difíciles de procesar a través de la acciones agentes hidrolíticos a altas temperaturas</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se requiere aplicar catalizadores químicos que permitan el tratamiento de polímeros generados por adición</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Petróleo crudo ligero, Syngas</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Electricidad, producción de químicos</li></ul>
Carbonización hidrotermal	<ul style="list-style-type: none"><li>• Se obtiene un sólido hidrofóbico que retiene entre el 80-95% del poder calorífico del material original en aproximadamente 55-90% de su peso</li><li>• Permite el tratamiento de un amplio tipo de biomasa, y no requiere adecuación.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Variabilidad de las características de los productos finales, debido a las condiciones del reactor y de la biomasa no pre tratada.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bio-carbon</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fotocatálisis, aplicaciones en agricultura, adsorción, secuestrador de CO2</li></ul>
Licuefacción hidrotermal	<ul style="list-style-type: none"><li>• Permite procesar biomasa húmeda de diferentes tipos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Para mejorar su eficiencia requiere ser combinada con tratamientos previos y posteriores apropiados</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bio-aceite</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Producción de gasolina y diésel sintéticos drop-in.</li></ul>

# COMPARACIÓN TECNOLOGÍAS WtE

## TECNOLOGÍAS BIOQUÍMICAS

Tecnología	Beneficios	Limitaciones	Producto primario	Aplicación
Compostaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permite la valorización de los residuos orgánicos mediante la degradación y estabilización del contenido de materia orgánica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se requieren programas de separación en la fuente, para la obtención de un producto de calidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Compost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abono, sustituto parcial de fertilizantes químicos</li> </ul>
Digestión anaeróbica	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se prefiere para biomasa con alto contenido de agua.</li> <li>Mayor composición de metano (CH<sub>4</sub>) y menor composición de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que el vertedero</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No apto para desechos que contienen menos materia orgánica.</li> <li>La lignina puede persistir durante períodos de tiempo muy largos para degradarse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Biogás</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Electricidad, fertilizante rico en nitrógeno</li> <li>Biorefinerías agrícola y alimentaria.</li> </ul>
Fermentación	<ul style="list-style-type: none"> <li>No contribuye al aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Esta limitado a desechos solidos ricos en almidón/celulosa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bioetanol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Combustible, y biorefinerías agrícolas</li> </ul>
Fermentación Oscura	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utiliza una amplia gama de sustratos biodegradables.</li> <li>Más factible para la producción en masa de H<sub>2</sub>, proceso independiente de la luz</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Gas H<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bioelectricidad</li> </ul>
Landfill Gas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bajo costo, los recursos naturales se reciclan al suelo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Contaminación de suelos y aguas subterráneas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gas de vertedero</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Electricidad</li> </ul>

# COMPARACIÓN TECNOLOGÍAS WtE

## TECNOLOGÍAS BIOELECTROQUÍMICAS

Tecnología	Beneficios	Limitaciones	Producto primario	Aplicación
<b>Celda de combustible biológica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un método eficaz de generación de electricidad y eliminación de olores de los residuos. Contribución cero a la emisión de GEI</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No funciona a temperaturas muy bajas porque las reacciones microbianas son lentas a bajas temperaturas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas H<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electricidad, producción de hidrógeno, tratamiento de aguas residuales</li> </ul>
<b>Celda de electrólisis microbiana</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor recuperación de producto (H<sub>2</sub>) y degradación del sustrato que la fermentación oscura y Celda de combustible biológica</li> <li>• Alta eficiencia de generación de hidrógeno</li> <li>• Bajo requerimiento de energía</li> <li>• Aplicabilidad a numerosos sustratos orgánicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos en el rendimiento por composición del sustrato</li> <li>• Alta resistencia interna</li> <li>• Arquitectura densa</li> <li>• Alto costo de capital</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, acetato, peróxido de hidrógeno, y ácido fórmico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizado para la generación de electricidad y tratamiento inmediato de aguas residuales</li> </ul>
<b>Procesos fotobiológicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las bacterias fotosintéticas pueden utilizar una amplia energía espectral</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las enzimas nitrogenadas se inhiben en presencia de O<sub>2</sub>. La eficiencia de conversión de luz es baja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, ácidos orgánicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Electricidad</li> </ul>

# COMPARACIÓN TECNOLOGÍAS WtE

## TECNOLOGÍAS QUÍMICAS

Tecnología	Beneficios	Limitaciones	Producto primario	Aplicación
Transesterificación	<ul style="list-style-type: none"><li>Los parámetros del proceso son fácilmente ajustable según la materia prima</li><li>Es un proceso económico</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>La presencia de agua en las materias primas pueden generar alta saponificación, y bajo rendimiento del biodiesel producto del proceso</li><li>Aspectos logísticos para la recuperación de materias primas como aceite vegetal crudo, aceite de cocina usado, grasa animal y otros</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Biodiesel</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Combustible, electricidad</li></ul>
Esterificación	<ul style="list-style-type: none"><li>La esterificación es un proceso industrialmente importante utilizado para productos farmacéuticos, alimentos, sabores y biocombustibles (biodiesel).</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Se deben emplear mezclas de catalizadores ácidos para mejorar la reacción, y poder hacer mas eficiente el proceso a través de la recuperación de estos catalizadores para su reutilización</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Biodiesel</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Combustible, electricidad</li></ul>

## COMPAÑÍAS DESTACADAS

**XYLECO INC** • NOVOZYMES AS

ANAERGIA INC

CHINOOK END STAGE RECYCLING LTD

RENESCIENCE AS • DEGREMONT

ORGANIC ENERGY CORP

BP CORP NORTH AMERICA INC

ADVANCED PLASMA POWER LTD • GEN ELECTRIC

PYROPURE LTD • VERENIUM CORP

D C WATER & SEWER AUTHORITY

KOBELCO ECO SOLUTIONS CO LTD • ECOGENSUS LLC

THERMOCHEM RECOVERY INT INC • ACCORDANT ENERGY LLC

FULCRUM BIOENERGY INC • NOVOZYMES NORTH AMERICA INC

INVISTA NORTH AMERICA SARL

HAMPTON ROADS SANITATION DISTR • BP BIOFUELS UK LTD

CHINOOK SCIENCES LTD • SUEZ INT • KASHONG LLC

**Xyleco**

Desarrolla tecnología de uso propietario para la elaboración de combustible celulósicos

Cerca de 2700 patentes en toda su historia, y marcado interés por el bio-etanol celulósico (Y02E50/16)

 **Chinook Sciences**

Desarrollo y comercialización de tecnología para conversión de biomasa y carbón de baja calidad en productos ambientales de alto valor y combustible renovable

Cerca de 200 patentes en toda su historia, y marcado interés por los procesos de gasificación de desechos (C10j2300/0946)

**novozymes**®   
Rethink Tomorrow

Desarrolla tecnología de uso propietario para la producción comercial de etanol celulósico, y de enzimas para la industria de biocombustibles

Cerca de 12 mil patentes en toda su historia y marcado interés por el bio-etanol celulósico (Y02E50/16) y las preparación que contienen enzimas (C11D3/386)

 **Anaergia**  
Breaking Barriers to Sustainability

Desarrollo y comercialización de tecnología para el tratamiento de residuos sólidos municipales (digestión anaeróbica, tratamiento biológico)

Cerca de 200 patentes en toda su historia, y marcado interés por los procesos de fermentación de subproductos orgánicos (Y02E50/343)

 **REnescience**®  
value from waste

Desarrolla soluciones energéticas uso propietario como Hidrogeno verde, energía eólica y WtE, y almacena y comercializa esta energía.

Cuenta con 60 patentes en su historia pero cerca del 50% relacionadas con WtE, con un marcado interés por Tecnologías habilitadoras o tecnologías con una contribución potencial o indirecta a la mitigación de emisiones de GEI (Y02E50/343)



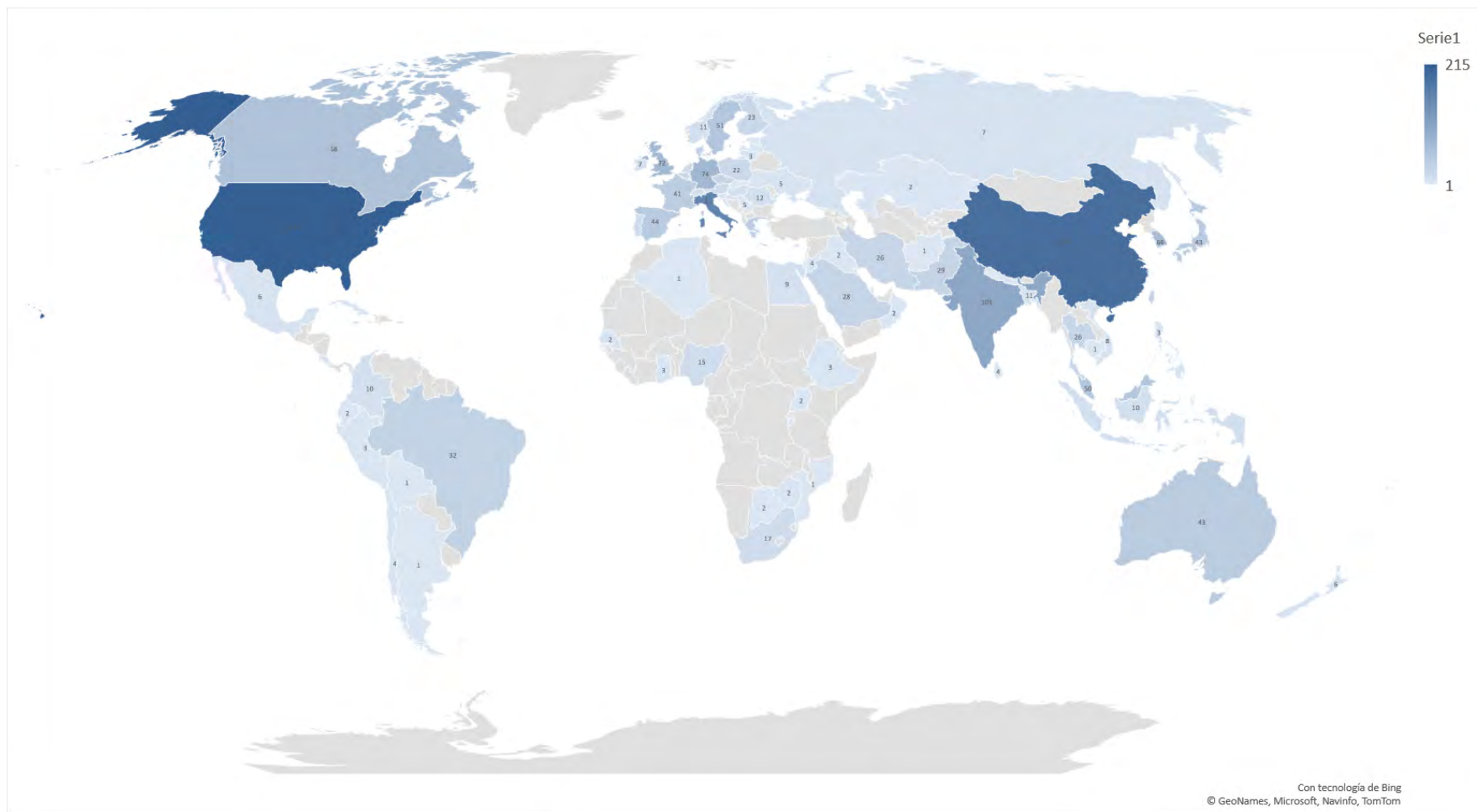
## TENDENCIAS EN INVESTIGACIÓN

- Se identificó un total de **1434** publicaciones científicas en el tema a nivel mundial para los últimos **10 años**.
- El **57%** de las publicaciones se concentra en los últimos 4 años, estando 2020 aún en desarrollo.
- El año **2019** es el que presenta una mayor cantidad de publicaciones con un total de **276** y una tasa de crecimiento del **28.3%** respecto a 2018.



El tema presenta un alto interés para investigadores de todo el mundo y se prevé que siga creciendo en torno a un **25% anual**. El número de investigadores interesados en la materia prácticamente se ha **duplicado** entre 2016 y 2019 pasando de 503 a 960 a nivel mundial.

## PAÍSES LÍDERES EN INVESTIGACIÓN



Se identificó un total de **95 países** que investigan en el tema. Entre los 5 países líderes destacan **Estados Unidos** (15%), **China** (13.3%), **Italia** (10.7%), **India** (7%) y **Alemania** (5.1%) quienes en su conjunto concentran el **51%** del total mundial de las publicaciones científicas sobre esta materia. En América Latina destacan Brasil con 32 registros, Colombia con 10, México con 6, Chile con 4 y Perú con 3.

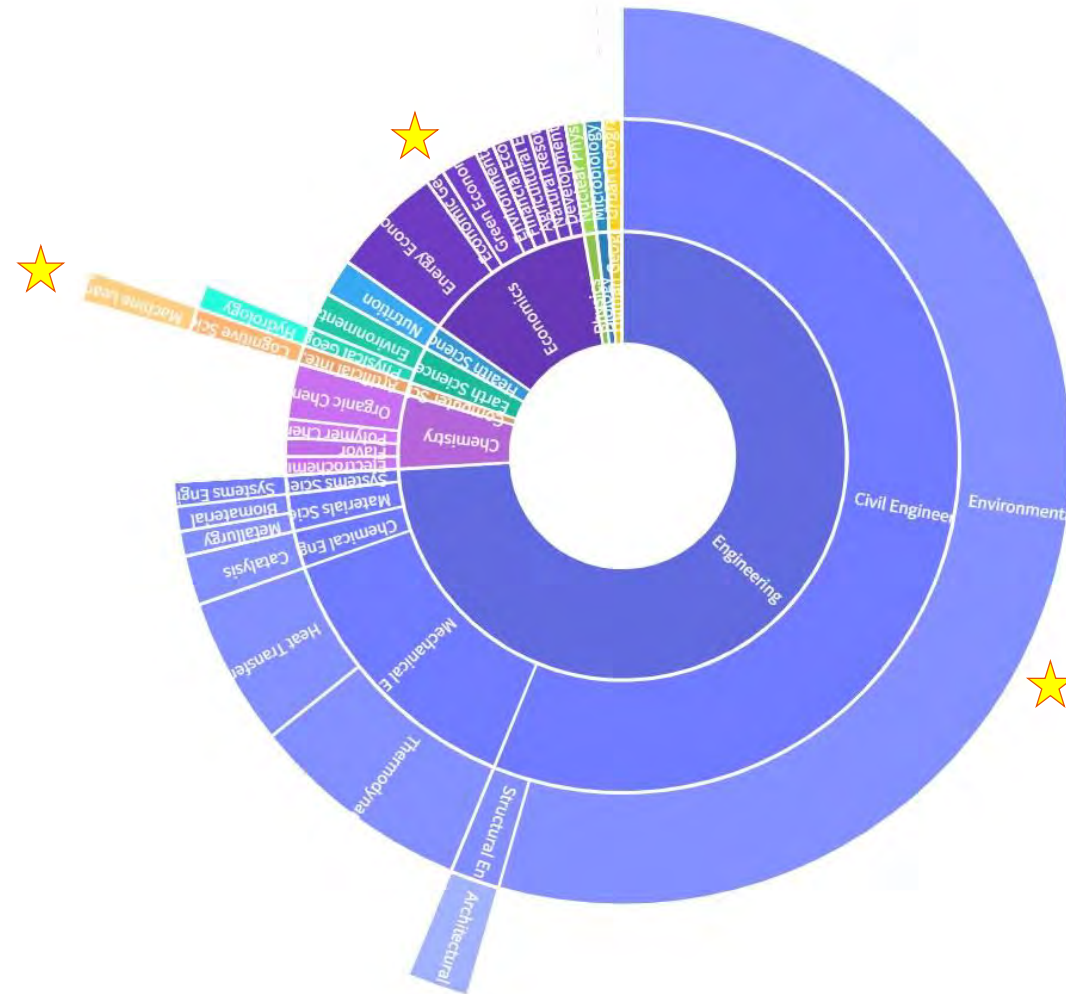
# INSTITUCIONES LÍDERES EN INVESTIGACIÓN



Se identificó un total de **1462 instituciones** que investigan en el tema. Entre las 5 instituciones líderes destaca **National University of Singapore** (Singapur) con 37 registros, **Sejong University** (Korea) con 36, **Polytechnic University of Milan** (Italia) con 28, **Indian Institute of Technology** (India) con 23, y **Columbia University** (EUA) con 21 registros. En Chile destacan la Universidad de Santiago y la Universidad de Concepción, con 2 registros cada una.

## TEMAS DE INVESTIGACIÓN

- El gráfico visualiza la distribución de las áreas temáticas de mayor interés de investigación para el período 2019 y 2020 donde es posible apreciar la predominancia de las **ingenierías**, particularmente temas relacionados con **ingeniería ambiental**, **termodinámica**, **transferencia de calor** y **catálisis** entre otras.
- Otra área de importancia tiene que ver con las **ciencias económicas**, particularmente **desarrollo sustentable**, **economía verde** y **energía**.
- De forma incipiente es posible observar temas nuevos como lo son **inteligencia artificial** y **machine learning**, así como química orgánica y nutrición.



Machine learning e inteligencia artificial aparecen como nuevas áreas de investigación en el tema aplicables principalmente a la gestión de instalaciones y residuos, así como el monitoreo y optimización de procesos, entre otras opciones.



# TEMAS DE INVESTIGACIÓN

Una mirada más profunda nos permite observar algunas de las siguientes tendencias:

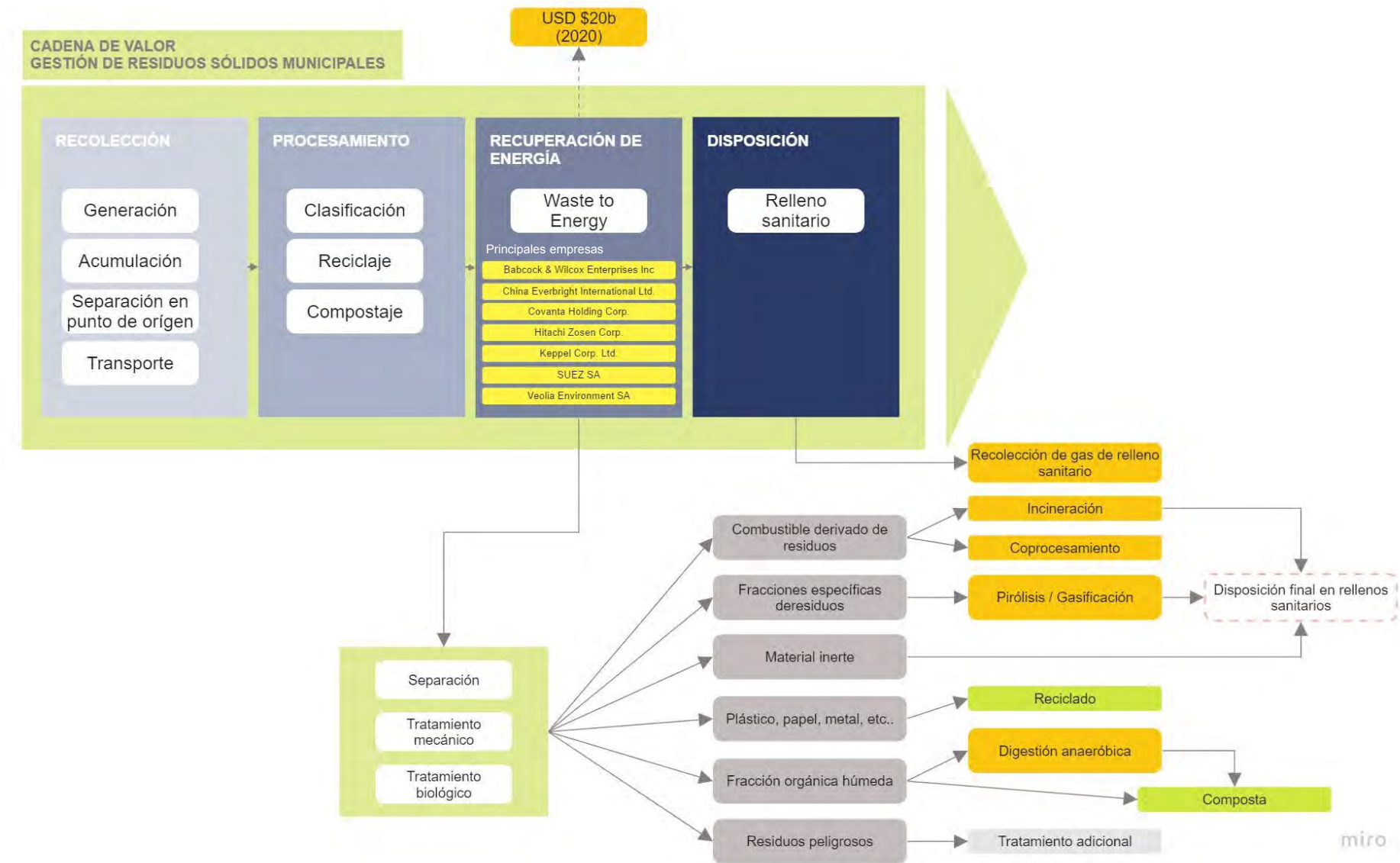
Tema	Tendencia - casos
Análisis Económico	Determinación del potencial de adopción de tecnologías WtE a partir del análisis técnico económico teniendo en cuenta los siguientes aspectos: retorno de la inversión, valor presente neto, margen de utilidad, tasa interna de retorno, análisis de sensibilidad, modelo de financiación.
Análisis de escenarios	Identificación de las mejores alternativas de manejo integral de residuos sólidos bajo posibles escenarios que incorporan tecnologías WtE o biorrefinerías urbanas usando como herramienta el análisis de ciclo de vida. (emisiones de la combustión de la planta y de los vehículos recolectores, redes inteligentes futuras de distribución de energía, promoción de estrategias 3Rs, mejoramiento de tecnologías ya instaladas, controles de polución, integración de basura a la economía del hidrógeno.
Estrategias para el mejoramiento del reciclaje	<ul style="list-style-type: none"><li>• Identificación con marcadores fluorescentes de acuerdo al tipo de polímero</li><li>• Indicaciones sobre qué materiales reciclar y cuáles incinerar para mejorar las características deseables de los residuos sólidos urbanos como combustibles.</li><li>• Documentación de evolución de la selección en la fuente que ha facilitado el aprovechamiento de residuos sólidos urbanos sin pretratamiento en plantas de cemento y generación de potencia (caso Norte de Italia).</li></ul>
Simulaciones CFD	Simulación con programas de fluido-dinámica comerciales, del proceso de recuperación de energía a partir de residuos con el fin de identificar retos para el mejoramiento de la tecnología desde el punto de vista de la transferencia de masa y calor.
Recuperación de elementos y compuestos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Recuperación de acero, cobre y estaño de las cenizas de fondo en los incineradores.</li><li>• Recuperación de TiO2 utilizado como pigmento en pinturas.</li><li>• Proceso integrado de “landfill mining” e instalación WtE que permite recuperar metales ferrosos y no ferrosos de las cenizas.</li><li>• Tratamiento con ácido y electrólisis (FLUREC) permite obtener Zn con pureza del 99,9%.</li><li>• Recuperación de Pb, Cd, As, y Al en corrientes derivadas de una planta gasificación plasma a alta temperatura.</li></ul>
Termo-valorización de combustibles producidos con residuos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Creación de un combustible RDF para uso en plantas de cemento</li><li>• Uso de plásticos (incluso PVC) y llantas en procesos pirolíticos.</li><li>• Comparación de emisiones del MSW y RDF/SRF.</li></ul>
Mejoras tecnológicas del proceso termoquímico	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aumento de la eficiencia en incineradores de parrilla viajera utilizando radiadores, mejorando la relación aire-combustible, prevención de formación de contaminantes, descarga seca de cenizas de fondo.</li><li>• Separación in-situ de impurezas más densas mediante sistemas fluidizados rotativos.</li><li>• Desarrollo en resistencia de materiales y tecnologías de revestimiento para reducir la corrosión en plantas WtE.</li></ul>



# ANÁLISIS ESTRATÉGICO



CADENA DE VALOR



## PRINCIPALES EMPRESAS



- ❖ Multinacional estadounidense con 150 años de historia
- ❖ Portafolio de productos y servicios muy desarrollado
- ❖ Presencia fuerte a nivel mundial
- ❖ Importante desarrollo de tecnologías ambientales
- ❖ Actualmente desarrolla la planta más grande del mundo en China



- ❖ Proveedor de soluciones ambientales integradas en China.
- ❖ Más de 120 proyectos en China
- ❖ Foco en energía ambiental, agua ambiental, construcción ambiental y tecnología ambiental.
- ❖ Anualmente procesa casi 36.2 millones de toneladas de residuos



- ❖ Multinacional japonesa especializada en recuperación de energía a partir de residuos.
- ❖ Presencia a nivel mundial con más de 500 plantas WtE.
- ❖ Foco en procesos térmicos y biológicos.
- ❖ Completo portafolio de servicios relacionados

## TENDENCIAS A SER CONSIDERADAS

- ❑ Dominio de las tecnologías WtE de base térmica
- ❑ Crecimiento de los residuos sólidos municipales
- ❑ Importante crecimiento de las tecnologías WtE biológicas
- ❑ Aparición de nuevas tecnologías como carbonización hidrotermal
- ❑ Importancia del marco regulatorio como driver o restrictor de WtE
- ❑ Cuestionamiento ambiental e impacto negativo en la salud de las personas
- ❑ Impacto financiero
- ❑ Necesidad de establecer una estrategia que priorice la jerarquía de gestión de residuos (foco en fracción de rechazo).



Figura 8. desafíos para los países en vías de desarrollo definidos por UNEP.

## CONSIDERACIONES ONU

El **Programa Medioambiental de Naciones Unidas** (UNEP por sus siglas en inglés) entrega algunas sugerencias para el desarrollo de políticas públicas relacionadas con la adopción de WtE, en un marco integrado de gestión de residuos.

Se pueden resumir en 4 puntos centrales:

1. Consideraciones preliminares
2. Consideraciones técnicas
3. Consideraciones habilitantes
4. Consulta a los grupos de interés

Se puede acceder al detalle de las recomendaciones en el siguiente link:  
<https://www.unenvironment.org/ietc/resources/publication/waste-energy-considerations-informed-decision-making>



Figura 9. Recomendadas de Naciones Unidas. (Fuente UNEP. Adaptación D&W)



# ELEMENTOS PARA LA DISCUSIÓN



## COMPONENTE MERCADO

- El mercado WtE bordea los USD **\$20.7b** y se proyecta que alcance los USD \$27.7b en 2025, con un CAGR del **6,1%**.
- El **segmento térmico** representa alrededor del 87% del mercado mundial con cerca de USD \$18b y la incineración ocupa casi el 55,% de este segmento.
- El segmento biológico del mercado de WtE bordea los USD **\$2.8b** y se prevé que alcance los USD \$3.77b para 2025.
- **Asia Pacífico** lidera el crecimiento del mercado con China y Japón a la cabeza.
- Las tecnologías térmicas de **gasificación y pirólisis**, así como los sistemas biológicos de **digestión anaeróbica** están comenzando a entrar con fuerza y se espera un aumento sostenido de sus cuotas de mercado.
- El mercado WtE con incineración está restringido por el alto costo de los incineradores, particularmente a medida que los precios de la energía disminuyen y varias plantas no logran cubrir sus costos operativos.
- El desarrollo de marcos regulatorios cada vez más estrictos en relación a emisiones y mitigación de desechos, obliga a los proyectos, particularmente de incineración, a invertir en diversas tecnologías con este fin.



## COMPONENTE TECNOLÓGICO

- Las tecnologías térmicas presentan la mayor madurez y participación en el mercado.
- Las tecnologías biológicas, como la **digestión anaeróbica**, presentan una alta madurez y crecimiento.
- Se identifican nuevas tecnologías alternativas de interés como por ejemplo: **celdas de combustible biológico, celdas de electrólisis microbiana, procesos fotobiológicos, depolimerización térmica, carbonización hidrotermal y la licuefacción hidrotermal.**
- Se observa un amplio desarrollo de **tecnologías ambientales habilitadoras** para la mitigación de emisiones de GEI y eliminación de diferentes contaminantes, como limpieza de gases de combustión, precipitadores electrostáticos, manejo de cenizas, control de mercurio, control de furanos, control de dioxinas, control de Nox y material particulado entre otras.
- No todas las tecnologías WtE tienen los mismos niveles de **emisiones contaminantes** por lo que se hace necesaria una revisión focalizada y caso a caso que permita contar con datos objetivos sobre el abanico de tecnologías disponibles.



# BIBLIOGRAFÍA

## BIBLIOGRAFÍA

- Beyene, H. D., Werkneh, A. A., & Ambaye, T. G. (2018). Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. *Renewable Energy Focus*, 24, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2017.11.001>
- Bosmans, A., Vanderreydt, I., Geysen, D., & Helsen, L. (2013). The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review. *Journal of Cleaner Production*, 55, 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.032>
- Dement'ev, K. I., Palankoev, T. A., Alekseeva, O. A., Babkin, I. A., & Maksimov, A. L. (2019). Thermal depolymerization of polystyrene in highly aromatic hydrocarbon medium. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 142, 104612. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.05.001>
- Jung, S., Lee, J., Park, Y.-K., & Kwon, E. E. (2020). Bioelectrochemical systems for a circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 300, 122748. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122748>
- Moya, D., Aldás, C., Jaramillo, D., Játiva, E., & Kaparaju, P. (2017). Waste-To-Energy Technologies: an opportunity of energy recovery from Municipal Solid Waste, using Quito - Ecuador as case study. *Energy Procedia*, 134, 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.537>
- Mu, D., Liu, H., Lin, W., Shukla, P., & Luo, J. (2020). Simultaneous biohydrogen production from dark fermentation of duckweed and waste utilization for microalgal lipid production. *Bioresource Technology*, 302, 122879. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122879>
- Nastro, R. A., Falcucci, G., Minutillo, M., & Jannelli, E. (2017). Microbial Fuel Cells in Solid Waste Valorization: Trends and Applications. In *Modelling Trends in Solid and Hazardous Waste Management* (pp. 159–171). Singapore: Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2410-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2410-8_9)
- Seiple, T. E., Skaggs, R. L., Fillmore, L., & Coleman, A. M. (2020). Municipal wastewater sludge as a renewable, cost-effective feedstock for transportation biofuels using hydrothermal liquefaction. *Journal of Environmental Management*, 270, 110852. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110852>
- Shen, Y. (2020). A review on hydrothermal carbonization of biomass and plastic wastes to energy products. *Biomass and Bioenergy*, 134, 105479. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105479>
- Sodhi, A. K., Tripathi, S., & Kundu, K. (2017). Biodiesel production using waste cooking oil: a waste to energy conversion strategy. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(6), 1799–1807. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1357-6>
- Trabold, T. A., & Babbitt, C. W. (2018). *Sustainable Food Waste-To-energy Systems*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00715-5>
- Zhang, Y., & Chen, W.-T. (2018). Hydrothermal liquefaction of protein-containing feedstocks. In *Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications* (pp. 127–168). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101029-7.00004-7>

