

**Aprovechamiento de rellenos sanitarios y proyectos de minería a cielo abierto clausurados  
para generación de energías renovables. estado del arte**

**Juan David Villabona Guesguan**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Director:**

**Alvaro Viviescas Jaimes**

**PhD en Ingeniería Civil**

**Codirector:**

**Angelica Corzo Hernandez**

**PhD en Ingeniería Civil**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2020**

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	15
1. Objetivos .....	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Metodología .....	18
2.1 Criterios de búsqueda.....	18
2.2 Criterios de selección .....	19
3. Análisis de Documentos .....	20
4. Análisis y discusión de resultados .....	21
4.1 Aprovechamiento de los rellenos sanitarios clausurados para la generación de energía renovable.....	24
4.1.1 Energía solar. ....	24
4.1.1.1 Sistema de energía solar en el relleno sanitario Tessman Road, Estados Unidos. ....	25
4.1.1.2 Sistema de energía solar en el relleno sanitario de Hartford, Estados Unidos. ....	26
4.1.1.3 Sistema de energía solar en el relleno sanitario de Hellsiek, Alemania .....	27
4.1.1.4 Sistema de energía solar en relleno sanitario de Hickory Ridge, Estados Unidos. ....	27
4.1.1.5 Sistema de energía solar en el relleno sanitario La Loma los Colorados, Chile.....	28
4.1.1.6 Sistema de energía solar en el relleno sanitario de Mohács, Hungría. ....	28

4.1.1.7 Sistema de energía solar en el relleno sanitario de Tiretta, Italia. ....	29
4.1.1.8 Sistema de energía solar en relleno sanitario de Annapolis, Estados Unidos.....	30
4.1.1.9 Sistema de energía solar en relleno sanitario de Cuyahoga County, Estados Unidos. ....	30
4.1.2 Cultivos bioenergéticos para la producción de biocombustibles.....	31
4.1.2.1 Cultivos para la producción de biocombustibles en zonas contaminadas. ....	32
4.1.3 Energía geotérmica. ....	33
4.1.3.1 Sistema de energía geotérmica en relleno sanitario de New Hampshire, Estados Unidos. .....	35
4.1.4 Gases de relleno sanitario. ....	35
4.1.4.1 Sistema de recolección de biogás para la producción de energía en el relleno sanitario clausurado de Prados de la Montaña, México. ....	37
4.1.5 Energía eólica.....	38
4.1.5.1 Sistema de energía eólica en el relleno sanitario de Hull, Estados Unidos. ....	39
4.1.5.2 Sistema de energía eólica en relleno sanitario de Cranberry Road, Estados Unidos.....	40
4.1.6 Sistemas integrados de energía renovable. ....	41
4.1.6.1 Sistema integrado de energía renovable en el relleno sanitario de Roncayette, Italia. ....	41
4.1.6.2 Sistema integrado de energía renovable en relleno sanitario de Semakau, Singapur. ....	42
4.1.6.3 Sistema integrado de energía renovable en relleno sanitario La Loma los Colorados, Chile.....	43
4.2 Aprovechamiento de proyectos mineros clausurados o abandonados para la generación de energía renovable .....	44
4.2.1 Energía solar. ....	44
4.2.1.1 Sistema de energía solar en la mina Meuro, Alemania.....	44

4.2.1.2 Sistema de energía solar en la mina de Chevron Questa, Estados Unidos. ....	45
4.2.1.3 Sistema de energía solar en la mina de Chuicamata, Chile. ....	46
4.2.1.4 Sistema de energía solar flotante en la mina Los Bronces, Chile. ....	46
4.2.1.5 Sistema de energía solar en la mina de Wheal Jane, Reino Unido. ....	47
4.2.1.6 Sistema de energía solar en una mina en Visonta, Hungría. ....	48
4.2.2 Energía eólica. ....	48
4.2.2.1 Sistema de energía eólica en la mina Dave Jhonston, Estados Unidos. ....	49
4.2.2.2 Sistema de energía eólica en la mina de Somerset, Estados Unidos. ....	49
4.2.2.3 Sistema de energía eólica en antigua mina de carbón en Escocia, Reino Unido. ....	50
4.2.2.4 Sistema de energía eólica en una mina de Pensilvania, Estados Unidos. ....	51
4.2.3 Cultivos energéticos para la generación de biocombustibles. ....	51
4.2.3.1 Caso Wise County, Estados Unidos. ....	51
4.2.3.2 Caso minería ilegal, Ghana. ....	52
4.2.4 Sistemas integrados de energía renovable ....	52
4.2.4.1 Sistema híbrido en la mina de Prosper-Haniel, Alemania. ....	52
4.2.4.2 Sistema híbrido en Queensland, Australia. ....	53
4.2.4.3 Sistema híbrido en la mina de Agnew, Australia. ....	54
5. Análisis de la posible implementación en Colombia. ....	55
5.1 Rellenos sanitarios ....	55
5.2 Caso Bucaramanga. ....	56
5.2.1 Descripción del sitio. ....	56
5.2.2 Recomendaciones para la generación de energías renovables en el relleno sanitario El Carrasco. ....	57

---

5.2.2.1 Parque solar.....	58
5.2.2.2 Biogás. ....	58
5.2.2.3 Cultivos bioenergéticos.....	58
5.2.2.4 Sistema híbrido de energía solar y biogás.....	59
6. Conclusiones.....	60
Referencias Bibliográficas .....	62

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Distribución de artículos por año.....	21
<i>Figura 2.</i> Distribución de número de artículos por revista.....	22
<i>Figura 3.</i> Distribución de artículos por país. ....	22
<i>Figura 4.</i> Distribución de artículos por región. ....	23
<i>Figura 5.</i> Sistema de paneles solares fotovoltaicos sobre el relleno sanitario Tessman Road. ....	26
<i>Figura 6.</i> Sistema de paneles solares en el relleno sanitario de Hartford, Estados Unidos.....	26
<i>Figura 7.</i> Parque solar en relleno sanitario de Hellsiek, Alemania. ....	27
<i>Figura 8.</i> Paneles solares fotovoltaicos flexibles situados sobre el relleno sanitario de Hickory Ridge, Estados Unidos.....	28
<i>Figura 9.</i> Sistema de paneles solares fotovoltaicos en el relleno sanitario La Loma los Colorados, Chile.....	28
<i>Figura 10.</i> Paneles solares fotovoltaicos en el relleno sanitario de Mohács, Hungría. ....	29
<i>Figura 11.</i> Instalación de paneles solares fotovoltaicos en relleno sanitario de Tiretta, Italia. ....	29
<i>Figura 12.</i> Paneles solares en relleno sanitario de Annapolis, Estados Unidos. ....	30
<i>Figura 13.</i> Sistema de paneles solares fotovoltaicos sobre el relleno sanitario de Cuyahoga County, Estados Unidos.....	31
<i>Figura 14.</i> Sistema vertical de energía geotérmica para rellenos sanitarios clausurados. (a) Vista de perfil; (b) Vista en planta. ....	34

*Figura 15.* Instalación de sistema de extracción de energía geotérmica en relleno sanitario de New Hampshire, Estados Unidos. .... 35

*Figura 16.* Estimación de emisión de metano en el relleno sanitario de Al Akeeder..... 37

*Figura 17.* Sistema de extracción de biogás en el relleno sanitario de Prados de la montaña, México. Los puntos negros representan los tubos de extracción..... 38

*Figura 18.* Turbina eólica situada sobre el relleno sanitario de Hull, Estados Unidos..... 40

*Figura 19.* Turbina eólica en el relleno sanitario de Kingston, Estados Unidos. .... 41

*Figura 20.* Sistema híbrido de extracción de biogás y paneles solares fotovoltaicos en el relleno sanitario de Roncayette, Italia..... 42

*Figura 21.* Sistema híbrido de energía eólica en el relleno sanitario de Semakau, Singapur..... 43

*Figura 22.* Sistema de paneles solares fotovoltaicos situados en la antigua mina de Meuro, Alemania. .... 45

*Figura 23.* Sistema de paneles solares fotovoltaicos en la mina de Chevron Questa..... 45

*Figura 24.* Paneles solares fotovoltaicos en la mina de Chuicamata, Chile. .... 46

*Figura 25.* Paneles solares fotovoltaicos flotantes sobre el embalse artificial en la mina de cobre Los Bronces, Chile..... 47

*Figura 26.* 5600 paneles solares situados en la antigua mina de Wheal Jane, Reino Unido..... 47

*Figura 27.* Sistema de paneles solares fotovoltaicos en zona de la antigua mina de lignito de Visonta, Hungría. .... 48

*Figura 28.* Parque eólico situado en la antigua mina de carbón Dave Jhonston, Estados Unidos 49

*Figura 29.* Sistema de energía eólica en mina abandonada de Somerset, Estados Unidos ..... 50

*Figura 30.* Parque eólico Black Law, Escocia, Reino Unido. .... 51

*Figura 31.* Preparación del terreno para plantar cultivos bioenergéticos en la mina abandonada de Wise County, Virginia. .... 52

*Figura 32.* Sistema de energía removable en la antigua mina de carbón Prosper-Haniel. .... 53

*Figura 33.* Sistema de paneles solares en una mina de oro clausurada en Queensland, Australia. .... 54

*Figura 34.* Pozos que serán utilizados para la generación de electricidad en mina de Queensland, Australia. .... 54

*Figura 35.* Sistema de paneles solares fotovoltaicos y turbinas eólicas en la mina de Agnew, Australia. .... 55

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Número de menciones de artículos por tipo de terreno (Relleno sanitario o proyecto minero)</i> .....	23
Tabla 2. <i>Número de menciones del tipo de energía renovable por tipo de terreno.</i> .....	23

## **Lista de Apéndices**

Ver documentos adjuntos en el CD y pueden ser visualizados en la base de datos de la Biblioteca

UIS

Apéndice A. Metodología

## Resumen

**Título:** Aprovechamiento de rellenos sanitarios y proyectos de minería a cielo abierto clausurados para generación de energías renovables. estado del arte.\*

**Autor:** Juan David Villabona Guesguan \*\*

**Palabras clave:** Rellenos sanitarios clausurado, minas a cielo abierto cerradas/abandonadas, tierras contaminadas, energía renovable.

### Descripción

La creciente demanda energética junto con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero debido al uso desmedido de combustibles fósiles ha llevado a la comunidad internacional a buscar una transición hacia las energías renovables. Sin embargo, este tipo de proyectos enfrenta varios obstáculos para su desarrollo, entre ellos, los elevados costos que requiere la adquisición de tierras. No obstante, durante la última década se ha desarrollado una iniciativa a nivel mundial que consiste en usar tierras contaminadas, como rellenos sanitarios o zonas de proyectos mineros a cielo abierto, para el desarrollo de proyectos de energía renovable.

Durante la elaboración de este proyecto se realizó una revisión sistemática de la literatura sobre los tipos de energías renovables que se han desarrollado alrededor del mundo en rellenos sanitarios y proyectos de minería a cielo abierto clausurados, también denominados como tierras contaminadas. Así mismo, se realizan algunas recomendaciones para el relleno sanitario “El Carrasco” en Bucaramanga, Colombia, para la implementación de proyectos de energía renovable ante su inminente clausura.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Alvaro Viviescas Jaimes PhD en Ingeniería Civil Codirector: Angelica Corzo Hernandez PhD en Ingeniería Civil

## Abstract

**Title:** Use of sanitary landfills and closed-pit mining projects closed for renewable energy generation. state of the art\*

**Author** Juan David Villabona Guesguan \*\*

**Key words:** Closed landfills, open-pit abandoned mines, contaminated lands, renewable energy.

### Descripción

The growing energy demand along with the increase of greenhouse gas emissions due to the excessive use of fossil fuels has led the international community to seek a transition to renewable energies. However, these type of projects face several obstacles to its development, including the high land acquisition costs. However, during the last decade, a worldwide initiative for the use of contaminated land, such as sanitary landfills or open pit mining areas, has been established for the development of renewable energy projects.

During the development of this project, a systematic review of the literature about the types of renewable energies that were developed around the world in sanitary landfills and closed-pit mining projects, also known as contaminated lands, was carried out. Likewise, some recommendations were made for “El Carrasco” landfill in Bucaramanga, Colombia, for the implementation of renewable energy projects before its imminent closure.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Alvaro Viviescas Jaimes PhD en Ingeniería Civil Codirector: Angelica Corzo Hernandez PhD en Ingeniería Civil

## Introducción

Con la creciente preocupación por el calentamiento global, tras el aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, la necesidad de fuentes de energía sostenibles y renovables ha sido reconocida durante mucho tiempo (Hansen et al., 2017). Así mismo, se espera que el uso de energía global aumente debido al crecimiento de la población y el desarrollo industrial. Una estimación conservadora es el consumo de energía en 2050 alrededor de 30 TW en comparación con los 17 TW actuales (Narbel & Hansen, 2014).

Dichos motivos han llevado a la comunidad en general a buscar una transición de fuentes de energías fósiles a energías renovables. No obstante, el elevado costo de estos proyectos ha obstaculizado su implementación, especialmente, en países en vía de desarrollo. Dentro de los factores que influyen directamente en el costo del proyecto se encuentran: (i) el elevado costo de las tierras; (ii) la construcción de vías de acceso; (iii) la construcción del sistema de conexión entre la planta generadora de energía renovable y el Sistema Interconectado Nacional.

Sin embargo, varios países alrededor del mundo han logrado afrontar estos inconvenientes, e, incluso, han solucionado, al mismo tiempo, otros de sus problemas, al destinar tierras contaminadas e improductivas, como lo son los rellenos sanitarios clausurados o los proyectos mineros clausurados, para el desarrollo de proyectos de energías renovables. En especial, en los Estados Unidos, donde la EPA (Environmental Protection Agency) y el NREL (National Renewable Energy Laboratory) quienes forman el proyecto RE-powering America's Land, en el

cual estudian la factibilidad de instalar paneles solares o turbinas eléctricas en sitios que ellos llaman, tierras marginadas o contaminadas (Epa, 2009; Salasovich & Mosey, 2011)

Las ventajas de utilizar dichos sitios son, entre otras, que sus facilidades cuentan con vías de acceso existentes, lo cual facilitaría significativamente el transporte de los equipos para la construcción de una planta de energía renovable. Así mismo, estas tierras son generalmente desaprovechadas, difíciles de cultivar, tienen bajo valor económico y un amplio potencial de desarrollo (Milbrandt et al., 2014). Por otra parte, estos sitios se encuentran, generalmente, conectados a la red eléctrica (Szabó et al., 2017).

El propósito de este artículo es dar a conocer las diferentes alternativas que se han llevado a cabo en diferentes lugares del mundo para la utilización de sitios contaminados (rellenos sanitarios y proyectos mineros clausurados), como plantas de generación de energías renovables.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Identificar, a partir de una revisión sistemática de literatura, qué tipos de energías renovables pueden ser generados a partir del aprovechamiento de zonas clausuradas en rellenos sanitarios y/o proyectos de minería a cielo abierto.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Determinar los tipos más usuales de energía renovable que han sido desarrollados a partir del aprovechamiento de zonas clausuradas en rellenos sanitarios y/o proyectos de minería a cielo abierto.

Identificar qué tipos de energía renovable son viables para generación en el relleno sanitario “El Carrasco” Bucaramanga.

## 2. Metodología

Para la elaboración de este artículo se utilizó la metodología usada por (Bourcet, 2020).

### 2.1 Criterios de búsqueda

Primero, se estableció un tema específico. Segundo, se definieron ciertas palabras clave para realizar la búsqueda en unas bases de datos ya establecidas. Tercero, se formularon ciertos criterios de selección para elegir artículos relevantes sobre el tema. Finalmente, se realizó una base de datos para analizar la información recolectada.

De esta manera, se estableció que el tema de estudio era Tipos de energía renovable que se pueden producir en rellenos sanitarios o proyectos mineros clausurados. Se estableció que las bases de datos a utilizar serían Science Direct, Taylor and Francis, Scopus y Google Académico. Posteriormente, Con el fin de obtener la mayor cantidad de documentos relacionados al tema de estudio, se determinó que se integrarían sinónimos formando diferentes categorías. Los sinónimos estarían conectados entre sí utilizando el conector “Ó”, mientras que las categorías utilizando el conector “Y”, de la siguiente manera:

- (“renewable” Ó “renewable energ” Ó “renewable electric”) Y (“landfill” Ó “municipal solid waste” Ó “dump”)
- (“renewable” Ó “renewable energ” Ó “renewable electric”) Y (“mine” Ó “mining”)

Adicionalmente, se estableció que los años de publicación debían estar entre 2000 y 2020. Durante este proceso se encontraron 179 artículos.

## 2.2 Criterios de selección

Una vez establecidos los criterios de búsqueda, se prosiguió a realizar los filtros correspondientes para escoger los documentos considerados como relevantes, los cuales se explican a continuación:

- i. Por lo menos una de las combinaciones posibles de las palabras clave mencionadas anteriormente debía estar presente en el resumen del artículo. (Ej: “Renewable” Y “Landfill”)
- ii. Aquellos artículos en los cuales el título y resumen no se relacionaban con los objetivos establecidos fueron descartados.
- iii. Aquellos artículos en los cuales se trataba el tema de estudio de manera superficial fueron descartados. Para ello, se realizó un filtro de búsqueda de palabras clave por artículo.

Luego de realizar el proceso de selección se encontraron 48 documentos que fueron catalogados como evidencia relevante respecto al tema establecido.

### 3. Análisis de Documentos

Para la organización de la información obtenida se utilizó la aplicación Mendeley.

Para la tabulación de la bibliografía obtenida se utilizó Microsoft Excel. Donde se especificó: el título del artículo, el año de publicación, el sitio al cual hace referencia el artículo (relleno sanitario o proyecto minero), el tipo de energía renovable mencionado en el artículo, los autores, las palabras clave, continente donde se realizó el proyecto.

Se determinó que a partir del año 2005 se empezó a tener evidencia de estudios o proyectos realizados sobre energías renovables, sin embargo, los años 2006, 2007 y 2008 no mostraron evidencia sobre el tema de estudio. Sin embargo, a partir del año 2009 hasta la actualidad, se volvió a encontrar evidencia relacionada al tema de estudio, siendo el 2013 el durante el cual se publicó el mayor número de artículos referentes al tema de estudio, tal como se evidencia en la Gráfica 1.

Durante la recolección de datos, se encontró que Renewable and Sustainable Energy Reviews es la revista con más artículos publicados (9 artículos). La lista con la cantidad de artículos publicados por revista se muestra en la gráfica 2. Así mismo, Estados Unidos es el país con más artículos publicados relacionados al tema de estudio (19 artículos), seguida de Corea del Sur (7 artículos), tal como se evidencia en la gráfica 3. De igual manera, Norte América representa la mayor cantidad de artículos (20 artículos) que hacen referencia al tema de estudio, seguida de Asia (12 artículos). El resto de artículos por continente se pueden ver en la gráfica 4.

Por otra parte, se evidenció que existe un mayor número de artículos que hacen referencia a rellenos sanitarios clausurados (40) que a proyectos mineros clausurados (16) (Tabla 1). Así

mismo, se encontró que la energía solar es el tipo de proyecto de energía renovable que ha tenido más desarrollo a nivel mundial tanto en rellenos sanitarios clausurados (17) como en proyectos mineros a cielo abierto abandonados (8) (Tabla 2).

#### 4. Análisis y discusión de resultados

Durante el proceso de búsqueda, se encontró que los tipos de energías renovables que se pueden generar en rellenos sanitarios clausurados son los siguientes:

- Energía solar
- Energía geotérmica
- Biogás
- Biomasa
- Energía eólica

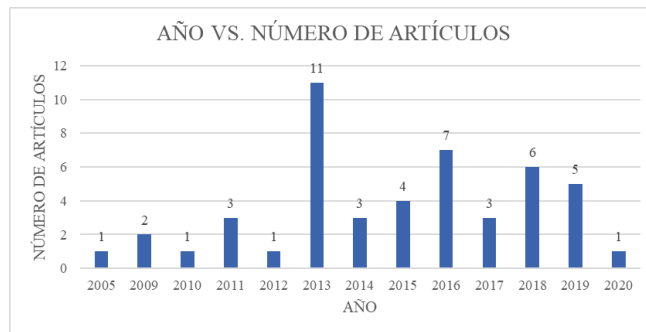


Figura 1. Distribución de artículos por año.



Figura 2. Distribución de número de artículos por revista.

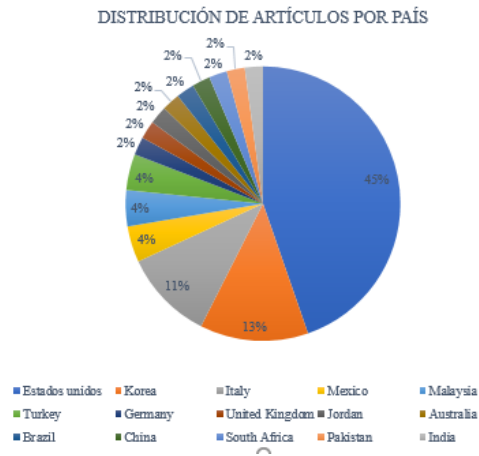


Figura 3. Distribución de artículos por país.

DISTRIBUCIÓN DE ARTÍCULOS POR REGIÓN

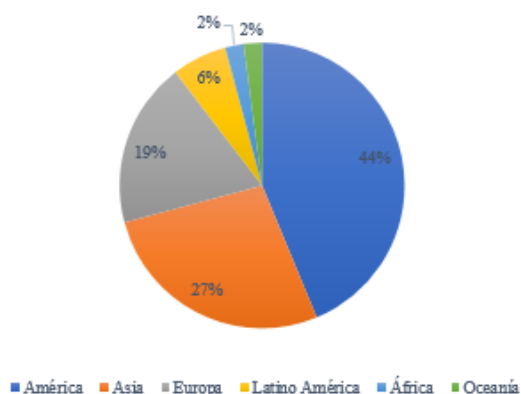


Figura 4. Distribución de artículos por región.

Tabla 1.

Número de menciones de artículos por tipo de terreno (Relleno sanitario o proyecto minero).

Tipo de terreno	Número de menciones
Relleno Sanitario	32
Proyecto minero	11
Relleno Sanitario/Proyecto minero	5
Total	48

Tabla 2.

Número de menciones del tipo de energía renovable por tipo de terreno.

Rellenos sanitarios clausurados	
Tipo de energía renovable	Número de menciones
Energía solar	12
Biomasa	5
Energía geotérmica	3
Biogás	1
Proyectos mineros a cielo abierto abandonados	
Tipo de energía renovable	Número de menciones

Proyectos mineros a cielo abierto abandonados	
Energía solar	4
Biomasa	2
Energía eólica	3

Por otra parte, dentro de los tipos de energía renovable que se pueden producir en proyectos mineros clausurados se encuentran:

- Energía solar
- Energía eólica
- Biomasa

#### 4.1 Aprovechamiento de los rellenos sanitarios clausurados para la generación de energía renovable.

**4.1.1 Energía solar.** Durante la investigación, se encontró que la energía solar es el mayor exponente en cuanto a energía renovable se refiere en rellenos sanitarios clausurados. La energía solar es, quizás, una de las que ha presentado mayor crecimiento en los últimos años alrededor del mundo, en Europa, por ejemplo, la tasa de crecimiento de paneles solares fue superior al 50% en la última década (Szabó et al., 2017).

Una iniciativa prometedora e innovadora es la de instalar paneles solares en rellenos sanitarios clausurados (Salasovich & Mosey, 2011). De hecho, un relleno sanitario clausurado no representa gran cantidad de gastos por concepto de consumo de energía, por ende, la mayor parte de la energía generada representaría beneficios económicos para este lugar. Así mismo, estas tierras son, generalmente, grandes extensiones de tierra, lo que las convierte en ideales para este tipo de

sistemas. Hasta el momento, la utilización de paneles solares en rellenos sanitarios ha sido desarrollada en Estados Unidos y en menor cantidad en Italia, Francia, Alemania y Corea (Szabó et al., 2017).

La identificación de sitios viables para la construcción de estos proyectos se lleva a cabo de un proceso de tres pasos. (i) pre-selección. Consiste en evaluar: potencial solar fotovoltaica, área disponible, distancias a infraestructura existente, topografía y geotecnia del sitio, y la necesidad del proyecto; (ii) Consiste en evaluar: interés del propietario, tipo de sistema a ser instalado, costo de electricidad, demanda energética, contaminación actual del sitio y estado operacional; (iii) consiste en evaluar las regulaciones políticas, incentivos y costos de instalación (Sangiorgio & Falconi, 2015)

Actualmente, se han realizado proyectos con sistemas fotovoltaicos solares tradicionales con estanterías de balasto para soportar paneles solares rígidos, así como tecnologías solares flexibles de película delgada adheridas directamente a las membranas de cierre geosintéticas expuestas (Jacob & Ayers, 2018). La diferencia principal entre estas dos tecnologías radica, principalmente, en que el sistema rígido es más eficiente por unidad de área que el flexible, sin embargo, el sistema flexible se puede utilizar en sitios con pendientes laterales mientras que el sistema rígido no, lo que le da al sistema flexible mayor cubrimiento de área.

**4.1.1.1 Sistema de energía solar en el relleno sanitario Tessman Road, Estados Unidos.** En San Antonio, Texas se construyó el que se considera el primer parque de energía renovable en un relleno sanitario clausurado. Es el caso del relleno sanitario de Tessman Road Landfill, el cual en el año 2009 se convirtió en un parque solar (Fig. 1). Para este proyecto se utilizaron paneles solares flexibles pues el lugar presentaba pendientes laterales. El área usada para la generación de energía

solar fue de 2.14 Ha y representa alrededor de 135 KW al año, que pueden ser utilizados por más de 5500 hogares al año. (Jacob & Ayers, 2018; Perdana, 2018).



*Figura 5.* Sistema de paneles solares fotovoltaicos sobre el relleno sanitario Tessman Road. Nota. Tomado de: “Tessman road landfill solar energy cover”

**4.1.1.2 Sistema de energía solar en el relleno sanitario de Hartford, Estados Unidos.** En el año 2014, en Hartford, Connecticut, se construyó un parque solar en el relleno sanitario con una capacidad de 1 MW en un área de 2,42 Ha (Jacob & Ayers, 2018), el cual cuenta con paneles solares rígidos (Fig. 2).



*Figura 6.* Sistema de paneles solares en el relleno sanitario de Hartford, Estados Unidos. Nota. Tomado Water shed geo Recuperado de: <https://watershedgeo.com/portfolio-items/mira-hartford/>

**4.1.1.3 Sistema de energía solar en el relleno sanitario de Hellsiek, Alemania** En Alemania se construyó un sistema de paneles solares fotovoltaicos de 9.78 MW en el relleno sanitario de Hellsiek (Fig. 3). Este proyecto se construyó sobre el relleno sanitario en un área de 6,6 Ha y tardó 10 meses en ser finalizado (Pv Europe, 2017)



*Figura 7.* Parque solar en relleno sanitario de Hellsiek, Alemania. ~Nota. Tomado de PV Europe  
Recuperado de: <https://www.pveurope.eu/News/Installation/Innovative-PV-landfill-system-saves-costs-and-protects-the-environment>

**4.1.1.4 Sistema de energía solar en relleno sanitario de Hickory Ridge, Estados Unidos.** En Georgia, Estados Unidos se encuentra el relleno sanitario de Hickory Ridge, en donde se desarrolló un proyecto de energía solar que genera alrededor de 1 MW. Para este sistema se utilizaron paneles solares fotovoltaicos flexibles, los cuales se adaptaban al tipo de terreno que presentaba el relleno sanitario, el cual presenta pendientes laterales (Fig.4). Un total de 7.000 paneles se encuentran adheridos sobre la superficie de la geomembrana que recubre el relleno sanitario, generando energía para el relleno sanitario y las comunidades aledañas (HDR, 2012).



*Figura 8.* Paneles solares fotovoltaicos flexibles situados sobre el relleno sanitario de Hickory Ridge, Estados Unidos. Tomado de: Hdrinc Recuperado de: <https://www.hdrinc.com/portfolio/hickory-ridge-landfill>

**4.1.1.5 Sistema de energía solar en el relleno sanitario La Loma los Colorados, Chile.** En el caso de Latinoamérica, Chile desarrolló un proyecto de energía solar en el relleno sanitario La Loma los Colorados (Fig. 5), al sur de Chile, en un área de 1.5 Ha y estima su generación de energía en 1,1 MW (Induambiente, 2010).



*Figura 9.* Sistema de paneles solares fotovoltaicos en el relleno sanitario La Loma los Colorados, Chile. Nota. Tomado de: Induambiente Recuperado de: <https://www.induambiente.com/especial/energia/hagase-la-luz>

**4.1.1.6 Sistema de energía solar en el relleno sanitario de Mohács, Hungría.** En la ciudad de Mohács, Hungría, el antiguo relleno sanitario fue transformado en un parque solar (Fig. 6).



*Figura 10.* Paneles solares fotovoltaicos en el relleno sanitario de Mohács, Hungría. Tomado de PV Europe Recuperado de: <https://www.pveurope.eu/News/Markets-Money/Fronius-offers-more-service-for-local-PV-installers-in-Hungary>

**4.1.1.7 Sistema de energía solar en el relleno sanitario de Tiretta, Italia.** En el año 2012 se instaló un sistema de paneles solares fotovoltaicos en el relleno sanitario de Tiretta, ubicado en la ciudad de Treviso, Italia (Fig. 7). El sistema consiste de 3630 paneles solares fotovoltaicos flexibles, los cuales generan cerca de 1 MW de electricidad (Ciriminna et al., 2018).



*Figura 11.* Instalación de paneles solares fotovoltaicos en relleno sanitario de Tiretta, Italia. Tomado de: “Solar Landfills: Economic, Environmental, and Social Benefits”

**4.1.1.8 Sistema de energía solar en relleno sanitario de Annapolis, Estados Unidos.** Sobre el antiguo relleno sanitario de Annapolis, Estados Unidos, se encuentra ubicado un parque solar de 18.1 MW (Fig. 8), en un área de 32 Ha, el cual genera electricidad para más de 2200 hogares al año (Solar Builder, 2015).



*Figura 12.* Paneles solares en relleno sanitario de Annapolis, Estados Unidos. Tomado de: Solar Builder mang <https://solarbuildermag.com/projects/largest-landfill-solar-project-in-u-s-procures-rec-solar-panels/>

**4.1.1.9 Sistema de energía solar en relleno sanitario de Cuyahoga County, Estados Unidos.** En Ohio, Estados Unidos, se construyó un sistema de energía solar de 4 MW en el antiguo relleno sanitario de Cuyoha County (Fig. 9). Este proyecto se encuentra ubicado sobre un área de 7 Ha (Solar Builder, 2018).



*Figura 13.* Sistema de paneles solares fotovoltaicos sobre el relleno sanitario de Cuyahoga County, Estados Unidos. Tomado de Solar builder mag Recuperado de <https://solarbuildermag.com/news/details-on-the-largest-landfill-solar-project-in-ohio-now-being-constructed/>

**4.1.2 Cultivos bioenergéticos para la producción de biocombustibles.** Es conocido que los rellenos sanitarios generan cierto malestar en las comunidades aledañas al sector donde operan estos sitios, entre otras razones, debido al impacto ambiental y visual que estos proyectos atraen. Así mismo, otro de los grandes problemas de los rellenos sanitarios es el manejo y tratamiento de lixiviados. Sin embargo, estos efectos adversos podrían minimizarse mediante la utilización de cultivos energéticos en la parte superior de los rellenos sanitarios clausurados, no solo con fines de tratamiento de lixiviados sino también para la generación de energía renovable, ofreciendo una vista agradable del sitio y al mismo tiempo mejorar el proceso de restauración ambiental (Garbo et al., 2019).

Los cultivos energéticos se definen como plantas de bajo costo y crecimiento rápido utilizadas para producir bioenergía y biocombustibles (como bioetanol o biodiesel) o que pueden quemarse para generar electricidad o calor (Garbo et al., 2017). Si bien existen estudios que indican que los biocombustibles convencionales que provienen de cultivos alimenticios contribuyen directamente a la deforestación y amenazan la biodiversidad. (Mehmood et al., 2017), los rellenos sanitarios son

tierras contaminadas las cuales no se consideran aptas para el cultivo de alimentos, lo cual los convierte en los sitios ideales para la generación de biocombustibles mediante el uso de cultivos energéticos.

A nivel mundial, las energías renovables aportan alrededor del 19% de la energía total de consumo. La biomasa está estimada en un 9% y el 10% restante es aportada por energías renovables modernas como la eólica, los biocombustibles, la geotérmica, la solar, etc (Edrisi & Abhilash, 2016).

**4.1.2.1 Cultivos para la producción de biocombustibles en zonas contaminadas.** Estudios determinaron que dentro de los cultivos con mayor potencial para producir biocombustibles se encuentran los siguientes:

- Miscanthus
- Alpiste cinta
- Sida hermaphrodita
- Pasto varilla
- Cardo
- Agave
- Sorgo Dulce
- Bambú
- Salix babylonica o sauce llorón
- Agropiro alargado
- Álamo
- Eucalipto

Así mismo, el agave, el bambú, el eucalipto y el pasto varilla, entre otros, tienen gran potencial en zonas tropicales, como es el caso de Latinoamérica (Mehmood et al., 2017).

**4.1.3 Energía geotérmica.** La energía geotérmica consiste en el aprovechamiento del calor existente en el interior de la tierra a través de los cuerpos de roca calientes (Mustafa Omer, 2008). Por lo general, la temperatura bajo la superficie de la tierra se mantiene constante durante todo el año. Existe un sistema de bombas de calor geotérmica, que puede absorber la energía térmica subterránea poco profunda del agua subterránea o del suelo (Chen et al., 2019) la cual es utilizada en los sistemas de calefacción y enfriamiento de algunas edificaciones (Mustafa Omer, 2008).

A nivel mundial, la energía requerida en los edificios para iluminación, calefacción, refrigeración y aire acondicionado, representa alrededor del 40% del consumo anual total mundial, con un impacto ambiental considerable debido a las emisiones de CO<sub>2</sub> (Lucia et al., 2017). Si bien estos sistemas requieren de energía para el funcionamiento de sus bombas, el mismo sistema generará tres o cuatro veces más energía térmica (calor) que la utilizada en energía eléctrica para impulsar el sistema (Mustafa Omer, 2008).

Recientemente, se ha buscado incorporar estos sistemas a diferentes tipos de proyectos, dentro de las cuales se encuentran los rellenos sanitarios. Estos sistemas subterráneos generalmente son clasificados como sistemas de circuito abierto o cerrado (Mustafa Omer, 2008; Rawlings & Sykulski, 1999), sin embargo, para fines de los rellenos sanitarios se usan sistemas de circuito cerrado, los cuales incorporan tres subsistemas para su funcionamiento: (i) una red subterránea de intercambiadores de calor; (ii) una bomba de calor con un refrigerante de bajo punto de ebullición; (iii) un sistema de distribución de calor en la edificación (Coccia et al., 2013). Los sistemas cerrados, a su vez, se clasifican en sistemas verticales, horizontales y oblicuos, sin embargo, para

finés de rellenos sanitarios clausurados, solamente se pueden usar sistemas de circuito cerrados verticales (Fig. 10). (Coccia et al., 2013; Grillo, 2014; Mustafa Omer, 2008).

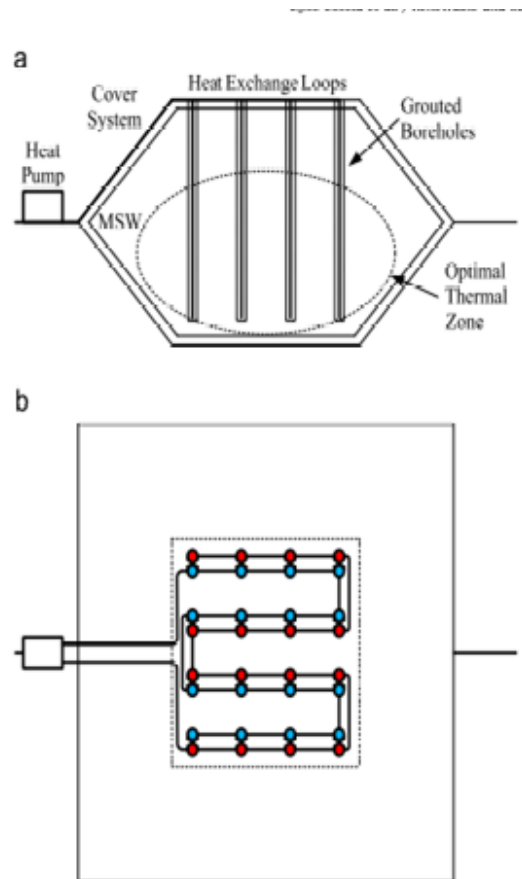


Figura 14. Sistema vertical de energía geotérmica para rellenos sanitarios clausurados. (a) Vista de perfil; (b) Vista en planta. Tomado de: Municipal solid waste landfills as geothermal heat sources”

Los rellenos sanitarios son sitios ideales para la construcción de este tipo de proyectos, pues allí se generan grandes cantidades de calor durante el proceso de descomposición de los residuos orgánicos enterrados bajo tierra, especialmente, durante su fase anaeróbica (Coccia et al., 2013). Sin embargo, hay que tener en cuenta las dificultades que representa instalar este tipo de proyectos

en rellenos ya clausurados, debido a que para su instalación es necesario perforar las capas del relleno, las cuales generalmente para insertar la red de tubos que se encargará de transportar el calor hasta la superficie (Coccia et al., 2013; Grillo, 2014). Cabe resaltar que, para optimizar este tipo de proyectos, se deben tener en cuenta aspectos tales como la variación de la temperatura según la profundidad, la variación de la temperatura en los residuos orgánicos con el paso del tiempo y los asentamientos que podría conllevar este tipo de sistemas, entre otros.

**4.1.3.1 Sistema de energía geotérmica en relleno sanitario de New Hampshire, Estados Unidos.** En la (fig. 11) se puede observar la construcción de estos sistemas previa a la fase de disposición de residuos sólidos en New Hampshire, Estados Unidos.



*Figura 15.* Instalación de sistema de extracción de energía geotérmica en relleno sanitario de New Hampshire, Estados Unidos. Tomado: Research gate Recuperado de: [https://www.researchgate.net/figure/Examples-of-geothermal-energy-systems-at-landfills-Schematic-of-landfill-heat-exchanger\\_fig2\\_268460302](https://www.researchgate.net/figure/Examples-of-geothermal-energy-systems-at-landfills-Schematic-of-landfill-heat-exchanger_fig2_268460302)

**4.1.4 Gases de relleno sanitario.** Otro de los grandes problemas de los rellenos sanitarios es la emisión de gases de efecto invernadero, especialmente de metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) los cuales se generan debido a la degradación anaeróbica de los residuos orgánicos, de hecho, los rellenos sanitarios representan el 11% de las emisiones antropogénicas de gases de

efecto invernadero en el mundo (Lino & Ismail, 2018). Estos gases también son conocidos como gases de relleno sanitario o biogás y representan una fuente de energía renovable que es utilizada, principalmente, para la generación de electricidad, calor y combustible (Bolan et al., 2013; Fei et al., 2019), por ejemplo, en los Estados Unidos, dos tercios del biogás capturado se utilizan para la generación de electricidad (Bolan et al., 2013).

La recuperación de estos gases se enfoca principalmente en el metano  $\text{CH}_4$ , pues este es 84 veces más contaminante que el dióxido de carbono y contribuye 28 veces más al calentamiento global (*Gas metano contamina 84 veces más que el dióxido de carbono*, 2016; Lino & Ismail, 2018). El uso de gases de relleno sanitario como energía renovable influye directamente en la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, pues al mismo tiempo que contribuye a reducción en la emisión de metano a la atmosfera, también es utilizado como una fuente de energía que emite mucho menos  $\text{CO}_2$  a la atmosfera que las fuentes convencionales de energía fósil.

El primer paso para determinar si la construcción de este tipo de proyecto es viable, se debe conocer la cantidad de metano generada así como el tiempo estimado durante el cual el relleno sanitario estará produciéndola, para ello, se han elaborado numerosos modelos con el fin de estimar la cantidad de metano producida por un relleno sanitario (Villanueva-estrada et al., 2019; Yucekaya, 2013). Según estos modelos, a medida que pasan los años y el relleno sanitario va recibiendo residuos orgánicos, la producción de gases de relleno sanitario va aumentando hasta el momento de la clausura del relleno sanitario. A partir de ese momento, la producción de gases empezará a disminuir (Fig. 12).

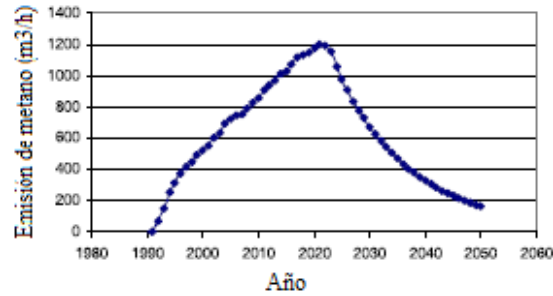


Figura 16. Estimación de emisión de metano en el relleno sanitario de Al Akeeder. Nota. Tomado de: “Energetic and Methane Emission Reduction Potentials from an Unsanitary Landfill”

Dentro de los principales criterios de selección para este tipo de proyectos se encuentran: (i) por lo menos un millón de toneladas en el lugar; (ii) debe seguir recibiendo residuos, o, dado el caso que esté cerrado, la fecha de clausura no debería exceder cierta cantidad de años (de acuerdo a estudios); (iii) un relleno sanitario con una profundidad de 12 metros o más (Abu Qdais et al., 2011).

El biogás se extrae, generalmente, de los vertederos utilizando una serie de pozos y un sistema “blower/vacuum”, el cual dirige el gas recolectado a un punto central donde puede procesarse y tratarse. A continuación, el gas puede quemarse, usarse para generar electricidad o transformarse para uso directo o procesarse en un combustible alternativo para vehículos (Bolan et al., 2013; Spokas et al., 2006; Yucekaya, 2013).

**4.1.4.1 Sistema de recolección de biogás para la producción de energía en el relleno sanitario clausurado de Prados de la Montaña, México.** El relleno sanitario de Prados de la Montaña, México (Fig. 13), recibió un total de 5,6 millones de toneladas de residuos sólidos durante sus siete años y cuatro meses de operación hasta que finalmente fue clausurado en julio de 1994. En 1997 se instaló una planta para capturar el biogás y generar energía en el relleno sanitario,

la cual requirió la perforación de 112 hoyos. En el año de 2017 se realizó un estudio el cual concluyó que durante ese año se generaron 1.5 MW y que esta cantidad sería de 1 MW para el año 2028 (Villanueva-estrada et al., 2019).

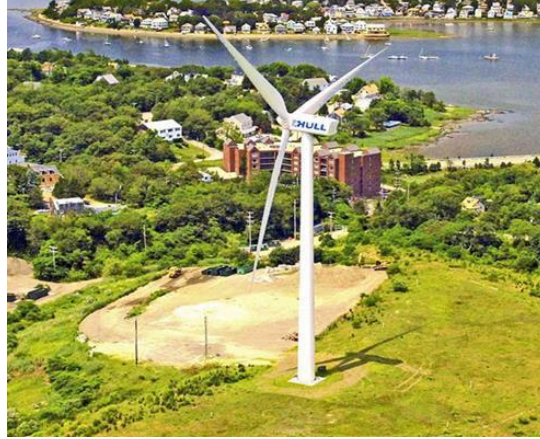


*Figura 17.* Sistema de extracción de biogás en el relleno sanitario de Prados de la montaña, México. Los puntos negros representan los tubos de extracción. Nota. Tomado de: “Energy production from biogas in a closed landfill: A case study of Prados de la Montaña, Mexico City”

**4.1.5 Energía eólica.** Este sistema consiste en la construcción de turbinas eólicas para capturar la energía eólica y convertirla en electricidad. El viento hace girar un eje, el cual mueve un generador para generar electricidad (Epa, 2009). Estos sistemas se pueden instalar individualmente o en gran cantidad con el fin de crear parques eólicos. Este tipo de proyectos se ha desarrollado, principalmente, en Estados Unidos. Uno de los grandes retos para la instalación de turbinas eólicas en rellenos clausurados debido a que se requiere la perforación a través del relleno, lo que afectaría la integridad de los residuos, así como las geomembranas usadas para recubrir el sistema.

*4.1.5.1 Sistema de energía eólica en el relleno sanitario de Hull, Estados Unidos.* En el año 2006, en Hull, Nueva Inglaterra, Estados Unidos, entró en operación una turbina eólica de 1.8 MW ubicada en el relleno sanitario de dicho pueblo (Fig. 14) y se estima que genera alrededor del 9% de la demanda energética del pueblo (Manwell et al., 2006).

Este sistema costó alrededor de 3.000.000 USD, de los cuales la turbina costó 1.800.000 USD (60%) y el costo de la fundación fue de 850.000 USD (29%). La turbina, de 80 metros de altura, cuenta con una fundación cuadrada de 6.1 metros por 1.8 metros de espesor, la cual fue recubierta por una geomembrana luego de ser construida, para evitar el contacto con los residuos sólidos. (Manwell et al., 2006). Para la construcción de este sistema, se realizó un estudio geotécnico para determinar las características del relleno sanitario y del suelo debajo del mismo, el cual reveló que existen 18.3 metros de residuos sólidos apilados, mezclados con arena y grava. Así mismo, este estudio encontró roca sólida inmediatamente debajo del relleno sanitario, la cual fue utilizada para la construcción de pilotes que darían soporte a la estructura, evitando así, los problemas de estabilidad presentados por la heterogeneidad del relleno sanitario. Este relleno sanitario presentaba la particularidad de que no contaba con un sistema para la recolección de lixiviados, lo cual facilitó la perforación del suelo para la instalación de los pilotes (Manwell et al., 2006)



*Figura 18.* Turbina eólica situada sobre el relleno sanitario de Hull, Estados Unidos. Nota. Tomado de: “An Analysis of Wind Power Development in the Town of Hull, MA”

#### ***4.1.5.2 Sistema de energía eólica en relleno sanitario de Cranberry Road, Estados Unidos.***

En Kingston, Massachusetts, entró en operación la turbina eólica de 1.8 MW en el relleno sanitario de Cranberry Road (Fig. 15), que genera suficiente electricidad para 1000 hogares al año. El sistema cuenta con una fundación cuadrada de 7.6 metros por 1.8 metros de espesor, la cual fue recubierta por una geomembrana una vez construida, con el fin de evitar contacto con los residuos sólidos. Para construir este sistema se instalaron pilotes a una profundidad de 33 metros, los cuales atravesaron toda la capa del relleno sanitario, hasta encontrar roca sedimentaria.



*Figura 19.* Turbina eólica en el relleno sanitario de Kingston, Estados Unidos. Nota. Tomado de: <https://kingston.wickedlocal.com/news/20191009/kingston-renewable-energy-loan-program-on-hold>

**4.1.6 Sistemas integrados de energía renovable.** Para obtener una mayor independencia energética, algunos operadores de rellenos sanitarios han optado por la implementación de sistemas híbridos de energía renovable, el caso más común es el de desarrollar proyectos de energía solar junto con una planta de biogás.

***4.1.6.1 Sistema integrado de energía renovable en el relleno sanitario de Roncayette, Italia.***

El relleno sanitario de Ponte San Nicolò, Italia, se construyó un sistema de paneles solares fotovoltaicos junto con un sistema de recolección de gases de relleno sanitario para la producción de energía renovable (Fig. 16). El sistema fotovoltaico se encuentra ubicado sobre un área de 2 Ha

y consiste de 4500 paneles fotovoltaicos policristalinos y genera 1 MW de electricidad (Novambiente, 2014)



Figura 20. Sistema híbrido de extracción de biogás y paneles solares fotovoltaicos en el relleno sanitario de Roncayette, Italia. Nota. Tomado de: <http://novambiente.altervista.org/Impianto-fotovoltaico-sulla-ex-discardica.html>

#### ***4.1.6.2 Sistema integrado de energía renovable en relleno sanitario de Semakau, Singapur.***

A 8 kilómetros de tierra firme en Singapur, se encuentra situado sobre el mar el único relleno sanitario del país. Allí se desarrolló un proyecto de energía renovable el cual cuenta con un área de 9500 metros cuadrados destinada para paneles solares y una turbina eólica, además, cuenta con un sistema de almacenamiento de energía (Fig. 17). Este sistema híbrido puede llegar a producir 1,5 MW y generar energía suficiente para el abastecimiento de más de 350 hogares (The Straits Times, 2019).



*Figura 21.* Sistema híbrido de energía eólica en el relleno sanitario de Semakau, Singapur. Nota. Tomado de: <https://www.straitstimes.com/singapore/energy-comes-clean-at-singapores-only-landfill-semakau>

Una ventaja de estos sistemas es que se complementan entre sí, por ejemplo, en aquellos días nublados en los cuales la radiación solar es baja, tanto el sistema eólico y el sistema de almacenamiento de energía podrán suplir esta falta de energía.

**4.1.6.3 Sistema integrado de energía renovable en relleno sanitario La Loma los Colorados, Chile.** Ya mencionamos el caso chileno de energía solar en el relleno sanitario La Loma Los Colorados, en Chile, el cual además de contar con generación de energía solar, tiene una planta que genera energía a partir del biogás, la cual opera desde el año 2010 y genera 11,8 MW (Induambiente, 2010).

## 4.2 Aprovechamiento de proyectos mineros clausurados o abandonados para la generación de energía renovable

Así como los rellenos sanitarios clausurados son lugares ideales para la generación de energías renovables, los sitios mineros abandonados o clausurados también ofrecen grandes ventajas a la hora de implementar energías renovables, incluso, estos sitios cuentan, por lo general, con áreas más extensas que los rellenos sanitarios. Además, se estima que en el mundo hay más de un millón de minas abandonadas (Menéndez et al., 2019).

**4.2.1 Energía solar.** Como se mencionó anteriormente, la energía solar consiste en la generación de energía mediante el aprovechamiento de la luz solar a través de paneles fotovoltaicos. Los sitios mineros, tanto operacionales como abandonados o clausurados pueden ser utilizados para la generación de energía solar. Al igual que en la instalación de paneles solares fotovoltaicos en rellenos sanitarios clausurados, se deben realizar estudios para determinar la factibilidad de instalar este tipo de sistemas en sitios mineros teniendo en cuenta consideraciones climáticas y condiciones del terreno (Song & Choi, 2016). Según (Choi & Song, 2016), se debe realizar un estudio de factibilidad basado en cinco pasos: (i) análisis topográfico; (ii) posibles efectos de barreras de luz en zonas aledañas; (iii) diseño del sistema fotovoltaico; (iv) simulaciones de la electricidad producida; (v) factibilidad económica teniendo en cuenta costos, ingresos y políticas locales.

**4.2.1.1 Sistema de energía solar en la mina Meuro, Alemania.** En Alemania se construyó un parque fotovoltaico de 166 MW en la mina Meuro, cerca de Leipzig, en donde se extraía lignito

(Fig.18). El gobierno alemán destinó un área de alrededor de 200 Ha para la construcción de Solarpark Meuro, el parque solar más grande de Alemania hasta el momento (Choi & Song, 2017).



*Figura 22.* Sistema de paneles solares fotovoltaicos situados en la antigua mina de Meuro, Alemania. Nota. Tomado de: [https://en.wikipedia.org/wiki/Solarpark\\_Meuro](https://en.wikipedia.org/wiki/Solarpark_Meuro)

**4.2.1.2 Sistema de energía solar en la mina de Chevron Questa, Estados Unidos.** En Nuevo Mexico, Estados Unidos, se encuentra la mina de Chevron Questa (Fig. 19), en la cual se realizaba la extracción de molibdeno culminó sus operaciones en 1983. Sin embargo, en el año 2011 inició la operación de un parque solar de 1,1 MW en un área de 8,1 Ha (Choi & Song, 2017).



*Figura 23.* Sistema de paneles solares fotovoltaicos en la mina de Chevron Questa. Nota. Tomado de: <https://durangoherald.com/articles/22585>

**4.2.1.3 Sistema de energía solar en la mina de Chuicamata, Chile.** En el desierto de Atacama, Chile, uno de los lugares de mayor radiación solar del mundo, se construyó un sistema de paneles solares fotovoltaicos de 1 MW en un área de 6.25 Ha en la mina de Chuicamata, encargada de la extracción de cobre (Fig. 20). Si bien esta mina se encuentra operacional, se espera que los paneles solares sigan funcionando luego de su fecha de clausura (Portal Minero, 2012).



*Figura 24.* Paneles solares fotovoltaicos en la mina de Chuicamata, Chile. Nota. Tomado de: <http://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=65831602>

**4.2.1.4 Sistema de energía solar flotante en la mina Los Bronces, Chile.** Paneles flotantes fotovoltaicos en Chile fueron instalados en la mina Los Bronces (Fig. 21). Se trata de un embalse artificial de 65 kilómetros cuadrados resultado de los residuos cáusticos producidos por la mina de cobre Los Bronces. Se instalaron cerca de 256 paneles fotovoltaicos situados sobre pontones flotantes que generan 85 KW (World Energy Trade, 2019).



*Figura 25.* Paneles solares fotovoltaicos flotantes sobre el embalse artificial en la mina de cobre Los Bronces, Chile. Nota. Tomado de: <https://www.worldenergytrade.com/index.php/m-news-alternative-energy/96-news-energia-solar/4432-la-mina-los-bronces-de-chile-instala-innovadores-paneles-solares-flotantes>

**4.2.1.5 Sistema de energía solar en la mina de Wheal Jane, Reino Unido.** Más de 5600 paneles solares fueron instalados en la antigua mina de estaño Wheal Jane, en el Reino Unido (Fig. 22). El proyecto de 1,4 MW se encuentra ubicado sobre un área de 3 Ha y es capaz de suministrar electricidad a más de 400 hogares y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta 737 toneladas por año (*From mining tin to harvesting the sun!*, 2011).



*Figura 26.* 5600 paneles solares situados en la antigua mina de Wheal Jane, Reino Unido. Nota. Tomado de: <https://premierconstructionnews.com/2011/08/26/from-mining-tin-to-harvesting-the-sun/>

**4.2.1.6 Sistema de energía solar en una mina en Visonta, Hungría.** Ubicado en una sola aldea de la mina de lignito de Visonta, Hungría, se encuentra un parque solar de 18 MW (Fig. 23). Este sistema contiene 72480 paneles solares fotovoltaicos y se estima que puede generar electricidad suficiente para 10000 hogares al año (Renewables Now, 2015).



*Figura 27.* Sistema de paneles solares fotovoltaicos en zona de la antigua mina de lignito de Visonta, Hungría. Nota. Tomado de: “A methodology for maximizing the benefits of solar landfills on closed sites”.

**4.2.2 Energía eólica.** Una de las grandes ventajas de los sitios mineros frente a los rellenos sanitarios es la estabilidad del suelo donde se encuentran ubicados. Mientras la superficie de los rellenos sanitarios se encuentra sobre capas heterogéneas de residuos orgánicos, lo que hace poco viable la ubicación de estructuras pesadas debido a los posibles asentamientos que se podrían presentar, los sitios mineros no tienen este problema y son capaces de albergar gran cantidad de estructuras pesadas como lo son las turbinas eólicas.

En Corea, el 90% de las minas se encuentran abandonadas, lo que ha conllevado al gobierno coreano a destinar estos sitios como potenciales parques eólicos (Choi, 2013; Song & Choi, 2016). Así mismo, la EPA (Environmental Protection Agency) y el NREL (National Renewable Energy

Laboratory) han destinado minas abandonadas a la producción de energías renovables, dentro de ellas, la energía eólica.

**4.2.2.1 Sistema de energía eólica en la mina Dave Jhonston, Estados Unidos.** En Estados Unidos, específicamente en Wyoming, la mina de carbón Dave Jhonston cesó sus operaciones en el año 2000. Rocky Mountain Power, una compañía de energía, construyó un parque eólico de 237 MW en el año 2008 (Fig. 24). Un total de 158 unidades de turbinas eólicas generan energía suficiente para 66000 hogares (Choi & Song, 2017).



*Figura 28.* Parque eólico situado en la antigua mina de carbón Dave Jhonston, Estados Unidos  
Nota. Tomado de: <https://www.cnet.com/news/from-coal-mine-to-wind-farm/>

**4.2.2.2 Sistema de energía eólica en la mina de Somerset, Estados Unidos.** Así mismo, en Pensilvania, Estados Unidos se construyó una central eólica que genera 34.5 MW (Fig. 25). Se trata de la mina abandonada de Somerset, donde se instalaron 23 turbinas eólicas de 80 metros sobre el nivel del suelo, cada una de 1.5 MW. Se estima que este parque produce energía suficiente para 10000 hogares (Choi & Song, 2017).



*Figura 29.* Sistema de energía eólica en mina abandonada de Somerset, Estados Unidos Nota.

Tomado de:  
[en.wikipedia.org/wiki/Casselman\\_Wind\\_Power\\_Project#/media/File:CasselmanWF2019.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Casselman_Wind_Power_Project#/media/File:CasselmanWF2019.jpg)

**4.2.2.3 Sistema de energía eólica en antigua mina de carbón en Escocia, Reino Unido.** En el año 2005 entró en funcionamiento el parque eólico de Black Law, con un total de 54 turbinas eólicas y una capacidad de 124 MW, generando electricidad suficiente para 70.000 hogares (Fig. 26). En el año 2017, entró en operación la etapa complementaria del parque eólico, la cual contempla 34 turbinas eólicas y 63 MW de capacidad adicionales para un total de 88 turbinas y 187 MW. Actualmente, se estima que genera electricidad suficiente para 120.000 hogares en Escocia (Scottish power renewables, 2020).



*Figura 30.* Parque eólico Black Law, Escocia, Reino Unido. Nota. Tomado de: [https://www.scottishpowerrenewables.com/news/pages/black\\_law\\_from\\_above.aspx](https://www.scottishpowerrenewables.com/news/pages/black_law_from_above.aspx)

**4.2.2.4 Sistema de energía eólica en una mina de Pensilvania, Estados Unidos.** En el año 2009, en una mina a cielo abierto abandonada en Cambria County, Pensilvania, entró en operación un parque eólico de 62,5 MW y un total de 25 turbinas eólicas. El proyecto recibe el nombre de Highland North Wind Farm. En el año 2012, este proyecto fue ampliado mediante la instalación de 30 turbinas eólicas que generan 75 MW. Actualmente el proyecto cuenta con 55 turbinas eólicas y una capacidad de 137.5 MW (U.S. Environmental Protection Agency, 2012).

**4.2.3 Cultivos energéticos para la generación de biocombustibles.** Como se mencionó anteriormente, los cultivos energéticos tienen la ventaja de que pueden crecer en tierras contaminadas, tal es el caso de las minas abandonadas o clausuradas.

**4.2.3.1 Caso Wise County, Estados Unidos.** Por ejemplo, en el año 2009, se realizó un experimento en la mina de Wise county, Virginia, se plantaron cultivos de Álamo híbrido con el fin de generar biomasa (Fig. 27)



*Figura 31.* Preparación del terreno para plantar cultivos bioenergéticos en la mina abandonada de Wise County, Virginia. Nota. Tomado de: “Hybrid Poplar for Bioenergy and Biomaterials Feedstock Production on Appalachian Reclaimed”

**4.2.3.2 Caso minería ilegal, Ghana.** Los cultivos bioenergéticos están siendo utilizados para recuperar tierras que antes eran destinadas para la minería ilegal, tal es el caso de Ghana, país el cual busca rehabilitar alrededor de 14000 Ha de tierras contaminadas por la minería ilegal mediante el cultivo de pastos ornamentales y bambú. Estos cultivos ayudan a recuperar la estabilidad del suelo y al mismo tiempo son una fuente de energía renovable (Bioenergy Crops, n.d.; Forbes Africa, 2018).

#### **4.2.4 Sistemas integrados de energía renovable**

**4.2.4.1 Sistema híbrido en la mina de Prosper-Haniel, Alemania.** En Alemania se contempla la construcción de un complejo sistema de energía renovable de 200 MW en el cual se integrarían paneles solares fotovoltaicos, turbinas eólicas, biomasa y una central hidroeléctrica reversible (Fig. 28). Durante su etapa de operación, los paneles solares y las turbinas eólicas se encargarán de generar la energía necesaria para abastecer 4000 hogares, sin embargo, cuando la demanda de

energía sea menor a la oferta, la energía restante se usará para bombear el agua que se encuentra en las profundidades a la superficie, donde será almacenada. En días en los cuales la energía solar y eólica no den abasto para satisfacer la demanda energética, el agua almacenada en la superficie será liberada para la generación de energía hidroeléctrica (Fan et al., 2020).

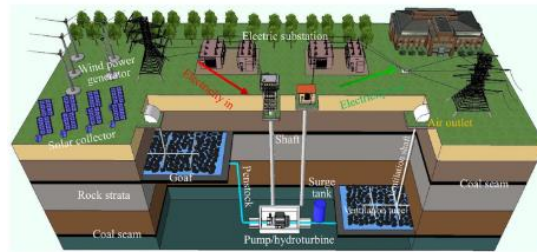


Figura 32. Sistema de energía renovable en la antigua mina de carbón Prosper-Haniel. Nota. Tomado de: Preliminary feasibility analysis of a hybrid pumped-hydro energy storage system using abandoned coal mine goafs.

**4.2.4.2 Sistema híbrido en Queensland, Australia.** En una antigua mina de oro en Queensland, Australia, se está construyendo un proyecto híbrido de energía renovable que consiste en un sistema de 270 MW de energía solar (fig. 29) y 250 MW de energía hidráulica. La energía hidráulica funcionará mediante el uso de dos grandes reservas de agua que se encuentran a diferente altura y que fueron formadas durante la etapa operacional de la mina. Cuando la demanda energética sea baja, la energía solar brindará electricidad para bombear agua desde el pozo inferior al superior, en donde se almacenará hasta que la demanda de energía sea alta, entonces se procederá a liberarla, pasará por una turbina generando así electricidad (fig.30). Se estima que este sistema generará energía suficiente para 140.000 hogares (ARENA, 2017)



*Figura 33.* Sistema de paneles solares en una mina de oro clausurada en Queensland, Australia.

Nota. Tomado de: <https://www.solarquotes.com.au/blog/kidston-solar-energy-generation-mb0895/>



*Figura 34.* Pozos que serán utilizados para la generación de electricidad en mina de Queensland, Australia. Nota. Tomado de: <https://arena.gov.au/blog/kidston/>

**4.2.4.3 Sistema híbrido en la mina de Agnew, Australia.** Un sistema híbrido de energía renovable se instaló en la mina de oro Agnew, Australia, el cual consiste de 10.000 paneles solares que generan 4 MW, 5 turbinas eólicas las cuales generan 18 MW, una batería de almacenamiento de energía de 13 MW y una central eléctrica de motor a gas de 16 MW (Fig. 31). Se estima que este sistema abastecerá el 60% de la energía requerida por la mina, la cual aún se encuentra en operación (*Gold Fields invests in hybrid power for Agnew*, 2019). Así mismo, se espera que este sistema funcionando una vez la mina sea clausurada.



*Figura 35.* Sistema de paneles solares fotovoltaicos y turbinas eólicas en la mina de Agnew, Australia. Nota. Tomado de: <https://www.miningmagazine.com/power-remote-power/news/1365714/gold-fields-invests-in-hybrid-power-for-agnew>

## 5. Análisis de la posible implementación en Colombia

### 5.1 Rellenos sanitarios

En el año 2018, Colombia contaba con 275 sitios para disposición de la basura, de los cuales 158 son rellenos sanitarios, 13 celdas de contingencia, 54 botaderos a cielo abierto, 34 celdas transitorias, siete sitios de enterramiento y un sitio de quema de basura (*Basura a punto de explotar*, 2018).

Un estudio realizado por el Departamento Nacional de Planeación en el año 2016, estimó que en Colombia se producen 11,6 millones toneladas de basura al año y solamente se está reciclando el 17% (DNP, 2016). Este mismo estudio determinó que los rellenos sanitarios de alrededor de 321 municipios cumplirían su vida útil dentro de 5 años (2021).

Esta situación representa una crisis tanto ambiental como de salubridad pública, ya que en Colombia la mayoría de los rellenos sanitarios se encuentran localizados cerca o dentro de las

zonas urbanas, como es el caso del relleno sanitario “El Carrasco” en Bucaramanga y del relleno sanitario “Doña Juana” en Bogotá, entre otros.

Si bien esto representa un problema, también es una oportunidad para que las autoridades competentes aprovechen estos sitios por clausurar para el desarrollo de energías renovables. Para ello, lo ideal sería que se implementaran planes nacionales para re utilizar estas tierras, tal como ha hecho Estados Unidos con el programa RE-Powering America’s Land (EPA, 2019), o como lo ha venido desarrollando Hungría y Reino Unido, donde se ha utilizado un geosistema para determinar el potencial solar de todos los rellenos sanitarios de dichos países, con el fin de instalar paneles fotovoltaicos solares.

## 5.2 Caso Bucaramanga

**5.2.1 Descripción del sitio.** El relleno sanitario el Carrasco se encuentra ubicado en el suroccidente de la ciudad de Bucaramanga, en una cañada natural dentro de los depósitos aluviales de la meseta de Bucaramanga, en la zona central del Distrito de Manejo Integrado (DMI) de Bucaramanga, en una porción sustraída de dicho distrito sobre el sector conocido como Malpaso. El terreno tiene una extensión de 93.2 ha, dividida en tres zonas o cárcavas naturales (*Relleno sanitario (Landfill), El Carrasco, Bucaramanga, Colombia, 2014*).

El Carrasco entró en funcionamiento en el año 1978 como un botadero de basura a cielo abierto (Unidad investigativa Vanguardia Liberal, 2019). Ocho años más tarde fue clausurada la cárcava dos, allí están apiladas mas de 800.000 toneladas de basura, sin tratamiento alguno (*Relleno sanitario (Landfill), El Carrasco, Bucaramanga, Colombia, 2014*).

Para el año 2010 El Carrasco recibía cerca de 743,3 ton/día de basura, provenientes de 11 municipios. Actualmente se estima que se reciben 1000 toneladas diariamente, siendo Bucaramanga el municipio que más aporta (76.5%) residuos (El Espectador, 2018; Noguera & Olivero-Verbel, 2010). Sin embargo, desde el año 2007, el relleno sanitario culminó su vida útil, manteniéndose en operación desde entonces gracias a una celda transitoria. Desde entonces, en varias ocasiones se ha ordenado el cierre definitivo de El Carrasco pero la administración local se ha declarado en emergencia sanitaria, postergando el cierre definitivo del sitio.

Actualmente existe una planta de tratamiento de lixiviados y un sistema de recolección de gases de relleno sanitario en la carcava 1, donde se encuentran 2.400.000 toneladas de basura enterradas. Se estima que se producen 180 m<sup>3</sup> gas/hora, lo suficiente para abastecer las necesidades eléctricas, sin embargo, este sistema solo se encarga de extraer el gas a la superficie para quemarlo, más no de convertirlo en energía.

**5.2.2 Recomendaciones para la generación de energías renovables en el relleno sanitario El Carrasco.** Ante la inminente clausura del relleno sanitario El Carrasco surge la idea de transformar este sitio, que representa un peligro tanto en materia ambiental como de salubridad, en un lugar donde se genere energía renovable. Como se mencionó anteriormente, transformar estos lugares en proyectos de energía renovable representa beneficios tanto económicos como ambientales. Así mismo, las comunidades aledañas se verían beneficiadas ya que observarían como un terreno que por décadas ha traído numerosos inconvenientes estaría siendo transformado en un proyecto innovador. A continuación mencionaremos los posibles proyectos que se podrían desarrollar una vez clausurado el relleno sanitario.

**5.2.2.1 Parque solar.** Tal como se evidenció en la revisión de la literatura, desarrollar proyectos de energía solar en rellenos sanitarios clausurados es la práctica más utilizada en la actualidad. El futuro cercano del Carrasco representa una oportunidad para implementar esta iniciativa.

La instalación de paneles fotovoltaicos solares sobre las zonas clausuradas del relleno sanitario es una idea que, hasta el momento, no ha sido desarrollada en Colombia, y sería un símbolo de desarrollo para la región.

**5.2.2.2 Biogás.** Anteriormente mencionamos que existe un sistema recolector de gases en El Carrasco, sin embargo, estos gases son quemados y no se están utilizando como fuente de energía renovable. Para ello, se debería instalar una planta generadora de energía a partir del biogás. Sin embargo, se deben tener aspectos tales como la cantidad de metano presente en los residuos sólidos que llegan al relleno sanitario, el tiempo transcurrido desde su disposición final o clausura y la humedad del relleno, entre otros.

Al generar electricidad a partir del biogás en los rellenos sanitarios se estaría haciendo un doble aporte al medio ambiente debido a la reducción de gases de efecto invernadero, primero, se estaría capturando el gas metano y segundo, se estaría reemplazando el uso de combustibles fósiles para la generación de electricidad.

**5.2.2.3 Cultivos bioenergéticos.** El Carrasco también sería candidato para la producción de biocombustibles mediante los cultivos bioenergéticos. Se recomienda hacer estudios sobre comportamiento de diferentes especies de plantas en muestras de tierra del relleno sanitario para determinar cuál o cuáles serían las más eficientes para este terreno.

El Carrasco actualmente cuenta con un sistema de recolección de lixiviados, por ende, se podría analizar la posibilidad de usar estos líquidos con fines de riego para los cultivos bioenergéticos.

**5.2.2.4 Sistema híbrido de energía solar y biogás.** Con el fin de buscar una mayor eficiencia energética y la posibilidad de suplir energéticamente comunidades aledañas, se podría desarrollar un sistema híbrido de energías renovables entre energía solar y biogás. Sin embargo, se deben realizar estudios de factibilidad para ver si es una opción viable.

## 6. Conclusiones

En este estudio se realizó una revisión de la literatura sobre los tipos de energía renovable que se pueden generar tanto en rellenos sanitarios clausurados como en proyectos mineros a cielo abierto abandonados o cerrados. Se encontró que en rellenos sanitarios clausurados se puede generar energía solar, geotérmica, biomasa, eólica y biogás, mientras que en proyectos de minería a cielo abierto clausurados se puede generar energía solar, eólica y biomasa, siendo la energía solar el tipo de energía renovable que ha sido mayormente aplicada tanto en rellenos sanitarios como en sitios mineros. De igual manera, se encontró que existen proyectos híbridos de energía renovable con el fin de tener una mayor eficiencia energética, es decir, proyectos que contienen dos o más tipos de energía renovable.

Se logró evidenciar que Estados Unidos es el líder a nivel mundial en el desarrollo proyectos de energías renovables en tierras contaminadas, lo cual se debe a que cuentan con un plan nacional claro y conciso para reutilizar este tipo de terrenos. Así mismo, se identificó países como Hungría y Reino Unido también han utilizado nuevas tecnologías que facilitan la identificación del potencial eléctrico fotovoltaico en todos los rellenos sanitarios del territorio nacional. Por otro lado, se pudo evidenciar que este tipo de proyectos se han desarrollado, en su gran mayoría, en países desarrollados, lo cual se podría deber al elevado costo que representan este tipo de proyectos así como la falta de planeación nacional en materia de energía renovable en países en vía de desarrollo.

Por último, se realizaron algunas recomendaciones sobre el tipo de energías renovables que se podrían desarrollar en el relleno sanitario El Carrasco, en Bucaramanga, Colombia, ante su posible clausura.

### Referencias Bibliográficas

- Abu Qdais, H. A., Maqableh, A. M., Al Nawayseh, L. M., & Al Jamal, N. M. (2011). Energetic and methane emission reduction potentials from an unsanitary landfill. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 34(4), 360–369. <https://doi.org/10.1080/15567031003614615>
- ARENA. (2017). *Renewable, reliable energy from an old, abandoned mine site? That's gold*. <https://arena.gov.au/blog/kidston/>
- Basura a punto de explotar*. (2018). <https://sostenibilidad.semana.com/impacto/articulo/manejo-de-residuos-en-colombia-es-una-bomba-a-punto-de-estallar/40963>
- Bioenergy Crops. (n.d.). *Soil regeneration through biomass to fix damaged mine lands*. <http://bioenergycrops.com/blog/2019/08/05/soil-regeneration-through-biomass-to-fix-damage-mine-lands/>
- Bolan, N. S., Thangarajan, R., Seshadri, B., Jena, U., Das, K. C., Wang, H., & Naidu, R. (2013). Landfills as a biorefinery to produce biomass and capture biogas. In *Bioresource Technology* (Vol. 135, pp. 578–587). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.135>
- Bourcet, C. (2020). Empirical determinants of renewable energy deployment: A systematic literature review. *Energy Economics*, 85, 104563. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104563>
- Chen, Y., Wang, J., Ma, C., & Shi, G. (2019). Multicriteria performance investigations of a hybrid ground source heat pump system integrated with concentrated photovoltaic thermal solar collectors. *Energy Conversion and Management*, 197(July), 111862. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111862>

- Choi, Y. (2013). Utilization of Renewable Energy Technology in the Mining Industry. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 50(3), 422–429. <https://doi.org/10.12972/ksmer.2013.50.3.422>
- Choi, Y., & Song, J. (2016). Sustainable development of abandoned mine areas using renewable energy systems: A case study of the photovoltaic potential assessment at the tailings dam of abandoned Sangdong mine, Korea. *Sustainability (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/su8121320>
- Choi, Y., & Song, J. (2017). Review of photovoltaic and wind power systems utilized in the mining industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75(November 2016), 1386–1391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.127>
- Ciriminna, R., Albanese, L., Pecoraino, M., Meneguzzo, F., & Pagliaro, M. (2018). Solar Landfills: Economic, Environmental, and Social Benefits. *Energy Technology*, 6(4), 597–604. <https://doi.org/10.1002/ente.201700620>
- Coccia, C. J. R., Gupta, R., Morris, J., & McCartney, J. S. (2013). Municipal solid waste landfills as geothermal heat sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 463–474. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.028>
- DNP. (2016). *Rellenos sanitarios de 321 municipios colapsarán en cinco años, advierte el DNP*. <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Rellenos-sanitarios-de-321-municipios-colapsarán-en-cinco-años,-advier-te-el-DNP--.aspx>
- Edrisi, S. A., & Abhilash, P. C. (2016). Exploring marginal and degraded lands for biomass and bioenergy production: An Indian scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1537–1551. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.050>
- El Espectador. (2018). *Rellenos sanitarios, un dolor de cabeza*. <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/rellenos-sanitarios-un-dolor-de-cabeza-articulo-817830>
- EPA. (2019). *RE-Powering America ' s Land Initiative: Tracking Completed Projects on Contaminated Lands, Landfills, and Mine Sites*. May, 1–39. [http://www.epa.gov/renewableenergyland/docs/re-powering\\_financing\\_fact\\_sheet.pdf](http://www.epa.gov/renewableenergyland/docs/re-powering_financing_fact_sheet.pdf)

Epa, 2009. (2009). *Emplazamiento de plantas de energía renovable en tierras contaminadas y sitios mineros*. [http://www.epa.gov/superfund/spanish/pdfs/renewable\\_energy\\_espanol.pdf](http://www.epa.gov/superfund/spanish/pdfs/renewable_energy_espanol.pdf)

Fan, J., Xie, H., Chen, J., Jiang, D., Li, C., Ngaha Tiedeu, W., & Ambre, J. (2020). Preliminary feasibility analysis of a hybrid pumped-hydro energy storage system using abandoned coal mine goafs. *Applied Energy*, 258(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114007>

Fei, F., Wen, Z., & Clercq, D. De. (2019). Spatio-temporal estimation of landfill gas energy potential : A case study in. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103(July 2017), 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.036>

Forbes Africa. (2018). *No Title*. <https://www.forbesafrica.com/entrepreneurs/2018/11/21/the-impact-investor/>

*From mining tin to harvesting the sun!* (2011). <https://premierconstructionnews.com/2011/08/26/from-mining-tin-to-harvesting-the-sun/>

Garbo, F., Lavagnolo, M. C., Malagoli, M., Schiavon, M., & Cossu, R. (2017). Different leachate phytotreatment systems using sunflowers. *Waste Management*, 59, 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.035>

Garbo, F., Pivato, A., Manachini, B., Giovanni, C., & Cristina, M. (2019). Assessment of the ecotoxicity of phytotreatment substrate soil as landfill cover material for in-situ leachate management. *Journal of Environmental Management*, 231(September 2018), 289–296. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.014>

*Gas metano contamina 84 veces más que el dióxido de carbono*. (2016). <https://www.forbes.com.mx/gas-metano-contamina-84-veces-mas-que-el-dioxido-de-carbono/>

*Gold Fields invests in hybrid power for Agnew*. (2019). <https://www.miningmagazine.com/power-remote-power/news/1365714/gold-fields-invests-in-hybrid-power-for-agnew>

Grillo, R. J. (2014). Energy Recycling – Landfill Waste Heat Generation and Recovery. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 1(4), 150–156. <https://doi.org/10.1007/s40518->

014-0017-2

- Hansen, J. P., Narbel, P. A., & Aksnes, D. L. (2017). Limits to growth in the renewable energy sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70(October 2016), 769–774. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.257>
- HDR. (2012). *Meet a landfill that's greener than grass*. <https://www.hdrinc.com/portfolio/hickory-ridge-landfill>
- Induambiente. (2010). *¡Hágase la Luz!* <https://www.induambiente.com/especial/energia/hagase-la-luz>
- Jacob, B. A., & Ayers, M. R. (2018). Landfill Solar: Trash To Treasure\*. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, 115(5), 37–47. <https://doi.org/10.1080/01998595.2018.12027707>
- Lino, F. A. M., & Ismail, K. A. R. (2018). Evaluation of the treatment of municipal solid waste as renewable energy resource in Campinas, Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 29(October 2016), 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.06.011>
- Lucia, U., Simonetti, M., Chiesa, G., & Grisolia, G. (2017). Ground-source pump system for heating and cooling: Review and thermodynamic approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70(December 2016), 867–874. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.268>
- Manwell, J. F., MacLeod, J., Wright, S., DiTullio, L., & McGowan, J. G. (2006). Hull Wind II: A Case Study of the Development of a Second Large Wind Turbine Installation in the Town of Hull, MA. *American Wind Energy Association. Windpower 2006 Conference, July 2014*, 1–20. <http://masstech.org/documents/2006-06-AWEA-wind-Hull2.pdf>
- Mehmood, M. A., Ibrahim, M., Rashid, U., Nawaz, M., Ali, S., Hussain, A., & Gull, M. (2017). Biomass production for bioenergy using marginal lands. *Sustainable Production and Consumption*, 9(January 2016), 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.08.003>
- Menéndez, J., Ordóñez, A., Álvarez, R., & Loredó, J. (2019). Energy from closed mines: Underground energy storage and geothermal applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 108(April), 498–512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.007>

- Milbrandt, A. R., Heimiller, D. M., Perry, A. D., & Field, C. B. (2014). Renewable energy potential on marginal lands in the United States. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 473–481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.079>
- Mustafa Omer, A. (2008). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 344–371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.003>
- Narbel, P. A., & Hansen, J. P. (2014). Estimating the cost of future global energy supply. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.011>
- Noguera, K., & Olivero-Verbel, J. (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: Caso Colombiano. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(132), 347–356.
- Novambiente. (2014). *IMPIANTO FOTOVOLTAICO DA IMW SULLA EX DISCARICA*. <http://novambiente.altervista.org/Impianto-fotovoltaico-sulla-ex-discardica.html>
- Perdana. (2018). Tessman road landfill solar energy cover. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9, pp. 1689–1699). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Portal Minero. (2012). *Premian a Chuquiamata por incorporación de energía solar*. <http://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=65831602>
- Pv Europe. (2017). *Innovative PV landfill system saves costs and protects the environment*. <https://www.pveurope.eu/News/Installation/Innovative-PV-landfill-system-saves-costs-and-protects-the-environment>
- Rawlings, R. H. D., & Sykulski, J. R. (1999). Ground source heat pumps: A technology review. *Building Services Engineering Research and Technology*, 20(3), 119–129. <https://doi.org/10.1177/014362449902000304>
- Relleno sanitario (Landfill), El Carrasco, Bucaramanga, Colombia.* (2014). <https://www.ejatlaz.org/conflict/relleno-sanitario-landfill-el-carrasco-bucaramanga-colombia>

- Renewables Now. (2015). *IBC hands over 18.5-MWp solar park in Hungary to operator*. <https://renewablesnow.com/news/ibc-hands-over-185-mwp-solar-park-in-hungary-to-operator-498370/>
- Salasovich, J., & Mosey, G. (2011). Feasibility Study of Solar Photovoltaics on Landfills in Puerto Rico of Energy Weatherization and Intergovernmental Program Technical Assistance Project on behalf of the Puerto Rico Environmental Quality Board Feasibility Study of Solar Photovoltaics on L. In *National Renewable Energy Laboratory* (Issue NREL/TP-6A20-52181).
- Sangiorgio, S., & Falconi, M. (2015). *Technical feasibility of a photovoltaic power plant on landfills . A case study*. 82, 759–765. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.807>
- Scottish power renewables. (2020). *Onshore Wind*. [https://www.scottishpowerrenewables.com/pages/black\\_law.aspx](https://www.scottishpowerrenewables.com/pages/black_law.aspx)
- Solar Builder. (2015). *Largest solar project in U.S. procures REC solar panels*. <https://solarbuildermag.com/projects/largest-landfill-solar-project-in-u-s-procures-rec-solar-panels/>
- Solar Builder. (2018). *Details on the largest landfill solar project in Ohio now being constructed*. <https://solarbuildermag.com/news/details-on-the-largest-landfill-solar-project-in-ohio-now-being-constructed/>
- Song, J., & Choi, Y. (2016). Analysis of wind power potentials at abandoned mine promotion districts in Korea. *Geosystem Engineering*, 19(2), 77–82. <https://doi.org/10.1080/12269328.2015.1096842>
- Spokas, K., Bogner, J., Chanton, J. P., Morcet, M., Aran, C., Graff, C., Golvan, Y. M. Le, & Hebe, I. (2006). Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management*, 26(5), 516–525. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.07.021>
- Szabó, S., Bódis, K., Kougiás, I., Moner-Girona, M., Jäger-Waldau, A., Barton, G., & Szabó, L. (2017). A methodology for maximizing the benefits of solar landfills on closed sites. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(February), 1291–1300. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.117>

- The Straits Times. (2019). *Energy comes clean at Singapore's only landfill Semakau*. <https://www.straitstimes.com/singapore/energy-comes-clean-at-singapores-only-landfill-semakau>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2012). *A Breath of Fresh Air for America's Abandoned Mine Lands*. <https://semspub.epa.gov/work/11/176038.pdf>
- Unidad investigativa Vanguardia Liberal. (2019). *El Carrasco: ¿20 años "tirados a la basura"?* <https://m.vanguardia.com/especiales-vanguardia/contenido/el-carrasco-20-anos-tirados-a-la-basura/>
- Villanueva-estrada, R. E., Rocha-miller, R., Arvizu-fernández, J. L., & Castro, A. (2019). Energy production from biogas in a closed landfill: A case study of Prados de la Montaña, Mexico City. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 31(December 2017), 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.12.005>
- World Energy Trade. (2019). *La mina Los Bronces de Chile instala innovadores paneles solares flotantes*. <https://www.worldenergytrade.com/index.php/m-news-alternative-energy/96-news-energia-solar/4432-la-mina-los-bronces-de-chile-instala-innovadores-paneles-solares-flotantes>
- Yucekaya, A. D. (2013). Landfill gas to the energy potential of Turkey: A scenario-based multi-period simulation. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 8(3), 227–234. <https://doi.org/10.1080/15567249.2011.584113>