

Propuestas de Tecnologías de Innovación para Ciudades Sustentables: Más allá del COVID-19

Celis-Martínez K.S.¹, Escobar-Benitez M., López-Ibarra A.M.², Ortega-Castro G.L.², Ortega-Méndez N.¹, Vargas-Martínez E.¹, Medina-Mejía M.G.¹, Serafín-Muñoz A.H.^{1*}

¹Departamento de Ingenierías Civil y Ambiental de la División de Ingenierías, Campus Guanajuato de la Universidad de Guanajuato.

²Departamento de Ingeniería Química de la División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato de la Universidad de Guanajuato.

* Autor responsable: sermuah@ugto.mx

Resumen

Se ha indicado que la infección por el COVID-19 puede producirse por la exposición al virus en el aire en determinadas circunstancias, sobre todo en espacios cerrados y en zonas expuestas de contaminación atmosférica. Consecuentemente es crucial desarrollar tecnologías de innovación que mejoren la calidad del aire en el control de la infección ante está la pandemia, con el objetivo de ser implementadas en comunidades y ciudades, promoviendo además el concepto de ciudades sustentables. En este trabajo de investigación del Verano UG versión 2021, se revisaron más de 800 referencias bibliográficas sobre trabajos de tecnologías de innovación para ciudades sustentables, calidad de aire y COVID-19, a través de plataformas digitales de Web of Science y PubMed en donde se obtuvo el análisis bibliométrico por Vosviewer on line. Los resultados indicaron una fuerte tendencia hacia dos temáticas: los biocombustibles y la fitorremediación de aire contaminado. Por lo que en el presente trabajo se abordaron dos casos de estudio: 1) Biocombustibles, desde una perspectiva de aprovechamiento sustentable, y 2) Fitorremediación del Aire Contaminado, con la innovadora propuesta del diseño de Túneles verdes.

Palabras clave: biocombustibles, biodiesel, bioetanol, biogás, pellets, GEI, túneles verdes, COVID-19.

Introducción

Durante este 2021, la humanidad está adaptándose en forma resiliente a la pandemia del coronavirus del SARS-CoV-2 (COVID-19) (Muñoz, 2021). A medida que aumentan los casos de COVID-19 en todo el mundo, necesitamos comprender mejor las vías de transmisión. La organización en las ciudades es un punto crucial de estudio para atender esta problemática de salud; pero no sólo de la salud antropogénica sino también de la salud ambiental (Shurson, 2020; Tira, 2020). El objetivo de las ciudades sustentables es que estas sean inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles (UN). Para lograr esto una ciudad sustentable debe, entre muchas otras cosas, reducir el impacto ambiental negativo sobre la calidad del aire. El monóxido de carbono (CO) es un gas venenoso que combinado con la hemoglobina de la sangre reduce el flujo de oxígeno necesario para el funcionamiento del cuerpo (Romanelli, 2020; Tira, 2020). Uno de los desafíos de las ciudades sustentables son la generación de residuos sólidos urbanos (RSU). En la actualidad, cada año se producen alrededor de 1.900 millones de toneladas de RSU a escala mundial, de las cuales casi el 30% sigue sin ser recogido por los sistemas de gestión de residuos de los municipios (de Carvalho et al., 2021). Se espera que la generación de RSU aumente a 3,4 mil millones de toneladas para 2050 (Toussaint, 2021), lo que constituye un serio problema para la sociedad y el medio ambiente, es por eso que se buscan nuevas formas sustentables de generar energía, por ejemplo, los biocombustibles que permite reducir las emisiones de gases efecto invernadero, siempre y cuando los procesos de producción sean sustentable. Además, en un reciente estudio publicado por la SEMARNAT se habla de la importancia del aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, debido a que al descomponerse en rellenos sanitarios, la materia orgánica genera gases de efecto invernadero (GEI), dióxido de carbono (CO₂) y metano, emisiones que contribuyen al cambio climático mundial. Además, estas emisiones también afectan la calidad del aire y están asociadas con problemas de salud pública, como el asma. El hecho de desviar del flujo de desechos sólidos la parte correspondiente a residuos orgánicos para su manejo en procesos de compostaje y

digestión anaeróbica (DA) incluida la codigestión no sólo contribuye a conservar el valioso y cada vez más reducido espacio destinado a los rellenos sanitarios, sino que también aporta beneficios económicos y ambientales, entre los que figuran la generación de energía renovable, la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, y mejores condiciones de los recursos hídricos y el suelo (CCA, 2017). Como consecuencia de la pandemia de COVID-19, propició la generación de una cantidad muy grande de residuos sólidos, como guantes y cubrebocas, que tenían una mala disposición, y otros utilizados por personal médico como los trajes EPI, los cuales terminaban en tiraderos de basura y lo cual representó un foco de infección incontrolable. En base a lo anterior como estrategia del aprovechamiento sustentable varios trabajos han desarrollado producir biocombustibles teniendo como materia prima los RSU, e inclusive de residuos generados por el COVID. Por ejemplo el bioetanol puede obtenerse a partir de estos trajes médicos y guantes de polipropileno mediante la pirólisis, obteniendo eficiencia de producción del 88% (Di Gruttola & Borello, 2021).

En paralelo, otras de las tecnologías que se ha impulsado en los últimos años para mejorar la calidad del aire es el uso de la fitorremediación en ciudades urbanas. Existen pocos trabajos reportados sobre el diseño de túneles verdes subterráneos en las urbes. La idea del recubrimiento de estos túneles con un muro cubierto por alguna especie herbaria surge de la idea de las Green walls que pueden clasificarse de dos formas, de forma pasiva y forma activa, la forma pasiva hace uso del aire difundido sobre la superficie externa de la especie en cuestión de una forma lenta. Mientras que la forma activa está en constante filtración de aire. Lo anterior depende de las condiciones del tipo de especie, de la temperatura y la humedad, (Abdo & Huynh, 2021). Ante esta Era del COVID-19, el objetivo del presente trabajo fue analizar dos casos de estudio de tecnologías de innovación para mejorar la calidad del aire: 1) Biocombustibles y tecnologías de innovación, y 2) Desarrollar y proponer el diseño de un sistema de purificación del aire por plantas para remediar el control de la calidad del aire en los túneles con altas emisiones de GEI.

Metodología

Se establecieron tres etapas cruciales, Etapa 1: Búsqueda de información. Se llevó a cabo la búsqueda de más de 850 publicaciones en bases de datos electrónicas como Google Scholar, Mendeley y ELSEVIER. Con la base de datos bibliográficos se llevó a cabo las gráficas y análisis de la correlación de palabras claves en base al software VosViewer V. 1.6.2. Etapa 2: Análisis y selección de los resultados bibliométricos. Etapa 3: Diseño y desarrollo de propuestas para los dos casos de estudio.

Resultados y discusión

En la figura 1 se representan las gráficas del análisis bibliométrico por Vosviewer.

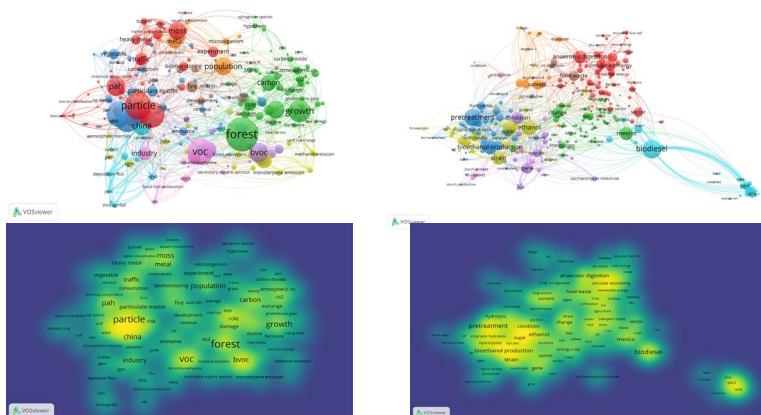


Figura 1. Gráficas representativas bibliométricas de la búsqueda de un total de 850 referencias bibliográficas; representación en network (superior) y densidad (inferior), a través de la herramienta digital vosviewer, v. 1.6.16, on line).

Caso de Estudio: Biocombustibles

Aún hoy en día, el combustible que principalmente se utiliza en todo el mundo es el de origen fósil. Debido a esto, la producción de combustible se ha visto limitada en los últimos años, lo que ha provocado su agotamiento y encarecimiento. Trabajos han reportado el consumo mundial las reservas de petróleo se agotarán hacia el año 2043 (Jefferson, 2020). En 2015, todos los Estados Miembros de las Naciones Unidas aprobaron 17 Objetivos como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en la cual se establece un plan para alcanzar los Objetivos en 15 años (Richardson & Erdelen, 2020). Entre los objetivos que se mencionan anteriormente, los biocombustibles están relacionado con el número 7 que habla sobre energía asequible y no contaminante, y a la vez con el número 13 que se refiere a la acción por el clima, puesto que los biocombustibles permiten que las refinerías cumplan con las especificaciones más estrictas para el azufre, aromáticos, y RVP, todos los cuales han demostrado mejorar significativamente la calidad del aire, puesto que mantiene bajas las emisiones de evaporación, reduce el monóxido de carbono en vehículos antiguos, mejora la eficiencia de los combustibles, reduce las emisiones de PM₁₀ y ozono y reduce la contaminación global (Rolewicz-Kalinska et al., 2020).

Biodiesel

En las ciudades urbanas, una de las grandes causas de la contaminación del aire es la quema de combustibles fósiles, en donde el transporte vehicular es una fuente significativa de emisiones de CO, HC y PM, debido principalmente a una combustión incompleta del combustible (Blumberg et al., 2003). Comparado con el combustible diésel, el biodiesel emite 20%, 30% y 50% menos HC, CO y smok, respectivamente (Hajjari et al., 2017). La Environmental Protection Agency (EPA) reportó que las emisiones de material particulado disminuían un 47% y las de monóxido de carbono (CO) 48% cuando se usaba biodiesel. En consecuencia, el biodiesel es una alternativa que permite mantener la movilidad de las personas sin comprometer la calidad del aire. Además de su relación directa con la calidad del aire el uso de biodiesel también ayuda indirectamente a la salud de las personas pues disminuye la concentración de emisiones que pueden llegar a ser tóxicas para la ciudadanía. En la actualidad el biodiesel se puede ocupar como aditivo en motores de combustión a manera de mezcla, 20% (B20) o 50% (B50), o de manera directa cuando el motor está adaptado para eso debido a la elevada viscosidad del biocombustible (García-Díaz et al., 2013). En cuanto a el rendimiento es necesario modificar algunos factores en el diseño de los motores para que puedan igualar la eficiencia presentada por combustibles fósiles (Castells & Alsina, 2018). Otra ventaja del biodiesel es su toxicidad acuática, pues según el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) de los Estados Unidos se requieren concentraciones mayores a 1000 mg/L en el agua para llegar a niveles letales, por lo que se considera que su toxicidad es muy baja siendo inofensivo para la fauna acuática. Esto presenta la oportunidad de ocupar el biocombustible en zonas costeras para reducir el impacto en casos de derrames.

Aunque el objetivo del biodiesel en sus inicios era sustituir a los combustibles fósiles siendo una alternativa igual de eficiente, pero con menos repercusiones negativas al ambiente, a través de los años su uso se ha diversificado gracias a numerosas investigaciones. El biodiesel puede ser ocupado en cualquier motor de diésel por lo que se han realizado proyectos para ocuparlo como combustible para generadores eléctricos en comunidades rurales. En estos proyectos se plantea un proceso productivo en donde la materia prima para producir el biodiesel provenga de los residuos agrícolas de la comunidad así como sus propios residuos alimentarios y, una vez producido el combustible, se ocupe para generar electricidad que permita alimentar a las casas de la zona (Homer et al.). Proyectos como este presentan no solo una alternativa para la utilización de los residuos de una comunidad, sino que también amplían los sectores económicos de una localidad y con esto mejoran la calidad de vida de sus habitantes. Otra alternativa para el uso de biodiesel es como acelerador para la biodegradación de hidrocarburos durante derrames en medios acuáticos ya que la mezcla de biodiesel con diésel o gasolina tiene efectos sinérgicos de metabolismo permitiendo que el tiempo requerido para alcanzar un 50% de biodegradación se reduzca de 28 a 22 con B5 y de 28 a 16 días con B20 (Cedeño et al., 2017). Por otro lado, sí el biodiesel se produce en su totalidad a partir de aceite de cocina utilizado en las ciudades urbanas, con la correcta logística de recolección de dicho residuo, se puede tener un proceso económicamente viable que además es amigable con el ambiente. El biodiesel es una

alternativa sustentable y biodegradable a los combustibles derivados del petróleo. Esta alternativa surgió como resultado de la búsqueda para sustituir a los combustibles fósiles debido a la creciente deficit de los mismo durante los últimos años y a su impacto negativo sobre el medio ambiente. American Society of Testing and Materials (ASTM), define al biodiesel como “el éster monoalquílico de cadena larga de ácidos grasos derivados de recursos renovables, tales como aceites vegetales o grasas animales, para utilizarlos en motores de diesel”. El biodiesel se produce a partir de aceites animales o vegetales provenientes de cultivos como palma, soya, coco, girasol, canola, jatropha, moringa oleífera, entre otros (Cedeño et al., 2017). Dentro del aprovechamiento sustentable, es utilizar los residuos de aceite de cocina como materia prima para obtener biodiesel. Los aceites residuales de cocina pueden contaminar cerca de un millón de litros de agua sí son vertidos al drenaje de las casas(Quimis Indacochea, 2020). Una alternativa para usar estos residuos es integrarlos a la cadena de producción de biodiésel como materia prima, presentando una solución para el problema de contaminación, además es una alternativa de materia prima más barata que permite reducir el costo total de producción del biodiesel para que este pueda competir en el mercado contra los combustibles fósiles. En cuanto a la obtención de biodiesel a partir de este residuo como materia prima, varios trabajos coinciden en determinar las propiedades del aceite antes de la producción de biodiesel, esto debido a que las características de estos aceites pueden variar según el tiempo de uso. La producción de dos pasos de biodiesel es una buena manera de poder aprovechar estos recursos y reducir la concentración de AGL de esta materia prima pues el nivel de AGL en aceites usados es entre 10-15% para aceite vegetal usado amarillo y más del 15% para aceite vegetal usado café (Hajjari et al., 2017). En la figura 2, se muestra la producción del biodiesel desde una visión de economía circular partiendo desde los cultivos utilizados para realizar aceites de cocina y la recolección de los mismo, una vez usados, para su implementación como materia prima en la producción de biodiesel que será destinado como combustibles de vehículos o como fuente alterna para la producción de energía. también se observa la utilización del subproducto glicerina en otras industrias como la farmacéutica.



Figura 2. Obtención del Biodiesel desde una perspectiva de economía circular para ciudades sustentables, (autoría propia, por software Canva, v. online).

Bioetanol

Desde una perspectiva de economía circular para las ciudades sustentables, sí el bioetanol se produce en su totalidad a partir de residuos orgánicos se puede tener un proceso económicamente viable puesto que se invierte prácticamente poco en materia prima, y solo se requeriría inversión en los procesos de producción que relativamente resultan accesibles. Valdés (Valdés et al., 2015) utilizó la levadura *Saccharomyces cerevisiae* para la producción de bioetanol, llevado a cabo en un reactor con funciones tanto de gas-lift como de columna de burbuja y un volumen total de 3 L y un volumen de trabajo de 2 L, en el cual se registró el consumo de sustrato alrededor de las 24 horas obteniendo así una concentración final de 51 g/L de etanol a partir de 100 g/L con un rendimiento del 97.2 %. Desde una perspectiva de residuos COVID-19, sí el bioetanol se produce también mediante materiales compuestos por polipropileno habrá mayores reducciones de residuos sólidos y por ende menos contaminación, además el combustible líquido de pirólisis obtenido es comparable con las normas comerciales de combustible establecidas.

Ahmad y otros (2014) realizaron la pirólisis de polipropileno en un rango de temperatura de 523 K–673K (250–400 °C). El producto, compuesto por 98,7% en líquido; 69,8% en gas; 28,8% en residuo; 1,34% en agua, se obtuvo a 673 K (400 °C), (Jain, 2020). En la Figura 3, se observa como los residuos tanto orgánicos como plásticos se realiza un proceso para la obtención de bioetanol, el cual es utilizado como biocombustible por medios de transporte y con ello se ayuda a la reducción de emisiones del GEI, además la utilización de los residuos ayuda a la reducción de residuos sólidos lo que a la vez contribuye a tener un agua limpia, preservar la biodiversidad de especies y tener una salud humana digna, además se contribuye a la creación de empleos y con todo esto a las ciudades sustentables.

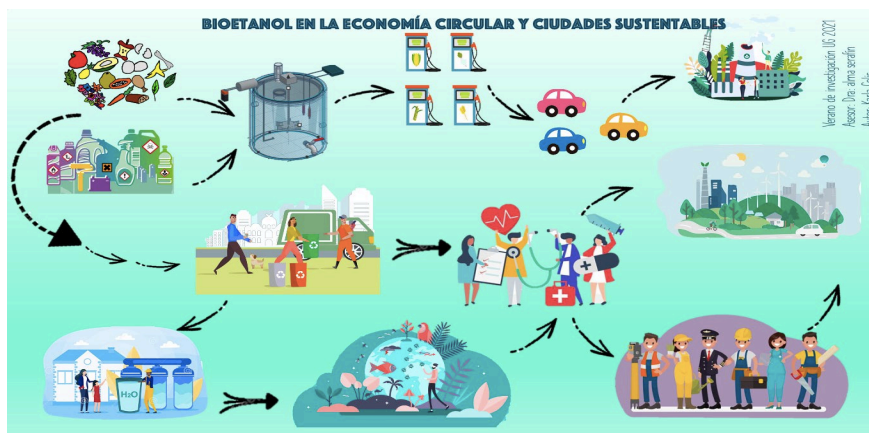


Figura 3. Obtención del Bioetanol desde una perspectiva de economía circular para ciudades sustentables. (autoría propia, por software Canva, v. online).

Biogás

El biogás es una buena alternativa para disminuir el impacto causado por los combustibles fósiles a la atmósfera, además de ser una solución a la escasez de recursos naturales no renovables, ya que el biogás puede obtenerse de biomasa residual. Todo esto se ajusta al objetivo 11 de la Agenda 2030 publicada por la ONU en 2015, en el cual se incluyen a las ciudades sostenibles. De acuerdo con el estudio realizado por (Yong et al., 2021) el biogás que se obtiene a partir de residuos orgánicos tiene un potencial de producción de energía de 3,941 MVh/día (megavatios por día), ahorrando un total de 2,735 ton/día de dióxido de carbono (CO₂) y 1,128 m²/día de área para rellenos sanitarios, cualidades por las cuales el uso de biogás como combustible, tiene mayores ventajas en comparación con un combustible fósil. Para incluir a la producción de biogás en una ciudad sostenible, es necesario ajustar sus etapas de elaboración dentro del concepto de economía circular. Por ejemplo, (D'Adamo et al., 2021) establecen que, para que el biogás puede participar dentro de esta nueva estructura en Italia, se debe dar prioridad a la implementación del mismo para la mejora del transporte público, logrando que, con dicho biocombustible, el costo del traslado disminuya, además de cerrar el ciclo de los productos agrícolas que ahí se genera, adoptando la meta de vertido cero (“zero landfilling”) y obteniendo subproductos valorizados para los agricultores (como el abono). En otro estudio realizado (Yaashikaa et al., 2020), la introducción del biogás en la economía circular debe incorporarse desde la correcta gestión de los residuos sólidos urbanos de los cuales se obtendrá el biocombustible, esto quiere decir, que se deben de implementar mejores planes de recolección, recuperación y restitución de estos. Además de la creación de biorrefinerías para el tratamiento de los residuos orgánicos, con el objetivo de obtener productos intermedios y finales de valor agregado. De la misma forma, (Rolewicz–Kalinska et al., 2020), plantean que para implementar la economía circular en el tratamiento de residuos orgánicos se debe de dar prioridad a la producción de biogás con degradación anaerobia, diseñando un sistema de recolección de residuos más efectivo y estableciendo leyes y normativas acordes que involucren tanto a la población como a la industria en el manejo y responsabilidad del destino final de sus residuos. En la Figura 4, se observa la integración del biogás desde una perspectiva sustentable.

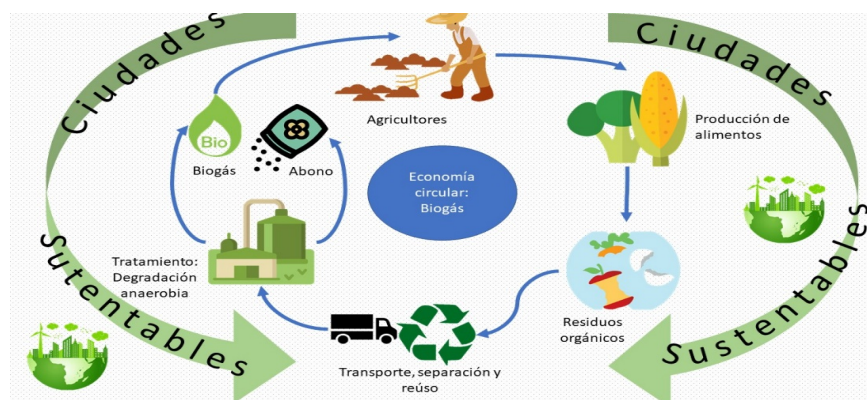


Figura 4. Obtención de Biogás para ciudades sostenibles. (autoría propia, por software Canva, v. online).

Pellets: Biocombustibles sólidos

La importancia de los biocombustibles sólidos radica en su elevado potencial para atender los requerimientos energéticos asociados al crecimiento poblacional dentro de las ciudades sostenibles (Nozari et al., 2018). Ante esta Era del COVID-19, el uso de los biocombustibles sólidos permitirá remplazar a los combustibles fósiles en la producción de energía eléctrica y calorífica (Meng et al., 2020). Con la serie ISO 17225 se están preparando casi 60 normas internacionales para biocombustibles sólidos en pellets de madera graduadas, briquetas de madera graduadas, astillas de madera graduadas, pellets no leñosas graduadas y combustibles de biomasa tratados térmicamente y densificados, entre otros (Drahniev et al., 2021). En la actualidad, México tiene una capacidad instalada de generación energética a partir de biomasa de 370 MW, y se encuentra distribuida en 17 estados de la República, liderando el Estado de México (47%), seguido de Veracruz (15%), Hidalgo (9%) y Jalisco y Coahuila (8%) (Perez-Pimienta et al., 2020). De dicho potencial energético se estima que el 77.9% podría provenir de la biomasa sólida, específicamente los residuos sólidos agroindustriales. Al fabricar y comercializar este tipo de combustibles, se disminuye considerablemente la cantidad de residuos en las grandes urbes, se reduce el volumen transportado, así como también se logra una combustión más limpia y eficiente, también puede suponer una fuente de ingresos y empleo. Bajo este mismo contexto, los biocombustibles sólidos pueden integrarse para sistemas a gran escala para aplicaciones de calefacción y refrigeración urbanas (Bonin & Lal, 2012). La calefacción y la refrigeración representan el 70% del consumo de energía de los edificios, y representan una parte significativa del consumo energético final mundial. El cambio a un sistema de refrigeración de distrito ha permitido reducir tanto las demandas de energía en un 46% y consumo anual en un 44%. Actualmente, la mayor parte de esta energía proviene de combustibles fósiles (gas, diesel, carbón, etc.), causando importantes emisiones de gases de efecto invernadero. En los sistemas de calefacción urbana centralizados mediante biomasa, así como en las calderas de biomasa descentralizadas a nivel residencial, los recursos energéticos que de otro modo se desperdiciarían pueden utilizarse para satisfacer las demandas relacionadas con la calefacción, el agua caliente sanitaria y otras aplicaciones. Además, determinados residuos agroindustriales, que normalmente se desechan, poseen un elevado poder calorífico superior similar al de otros biocombustibles sólidos estandarizados, lo que los hace óptimos para la generación de energía térmica a nivel residencial. Mientras los recursos de biomasa residual estén disponibles, los costes de asentamiento, eliminación y transporte de la biomasa continuarán bajos, lo que garantizará la sostenibilidad energética, y contribuirá a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. En la figura 5, se aprecia el enorme potencial y versatilidad del uso de los biocombustibles sólidos para ciudades sostenibles.

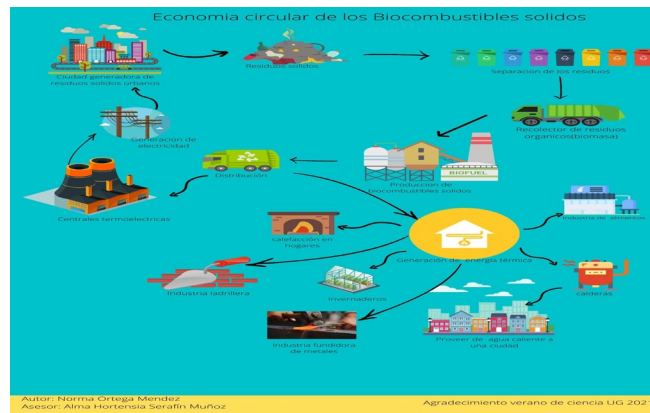


Figura 5. Obtención de Biocombustibles Sólidos para ciudades sustentables, (autoría propia, por software Canva, v. online).

Caso de Estudio: Túneles Verdes

Un tema poco estudiado es el uso de la fitorremediación en túneles subterráneos como herramientas para la filtración del aire contaminado. Esta iniciativa presenta un reto debido a que no existen estudios ni propuestas parecidas, dando una brecha importante para la innovación en la remediación del aire en ciudades como Guanajuato capital, México. Guanajuato es la ciudad capital del Estado de Guanajuato. Considerada como Patrimonio Cultural de la Humanidad en 1988 por la UNESCO (Vidal, 2017). Ciudad colonial y caracterizada por su tránsito vehicular en calles subterráneas que atraviesan la ciudad, cuya longitud total asciende a más de 8 kilómetros y se reparten en aproximadamente 23 túneles, (Méndez, 2020). La idea del recubrimiento de estos túneles con un muro cubierto por alguna especie herbaria surge de la idea de las Green walls que pueden clasificarse de dos formas, de forma pasiva y forma activa, la forma pasiva hace uso del aire difundido sobre la superficie externa de la especie en cuestión de una forma lenta. Mientras que la forma activa está en constante filtración de aire. Lo anterior depende de las condiciones del tipo de especie, de la temperatura y la humedad, (Abdo & Huynh, 2021). El objetivo del presente trabajo fue desarrollar y proponer el diseño de un sistema de purificación del aire por plantas para remediar el control de la calidad del aire en los túneles con altas emisiones de GEI.

Especies de Vegetales

En el presente trabajo, después de una búsqueda de 150 especies de fitorremediación del aire contaminado, se seleccionaron dos especies en base sus características de adaptación y capacidad de bioacumulación de GEI y emisiones de partículas: 1) **Helecho Serrucho (*Nephrolepis cordifolia*)**. Esta planta tiene hojas de color verde brillante con una medida de 16 a 32 pulgadas (40 a 80 cm) de largo y 4 pulgadas (10 cm) para el ancho aproximadamente, (Gauchan et al., 1970), Figura 6a. Es un reproductor vigoroso y formador de colonias, produciendo tubérculos pequeños escamosos en sus raíces. El helecho serrucho ha sido ampliamente utilizado para la fabricación de filtros con el objetivo de substrar el material particulado contaminante común que se encuentra en el aire. Una evaluación de los datos morfológicos de las plantas sugirió que la estructura de las raíces de las plantas influía mucho en la eficiencia de eliminación. Estos hallazgos demuestran el potencial para mejorar la tecnología de biofiltración botánica activa con la selección apropiada de especies de plantas, (Pettit et al., 2017). 2) **Poto Asiático (*Epipremnum aureum*) (L.)** Es una especie introducida en México. Esta planta es trepadora, presenta hojas con forma de corazón con líneas amarillas o blancas, la longitud de las hojas puede ser de hasta 4-6" con un diametro de hasta 4cm y una altura de hasta 20 metro (Taemthong, 2021). Tiene presencia de oxalato de calcio de modo que puede ser considerada como especie toxica para mascotas y personas, para estas últimas puede provocar dermatitis o eccema cutáneo, si es consumida puede causar irritación de la mucosa oral, también inflamación y nauseas. Naturalmente habita en ambientes húmedos y sombríos (no se recomienda la radiación solar directa), con climas tropicales y subtropicales. Es sensible a bajas temperaturas, pero tiene un buen comportamiento para temperaturas entre 17 y 30°C. Soporta malas condiciones de cultivo, por ejemplo, déficit de riego, pero se recomienda que su ambiente sea húmedo. El cultivo es de manera

vegetativa, para ser ubicada en plantas requiere sustrato suelto, un buen drenado y materia orgánica rica en nitrógeno, fósforo y potasio. El pH adecuado es aproximadamente 7. Es sensible a sustratos salinos. Es recomendable realizar podas de mantenimiento para controlar su crecimiento, puede llegar a ser invasiva. Se ha estudiado su capacidad para limpiar el aire contaminado, puede remover benceno y formaldehído, este último puede ser absorbido y metabolizado (Meshram et al.).

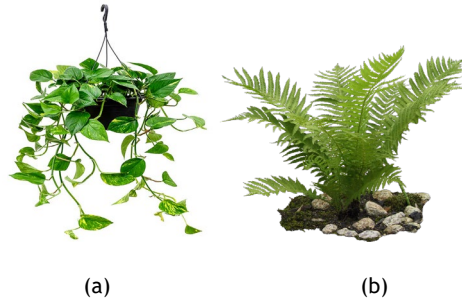


Figure 6. a) *Nephrolepis cordifolia*. b) *Epipremnum aureum*

Características del sitio de estudio

En Tabla 1, se presentan algunos trabajos de estudio de contaminantes encontrados en ciertos túneles de la ciudad, por lo que se justifica el uso de las especies mencionadas en la etapa anterior. La zona urbana de Guanajuato está dentro de la clasificación del Conglomerado Guanajuato (Eoceno) en el Miembro superior. La composición de los clastos de este miembro está constituida en mayor parte por granito, después por andesita, diorita, riolita y cuarzo lechoso (Miranda-Avilés, 2016). La andesita está compuesta por sílice, contiene entre 52 a 63% de sílice (SiO₂), también puede contener cristales de feldespato plagioclasas y algunos minerales piroxenos como clinopiroxeno y ortopiroxeno, así como pequeñas cantidades de hornblenda (GeologiaWeb). La riolita es félsica o ácida, por lo tanto, el porcentaje de sílice (SiO₂) supera el 63%, siendo en promedio alrededor del 70%. Además, se destaca el óxido de potasio (K₂O) que llega alrededor del 4.2%. Mientras el óxido de aluminio (Al₂O₃), alcanza un 13%.

Tabla 1 Relación de trabajos sobre los contaminantes en túneles de Guanajuato.

Contaminante	Túneles	Ref
Hidrocarburos aromáticos policíclicos: naftaleno, fluoranteno, acenaftileno, fenantreno, antraceno, acenafteno, fluoreno, pireno, entre otros.	Santa Fe, Galereña, Minero, Ponciano Aguilar, Tamazuca	(Puy-Alquiza et al., 2018)
CO y PM	Galereña, Barretero, Los Angeles, Ponciano Aguilar, Santa Fe, Tiburcio Alvarez, Calle Miguel Hidalgo y Tamazuca	(Zamorategui-Molina et al.)
Pb, Cu, Cr, Ni, V, Co, Zn, Sb	Galereña, Ponciano Aguilar, Minero, Santa Fe y Tamazuca	(Zamorategui-Molina et al., 2021)

Desarrollo del Diseño

Para el desarrollo del prototipo fue necesario considerar las medidas de los túneles de 6m x 5m x 20m. A través del programa ANSYS WORKBENCH v2016 se simuló el túnel con el mallado de plantas en la parte superior del túnel, considerado como la cúpula de este. En la figura 7 se observa el diseño del túnel con las medidas establecidas. Únicamente se tomó una sección representativa de todo el túnel, con el objetivo de tener una zona de control específica. En base a referencias, se puede lograr la disminución de las GEI dentro de un rango del 88-97% (Galán et al., 2016; Gu et al., 2017; Lee et al., 2018; Nadgórska-Socha et al., 2017; Taemthong, 2021; von Bobrutski et al., 2012).

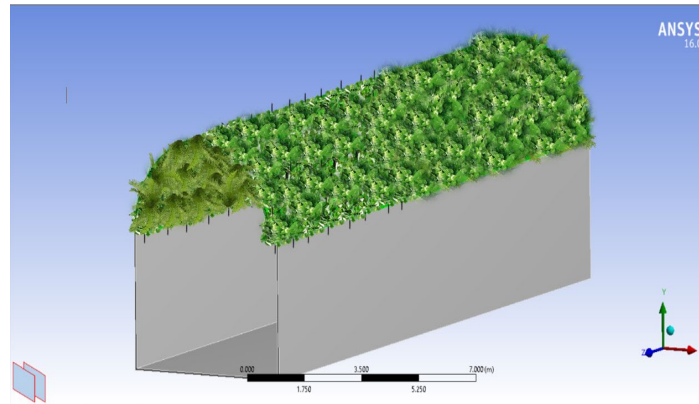


Figura 7. Distribución central y lateral de las especies, ANSYS WORKBENCH v2016.

Conclusiones

Ante esta Era del COVID-19, la continua búsqueda de tecnologías de innovación y su implementación en ciudades sustentables nos permite generar salud ambiental. Las perspectivas de introducción de los biocombustibles en las ciudades urbanas, en desplazamiento de los combustibles fósil, resulta un proceso viable y amigable con el ambiente, presenta una potencial eficiencia como combustible factible y económico. De manera integral, las tecnologías y el diseño de aplicación de fitorremediación en la vida urbana suman una valiosa solución en la contribución de la purificación y mejora de la calidad de aire, brindando espacios de salud ambiental ante la contingencia del COVID-19.

Referencias

- Abdo, P., & Huynh, B. P. (2021). An experimental investigation of green wall bio-filter towards air temperature and humidity variation. *Journal of Building Engineering*, 39, Article 102244. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102244>
- Blumberg, K., Walsh, C., & Pera, K. (2003). Gasolina y diesel de bajo azufre: la clave para disminuir las emisiones vehiculares. *Obtenido de https://www.theicct.org/sites/default/files/Bajo_Azufre_ICCT_2003.pdf*.
- Bonin, C., & Lal, R. (2012). AGRONOMIC AND ECOLOGICAL IMPLICATIONS OF BIOFUELS. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy*, Vol 117 (Vol. 117, pp. 1-50). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-394278-4.00001-5>
- Castells, X. E., & Alsina, S. B. (2018). Título de la obra: Economía circular: conversión de residuos en recursos. CCA. (2017). Residuos orgánicos de América del Norte. In.
- Cedeño, E. A. L., Rocha-Hoyos, J., Alvear, P. S., & Barboza, J. M. (2017). Producción e impacto del biodiesel: una revisión. *INNOVA Research Journal*, 2(7), 59-76.

- D'Adamo, I., Falcone, P. M., Huisingh, D., & Morone, P. (2021). A circular economy model based on biomethane: What are the opportunities for the municipality of Rome and beyond? [Article]. *Renewable Energy*, 163, 1660-1672. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.072>
- de Carvalho, N. R., de Barrosb, J. L., da Silvaa, D. A., Nakashimaa, G. T., & Yamajia, F. M. (2021). PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERIZATION OF BIOMASS USED AS SOLID FUEL IN A BOILER. *Química Nova*, 44(1), 35-40. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170663>
- Di Gruttola, F., & Borello, D. (2021). Analysis of the EU Secondary Biomass Availability and Conversion Processes to Produce Advanced Biofuels: Use of Existing Databases for Assessing a Metric Evaluation for the 2025 Perspective. *Sustainability*, 13(14), 7882.
- Drahniev, S. V., Zheliezna, T. A., & Bashtovyi, A. I. (2021). FEASIBILITY STUDY OF PROJECTS FOR THE PRODUCTION OF SOLID BIOFUELS FROM BIOMASS OF AGRARIAN PLANTATIONS PRUNING AND REMOVAL. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 43(2), 68-76.
- Galán, C., Alcázar, P., Oteros, J., García-Mozo, H., Aira, M. J., Belmonte, J., ... Domínguez-Vilches, E. (2016). Airborne pollen trends in the Iberian Peninsula. *Sci Total Environ*, 550, 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.069>
- García-Díaz, M., Gandón-Hernández, J., & Maqueira-Tamayo, Y. (2013). Estudio de la obtención de biodiesel a partir de aceite comestible usado. *Tecnología Química*, 33(2), 162-169.
- Gauchan, D., Manandhar, D., Shrestha, N., & Suwal, S. K. (1970). Nutrient Analysis of *Nephrolepis cordifolia* (L.) C. Presl. *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*, 4(1), 68-72. <https://doi.org/10.3126/kuset.v4i1.2885>
GeologiaWeb. *Andesita*. <https://geologiaweb.com/rocas-igneas/andesita/>
- Gu, D., Guenther, A. B., Shilling, J. E., Yu, H., Huang, M., Zhao, C., ... Hu, Z. (2017). Airborne observations reveal elevational gradient in tropical forest isoprene emissions. *Nat Commun*, 8, 15541. <https://doi.org/10.1038/ncomms15541>
- Hajjari, M., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., & Ghanavati, H. (2017). A review on the prospects of sustainable biodiesel production: A global scenario with an emphasis on waste-oil biodiesel utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 445-464. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.034>
- Homer, I., Ruiz, F. J., Sánchez, M., & Calandra, P. (2014). Desarrollo de un sistema de electrificación rural a partir de Biodiesel proveniente de recolección de aceites usados.
- Jain, S. (2020). *Strategy for repurposing of disposed PPE kits by production of biofuel : Pressing priority amidst COVID-19 pandemic*. *Strategy for repurposing of disposed PPE kits by production of biofuel : Pressing priority amidst COVID-19 pandemic. Biofuels*. In B. Y. Lamba (Ed.), (pp. <https://doi.org/10.1080/17597269.17592020.11797350>).
- Jefferson, M. (2020). A crude future? COVID-19s challenges for oil demand, supply and prices. *Energy Research & Social Science*, 68, 101669.
- Lee, B. H., Lopez-Hilfiker, F. D., Schroder, J. C., Campuzano-Jost, P., Jimenez, J. L., McDuffie, E. E., ... Thornton, J. A. (2018). Airborne Observations of Reactive Inorganic Chlorine and Bromine Species in the Exhaust of Coal-Fired Power Plants. *J Geophys Res Atmos*, 123(19), 11225-11237. <https://doi.org/10.1029/2018JD029284>
- Meng, L., Jin, K., Yi, R., Chen, M., Peng, J., & Pan, Y. (2020). Enhancement of bioenergy recovery from agricultural wastes through recycling of cellulosic alcoholic fermentation vinasse for anaerobic co-digestion. *Bioresour Technol*, 311, 123511. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123511>
- Meshram, A., Bhagyawant, S. S., & Srivastava, N. *International Journal of Bioscience and Biochemistry*.
- Miranda-Avilés, R. a. A. P. a. O. L. a. L.-A. I. (2016). The post-laramide clastic deposits of the sierra de Guanajuato: Compositional implications on the tectono-sedimentary and paleographic evolution. *Estudios Geológicos*, 72. <https://doi.org/10.3989/egeol.42480.417>
- Muñoz, A. H. S. (2021). Axes of a multidisciplinary model for sustainable innovation: Life transition after COVID-19.
- Méndez, F. (2020). *Túneles de Guanajuato: laberintos coloniales y calles subterráneas*. Travesías. <https://travesiasdigital.com/mexico/jardin-borda-en-cuernavaca>

- Nadgórska-Socha, A., Kandziora-Ciupa, M., Trzęsicki, M., & Barczyk, G. (2017). Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes. *Chemosphere*, *183*, 471-482. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.128>
- Nozari, B., Mirmohamadsadeghi, S., & Karimi, K. (2018). Bioenergy production from sweet sorghum stalks via a biorefinery perspective. *Appl Microbiol Biotechnol*, *102*(7), 3425-3438. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-8833-8>
- Perez-Pimienta, J. A., Icaza-Herrera, J. P. A., Mendez-Acosta, H. O., Gonzalez-Alvarez, V., Mendoza-Perez, J. A., & Arreola-Vargas, J. (2020). Bioderived ionic liquid-based pretreatment enhances methane production from Agave tequilana bagasse. *Rsc Advances*, *10*(24), 14025-14032. <https://doi.org/10.1039/d0ra01849j>
- Pettit, T., Irga, P. J., Abdo, P., & Torpy, F. R. (2017). Do the plants in functional green walls contribute to their ability to filter particulate matter? *Building and Environment*, *125*, 299-307. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.004>
- Puy-Alquiza, M. J., Gómez-Peralta, M., Reyes-Zamudio, V., Gregorio-Cipriano, M. D. R., Miranda-Avilés, R., Rios-Ureña, D. N., & Cortés-Hernández, V. (2018). Diversidad de macrolíquenes saxícolas en México: caso de estudio del distrito minero de Guanajuato. *Acta botánica mexicana*(123), 37-50.
- Quimis Indacochea, A. F. (2020). "ESTUDIO DEL ACEITE UTILIZADO EN LOCALES DE COMIDA RAPIDA, PARA SU APROVECHAMIENTO EN BIODIESEL EN EL CASCO URBANO DEL CANTON JIPIJAPA.
- Richardson, J. G., & Erdelen, W. R. (2020). 2030 is tomorrow: transformative change for a mistreated mother Earth. *foresight*.
- Rolewicz-Kalinska, A., Lelicinska-Serafin, K., & Manczarski, P. (2020). The Circular Economy and Organic Fraction of Municipal Solid Waste Recycling Strategies [Article]. *Energies*, *13*(17), 19, Article 4366. <https://doi.org/10.3390/en13174366>
- Romanelli, M. (2020). Analysing the role of information technology towards sustainable cities living. *Kybernetes*.
- Shurson, G. C. (2020). "What a Waste"-Can We Improve Sustainability of Food Animal Production Systems by Recycling Food Waste Streams into Animal Feed in an Era of Health, Climate, and Economic Crises? *Sustainability*, *12*(17), Article 7071. <https://doi.org/10.3390/su12177071>
- Taemthong, W. (2021). AIR QUALITY IMPROVEMENT USING ORNAMENTAL PLANTS IN CLASSROOMS. *Journal of Green Building*, *16*(2), 201-216.
- Tira, M. (2020). About the Sustainability of Urban Settlements. A first reflection on the correlation between the spread of Covid-19 and the regional average population density in Italy. *Tema-Journal of Land Use Mobility and Environment*, 361-371. <https://doi.org/10.6092/1970-9870/6984>
- Toussaint, E. (2021). El liderazgo de Estados Unidos en el Banco Mundial-CADTM.
- Valdés, A., Bruno, D., Mota, A. M., Cristóbal, N., Aguilar, C. N., Iliana, A., . . . H.A. (2015). Cinética para la producción de bioetanol usando la levadura *Saccharomyces cerevisiae* pe-2 para su escalamiento en reactores en Columna y gas-lift. In. XVI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería. Guadalajara. México.
- Vidal, L. (2017). *Ciudad de Guanajuato Patrimonio de la Humanidad*. BestMex.com. <https://www.bestmex.com/es/mexico-seguros-blog/ciudad-de-guanajuato-patrimonio-de-la-humanidad/>
- von Bobrutzki, K., Ammon, C., Berg, W., Einert, P., Fiedler, M., Müller, H. J., . . . Strohbach, B. (2012). Ammonia emissions from a broiler farm: spatial variability of airborne concentrations in the vicinity and impact on adjacent woodland. *Environ Monit Assess*, *184*(6), 3775-3787. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2223-3>
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Saravanan, A., Varjani, S., & Ramamurthy, R. (2020). Bioconversion of municipal solid waste into bio-based products: A review on valorisation and sustainable approach for circular bioeconomy [Review]. *Science of the Total Environment*, *748*, 12, Article 141312. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141312>
- Yong, Z. J., Bashir, M. J. K., & Hassan, M. S. (2021). Biogas and biofertilizer production from organic fraction municipal solid waste for sustainable circular economy and environmental protection in Malaysia [Article]. *Science of the Total Environment*, *776*, 11, Article 145961. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145961>
- Zamorategui-Molina, A., Gutiérrez-Ortega, N., Baltazar-Vera, J. C., Del Angel, J., & Tirado-Torres, D. Carbon Monoxide and Particulate Matter Concentration inside the Road Tunnels of Guanajuato City, Mexico. *Aerosol and Air Quality Research*, *21*, 210039.