

## ***Green Tunnels Design Proposal by plant species, for Sustainable Cities: A Case Study in Guanajuato Mexico***

### **Propuesta de Diseño de túneles verdes por especies de plantas, para Ciudades Sustentables: Un caso de Estudio en Guanajuato México**

#### **Introducción**

Un tema poco hablado y estudiado trata sobre el uso de túneles/aperturas subterráneas como herramientas para la filtración del aire contaminado. Esta iniciativa presenta todo 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 [1]. 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, [2].

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, [3] . **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.

#### **Metodología**

##### **Etapas 1: Búsqueda de información.**

Para efecto de este proyecto, se propuso dar paso con una investigación de material que abordase el tema de filtración por túneles, al encontrar escasa información, se decidió tomar información relacionada al tema con la intención de tener un panorama amplio de los aspectos más importantes como: especie de plantas a utilizar y su uso en la purificación. La búsqueda de trabajos con el uso de plantas para la remediación del aire, en primer lugar, agua como segundo, se realizó 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: Selección** de especies vegetales para el diseño de túneles verdes (características nutricionales y sinergia entre ellas, condiciones)

- ◆ Helecho Serrucho (*Nephrolepis cordifolia*)

**Tabla 1** Clasificación de *Nephrolepis cordifolia*.

Clasificación	
Reino	Plantae
Clase	Equisetopsida
Subclase	Polypodiidae
Orden	Polypodiales
Familia	Davalliaceae
Genero	<i>Nephrolepis</i>
Especie	<i>N. cordifolia</i> (L.) C. Presl.
Nombre binomial	<i>Aspidium cordifolium</i> (L.) Sw.

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. Introducida a México, se considera en peligro de extinción en el país. [4]

Es un reproductor vigoroso y formador de colonias, produciendo tubérculos pequeños escamosos en sus raíces. En la naturaleza, crecerán en una amplia variedad de situaciones, creciendo en el suelo o entre rocas, así como creciendo como una epífita. Aunque, se encuentra creciendo en muchos climas, disfruta principalmente de regiones subtropicales y tropicales con mezcla de suelo bien drenado y propagarse agresivamente por todas partes por esporas arrastradas por el viento y por el movimiento accidental de estolones, tubérculos y rizomas.[4]



Figura 1 Helecho serrucho. Obtenido de PNGHUT

El helecho serrucho ha sido ampliamente utilizado para la fabricación de filtros con el objetivo de substraer 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. [5]

◆ Poto Asiático (*Epipremnum aureum*) (L.) Engl

**Tabla 2** Clasificación de *Epipremnum aureum*

<b>Clasificación</b>	
Reino	Plantae
Clase	Monocotyledonous
Orden	Alismatales
Familia	Araneae
Subfamilia	Monsteroideae
Tribu	Monstereae
Genero	<i>Epipremnum</i>
Especie	<i>Epipremnum aureum</i>
Nombre binomial	<i>Epipremnum aureum</i> (L.) Engl.

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 diámetro de hasta 4cm y una altura de hasta 20 metro [6].

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, fosforo y potasio. El pH adecuado es aproximadamente 7. Es sensible a sustratos salinos.

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.

Es recomendable realizar podas de mantenimiento para controlar su crecimiento, puede llegar a ser invasiva. Cuando hay humedad excesiva puede ser atacada por hongos y cuando hay una disminución de húmedas, por arañas o pulgones [7].

Se ha estudiado su capacidad para limpiar el aire contaminado, puede remover benceno, formaldehído y tricloroetileno, este penúltimo puede ser absorbido y

metabolizado. En un estudio, se sometió esta planta a una concentración de 25 ppm de benceno y se logró una remoción del 10% [6].



Figura X. *Epipremnum aureum*, obtenido de Hortology Co.

### **Proceso de biorremediación**

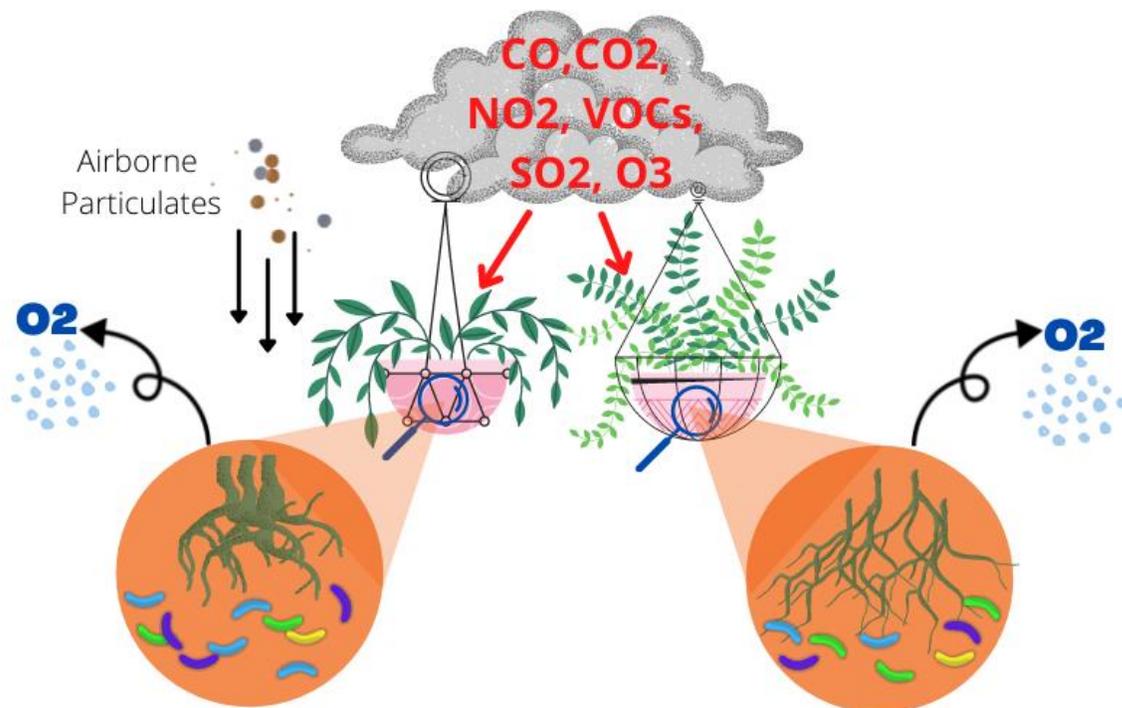
De acuerdo con estudios realizados a diversos grupos de plantas, estas tienen la capacidad de absorber del ambiente compuestos que pueden ser considerados como dañinos y perjudiciales a la salud humana, vida animal y calidad de los recursos. Estos contaminantes son transformados en compuestos inofensivos [8].

Las raíces de las plantas son las encargadas de absorber los contaminantes, lo almacenan y a veces lo transportan hacia tallos y hojas [9].

En algunos estudios realizados por Wolverton, se descubrió que la remoción del formaldehído estaba relacionada con la actividad deshidrogenasa llevada a cabo en las hojas y raíces de las plantas. Dicha remoción sucede por difusión limitada, de modo que al circular más aire a través de las hojas y el sistema reticular, el proceso de remoción mejora [10].

El proceso de biorremediación del aire consta del ciclo parecido al del nitrógeno o al del fósforo. El cual describe, que dichos compuestos al viajar en la atmósfera son atrapados por las partículas aerotransportadoras las cuales ayudan a los gases a viajar y depositarse sobre la superficie externa de las hojas en las plantas, las cuales las absorberán como parte de su proceso de absorción de agua en el ambiente. Dichos compuestos viajarán por la planta hasta llegar a las raíces donde diversos

grupos de bacterias descompondrán los compuestos en compuestos elementales que sirven como nutrientes para a tierra, o como oxígeno [11]. De esta manera los gases que eran contaminantes para el entorno se transforman en sustancias benignas. **Figura X.**



**Figura 2.** Ciclo de biorremediación. Imagen propia del autor. (Hecho en Canva Online).

### Etapa 3: Estudio del sitio de aplicación

#### 3.1. Análisis de las GEI promedio emitidas en los túneles.

En la siguiente tabla 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.

**Tabla 3** Relación de trabajos sobre los contaminantes en túneles de Guanajuato.

Ref	Contaminante	Túneles
[12]	Hidrocarburos policíclicos: fluoranteno, fenantreno, acenafteno, entre otros.	aromáticos: naftaleno, acenaftileno, antraceno, fluoreno, pireno,
[13]	CO y PM	Santa Fe, Galereña, Minero, Ponciano Aguilar, Tamazuca Galereña, Barretero, Los Angeles, Ponciano Aguilar, Santa Fe, Tiburcio

[14]	Pb, Cu, Cr, Ni, V, Co, Zn, Sb	Álvarez, Calle Miguel Hidalgo y Tamazuca Galereña, Ponciano Aguilar, Minero, Santa Fe y Tamazuca
------	-------------------------------	---

**Tabla 4** Emisiones de CO y PM en túneles de Guanajuato.

Ref	Contaminante(s)	Concentración promedio (ppm, µg/m <sup>3</sup> )	Túneles
[13]	CO	18	Barretero
		3	Ponciano Aguilar
		16	Santa Fe
		0	Calle Hidalgo
		8	Tamazuca
		14	Tiburcio A.
		21	Galereña
		17	Los Ángeles
		PM2.5	53
	14		Ponciano Aguilar
	49		Santa Fe
	36		Calle Hidalgo
	38		Tamazuca
	21		Tiburcio A.
	37		Galereña
	68		Los Ángeles
	PM10		68
		17	Ponciano Aguilar
		53	Santa Fe
		39	Calle Hidalgo
		41	Tamazuca
		21	Tiburcio A.
		41	Galereña
		75	Los Ángeles

**Tabla 5** Emisiones de hidrocarburos aromáticos policíclicos en túneles de Guanajuato.

Ref	Contaminante(s)	Concentración (ng/g)	Túneles
[12]	PAHs en aire	3 920	Santa Fe
		6 153	Galereña
		3 758	Minero
		7 961	Ponciano Aguilar
		1 392	Tamazuca

**Tabla 6** Fracción porcentual de composición de COV's.

Ref	Contaminante(s)	Concentración promedio COV's (ppbV)	Túnel
[15]	Benceno	13.06	Barretero
	Ciclohexano	1.89	
	Tolueno	32.09	

**Tabla 7** Longitudes de túneles estudiados.

Túnel	Características
Tamazuca	110 m longitud
Santa Fe	500 m longitud
Minero	500 m longitud
Barretero	800 m longitud
Galereña	700 m longitud
Los Ángeles	600 m longitud
Ponciano Aguilar	1100 m longitud

### 3.2 Análisis de las características rocosas de los túneles.

La zona urbana de Guanajuato esta dentro de la clasificación del Conglomerado Guanajuato (Eoceno) en el Miembro superior. La composición de los clastos de este miembro esta constituida en mayor parte por granito, después por andesita, diorita, riolita y cuarzo lechoso [16].

La andesita está compuesta por sílice, contiene entre 52 a 63% de sílice (SiO<sub>2</sub>), también puede contener cristales de feldespato plagioclasas y algunos minerales piroxenos como clinopiroxeno y ortopiroxeno, así como pequeñas cantidades de hornblenda [17]. La riolita es félsica o ácida, por lo tanto, el porcentaje de sílice (SiO<sub>2</sub>) supera el 63%, siendo en promedio alrededor del 70%. Además, se destaca el óxido de potasio (K<sub>2</sub>O) que llega alrededor del 4.2%. Mientras el óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), alcanza un 13%.

### 3.3 Impacto en la salud humana

Los túneles de la ciudad no solamente son transitados por vehículos sino, en varios de ellos, por una cantidad considerable de peatones. La mayoría de los túneles cuentan con banquetas que permiten que los peatones caminen a través de estos, la cantidad de personas que los usan puede variar de un túnel a otro debido a la conexión de este en la ciudad y a su ubicación.

Por ejemplo, en túnel con más afluencia de personas es el Calle Hidalgo. Otros túneles comúnmente transitados son El Barretero, Santa Fe y los Angeles. El rango de peatones para los túneles Galería, Ponciano Aguilar, Tiburcio y Tamazuca era de 35-160 personas por hora [13]; en otro estudio el rango fue de 24 a 288 personas por hora, siendo el túnel Santa Fe el más transitado [12].

Cerca del 4% de la población total de la ciudad en, que es un aproximado de siete mil personas utilizaban los túneles [18].

Por lo que, los contaminantes encontrados en estos pueden reflejar un riesgo para la población.

#### **Etapas 4: Desarrollo del Diseño**

##### **Propuesta de solución**

De acuerdo con los datos anteriormente presentados, surge la necesidad de implementar estrategias que ayuden a solucionar o reducir los impactos a la salud humana y al ambiente. Con ello la propuesta descrita para este proyecto se basa en los siguientes criterios:

1. Utilizar estructuras resistentes que soporten condiciones de humedad en periodos constantes.
2. Colocar un mallado recubierto con las especies selectas sin entorpecer el tránsito vehicular y peatonal.
3. Monitoreo periódico de la mejora de la calidad del aire, y las condiciones del mallado instalado.

Siguiendo los criterios anteriores se puede partir a diseñar el prototipo del mallado.

##### **Desarrollo del prototipo**

Las estructuras elegidas fueron los túneles de Guanajuato capital, los cuales como se explicó anteriormente mantienen condiciones adecuadas para el desarrollo de las especies selectas.

Para el desarrollo del prototipo fue necesario considerar las medidas de los túneles de 6mx5mx20m. Y haciendo uso 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 las figuras X, a y b se colocó 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.

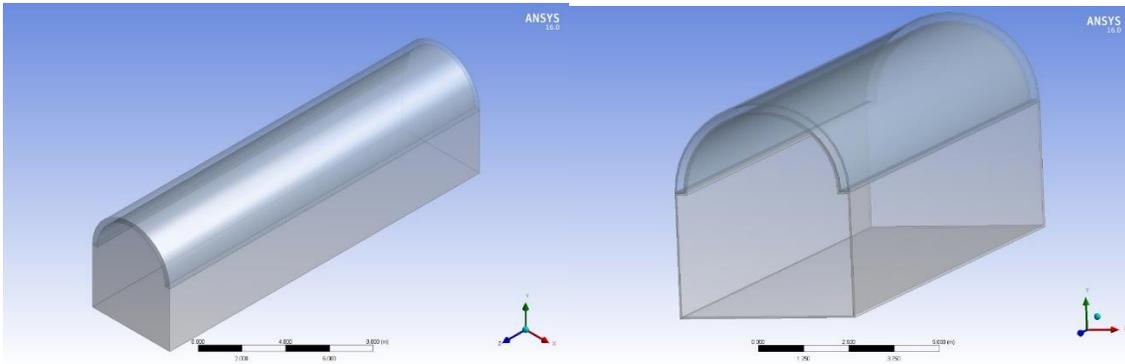


Figura 3. Túnel con perspectiva superior y b. túnel con perspectiva  $\frac{3}{4}$ . Imagen: Propia del autor elaborada en ANSYS Workbench v2016.

Seguido de la estructura construida, se indicaron los materiales de las dos secciones, el contorno del túnel (sección verde) y el mallado de plantas (sección naranja).

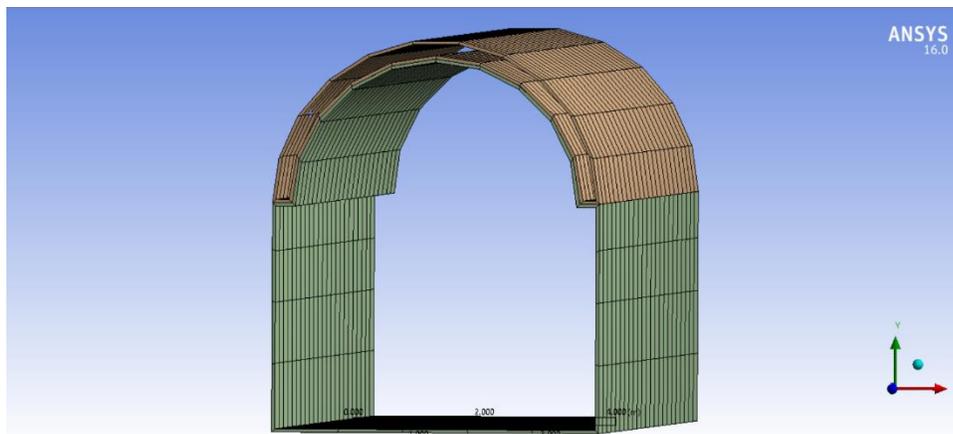


Figura 4. Mallado del túnel. Imagen: Propia del autor elaborada en ANSYS Workbench v2016.

Se indica la sección recubierta de materia orgánica, la cual funcionará como biofiltro para la purificación del aire.

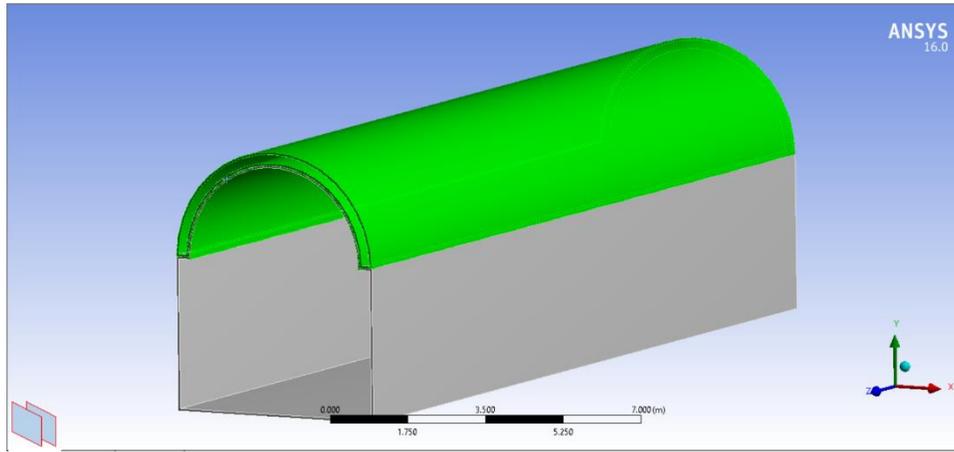


Figura 5. Especificaciones de la sección de mallado. Imagen: Propia del autor elaborada en ANSYS Workbench v2016.

Se hizo la recubierta del material orgánico en la malla.

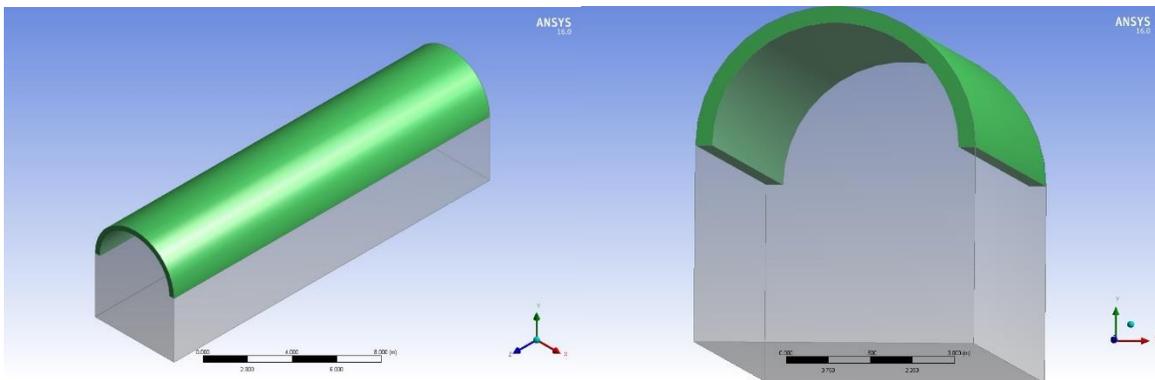


Figura 6. Imagen: Propia del autor elaborada en ANSYS Workbench v2016.

Para la confirmación de que en la recubierta está ocurriendo el proceso de purificación se hizo un análisis de temperatura en la superficie exterior del mallado en comparación de la superficie que no fue recubierta.

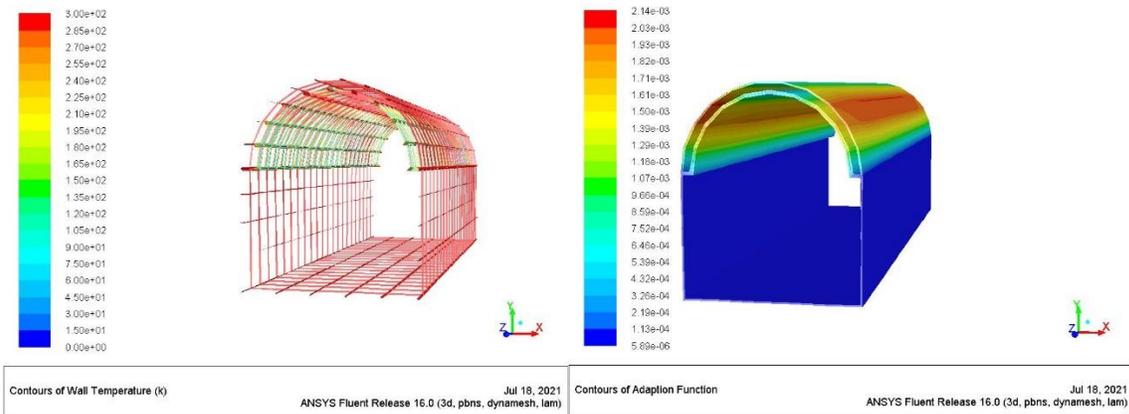


Figura 7. Análisis de temperatura en las paredes y mallas del túnel, a. Temperaturas por el aire situado dentro del túnel. b. Temperaturas de las superficies sólidas de la estructura.

## RESULTADOS

Finalmente, para fines visuales se insertó sobre la malla el acomodo de las plantas con tres posibles opciones:

1. Considerando que ambas especies (poto asiático y helecho) son especies altamente invasivas [7]. Se propuso colocarlas por secciones, completamente independientes.

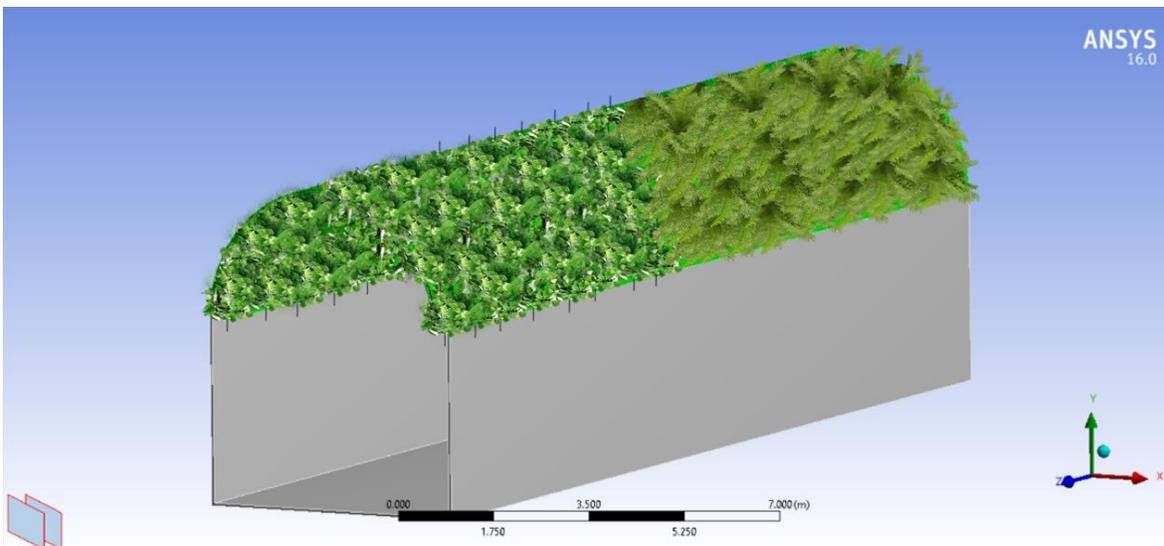


Figura 8. Distribución de las plantas por bloques en el túnel.

2. Logrando adaptar a ambas especies en el mismo espacio, se colocaría una sobre la otra, teniendo al poto arriba y el helecho abajo.

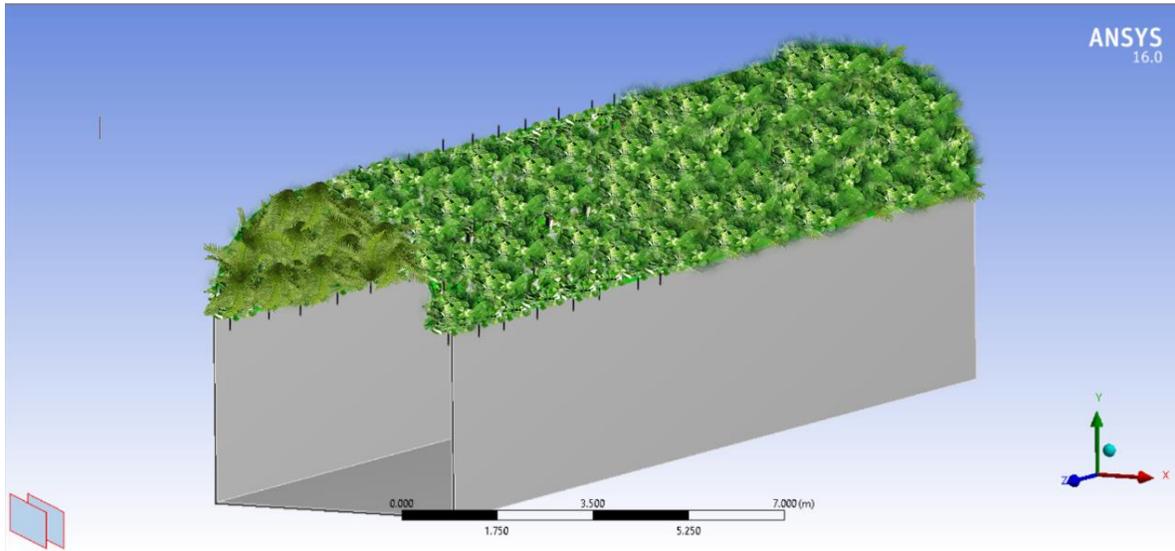


Figura 9. Distribución de las plantas a mitades del túnel

Y finalmente la tercera propuesta que en la cual no basamos en la distribución de los gases, los gases más pesados y contaminantes se acumulan en la cúpula, dándole prioridad al poto asiático en esta zona, mientras que en los lados laterales de la cúpula se insertará el helecho.

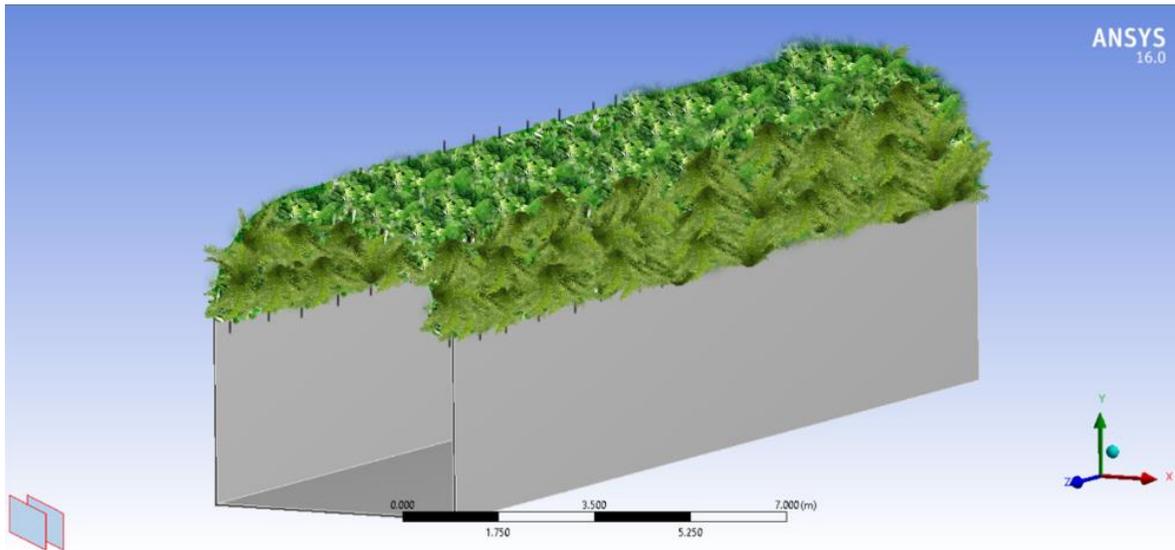


Figura 10. Distribución central y lateral de las especies.

## REFERENCIAS

1. Vidal, L. *Ciudad de Guanajuato Patrimonio de la Humanidad*. 2017; Available from: <https://www.bestmex.com/es/mexico-seguros-blog/ciudad-de-guanajuato-patrimonio-de-la-humanidad/>.
2. Méndez, F. *Túneles de Guanajuato: laberintos coloniales y calles subterráneas*. 2020; Available from: <https://travesiasdigital.com/mexico/jardin-borda-en-cuernavaca>.
3. Abdo, P. and B.P. Huynh, *An experimental investigation of green wall bio-filter towards air temperature and humidity variation*. Journal of Building Engineering, 2021. **39**.
4. Gauchan, D., et al., *Nutrient Analysis of <i>Nephrolepis cordifolia</i> (L.) C. Presl*. Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology, 1970. **4**(1): p. 68-72.
5. Pettit, T., et al., *Do the plants in functional green walls contribute to their ability to filter particulate matter?* Building and Environment, 2017. **125**: p. 299-307.
6. Meshram, A. and N. Srivastava, *Molecular and physiological role of Epipremnum aureum*. International Journal of Green Pharmacy (IJGP), 2014. **8**(2).
7. Vázquez Chacón, J.Y. *Epipremnum aureum. Características, hábitat, cultivo, cuidados*. Available from: <https://www.lifeder.com/epipremnum-aureum/>.
8. Ndzomo, G.T., D.O. Ndoumou, and M.T. Awah, *EFFECT OF FE<sup>2+</sup>, MN<sup>2+</sup>, ZN<sup>2+</sup> AND PB<sup>2+</sup> ON H<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> FLUXES IN EXCISED PISTIA-STRATIOTES ROOTS*. Biologia Plantarum, 1994. **36**(4): p. 591-597.
9. Eskander, S. and H. Saleh, *Phytoremediation: an overview*. Environmental science and engineering, Soil pollution and phytoremediation, 2017. **11**: p. 124-161.
10. Douglass, F., *Indoor air quality planting healthier indoor air*. 2011.
11. Pérez-Peláez, N., M. Peña-Varón, and J.S. Janeth Sanabria, *Comunidades bacterianas involucradas en el ciclo del nitrógeno en humedales construidos*. INGENIERÍA Y COMPETITIVIDAD, 1969. **13**(2).
12. Puy-Alquiza, M.J., et al., *Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban tunnels of Guanajuato city (Mexico) measured in deposited dust particles and in transplanted lichen Xanthoparmelia mexicana (Gyeln.) Hale*. Environmental Science and Pollution Research, 2016. **23**(12): p. 11947-11956.
13. Zamorategui-Molina, A., et al., *Carbon Monoxide and Particulate Matter Concentration inside the Road Tunnels of Guanajuato City, Mexico*. Aerosol and Air Quality Research. **21**: p. 210039.
14. Torres, D.C.L., M.J. Puy, and C.R. Robelo, *REMEDIACIÓN ELECTROKÍNÉTICA DEL AIRE DE LOS TÚNELES DE LA CIUDAD DE GUANAJUATO*. Jóvenes en la ciencia, 2016. **2**(1): p. 284-288.
15. Blanco Jiménez, S.M.R., M. *Perfil de Composición de los Compuestos Orgánicos Volátiles en Túneles Vehiculares del País*. 2018.
16. Miranda-Avilés, R.a.A.P.a.O.L.a.L.-A.I., *The post-laramide clastic deposits of the sierra de Guanajuato: Compositional implications on the tectono-sedimentary and paleographic evolution*. Estudios Geológicos, 2016. **72**.
17. GeologiaWeb. *Andesita*. Available from: <https://geologiaweb.com/rocas-igneas/andesita/>.
18. Puy-Alquiza, M.J., et al., *Study of the Distribution of Heavy Metals in the Atmosphere of the Guanajuato City: Use of Saxicolous Lichen Species as Bioindicators*. Ingeniería, investigación y tecnología, 2017. **18**(1): p. 111-126.