

Fecha de recepción: abril 2022
Fecha de aceptación: mayo 2022
Versión final: junio 2022

Colaboración Humano-Briófitas (CHB): Diseño Open-source de Artefacto Biológicamente Inspirado para la Restauración Ambiental Asistida por Briófitas.

Antonino Reinoso Bonnefoy^(*) y Alejandro Durán-Vargas^(**)

Resumen: Habitar ecosistemas urbanos genera cambios en las rutinas de movilidad que nos lleva a vivir más del 80% de nuestro tiempo en espacios cerrados. Esta forma de habitar presenta externalidades negativas asociadas a la contaminación ambiental producida por la reducción de intercambio interior-externo de aire, aumentando la concentración de CO² y otros compuestos volátiles orgánicos. La biorremediación producida por briófitas ha demostrado un alto rendimiento en la fijación y degradación de estos contaminantes, además de los efectos bio restauradores de organismos vegetales en el estado emocional de las personas. La presente investigación presenta el diseño de un artefacto remediador briofitario (ARB) de código abierto que mejora las condiciones ambientales de espacios cerrados.

Palabras clave: Bioremediación - Briófitas - Síndrome del Edificio Enfermo - Open Source - Biologically Inspired Design

[Resúmenes en inglés y portugués en la página 171]

^(*) Licenciado en Diseño, Escuela de Diseño, Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos, Pontificia Universidad Católica de Chile. areinoso1@uc.cl

^(**) Doctorando, Facultad de Ciencias Biológicas, Programa Ecología, Pontificia Universidad Católica de Chile. aaduran@uc.cl

1. *Homo Sapiens*, una especie formadora de hábitat obsesionada con el aislamiento e inconsciente de la importancia de la biodiversidad.

“(...) desde el 2008, y por primera vez en la historia del mundo, más de la mitad de la población mundial vive en áreas urbanas” (UNFPA, 2007).

El vivir en un ecosistema urbano genera cambios en los hábitos de vida de una sociedad moderna, hábitos que se ven reflejados en cómo nos vemos enfrentados a una rutina de movi­lidades reducidas durante el día y estancias largas en los lugares que visitamos. Los días se pasan en hogares, oficinas, colegios, transporte público y espacios públicos o privados en donde realizamos trámites y otras actividades. La mayoría de estas acciones se producen en espacios confinados, lo que genera que la vida urbana nos lleve a vivir más del 80% de nuestro tiempo en espacios cerrados (Vargas & Gallego, 2005). Esta dinámica social nos permite estar resguardados del exterior y las condiciones ambientales desfavorables, pero a la vez, estar aislados del entorno y el resto de los organismos que conforman nuestros ecosistemas puede generar externalidades negativas que afecten el estado de salud de las personas. Al cambiar el hábitat natural por uno artificial, es necesario suplir todas las necesidades biológicas que tienen los seres humanos, resguardando que estas condiciones sean las adecuadas y libres de contaminantes.

Los espacios cerrados han ido cambiando debido a la tendencia a reducir el consumo de energía, lo que produce bajas tasas de ventilación y conlleva un mayor nivel de concentración de dióxido de carbono [CO²] (Satish, et al., 2012). Esto se debe a que los edificios antiguos presentan malas calidades de ventilación, o que en las nuevas construcciones, los sistemas de ventilación funcionan en conjunción con el aire acondicionado, por lo que, a menos que existan muy bajas o muy altas temperaturas, estos se suelen mantener apagados (Li, Taguchi & Yamashita, 2016). Al haber una reducción de intercambio interior-exterior, se genera que el aire interior tenga una baja calidad del aire o IAQ, por su sigla en inglés Index for Air Quality, debido a la presencia de partículas de dióxido de carbono producida por los ocupantes del espacio, además de la presencia de compuestos volátiles orgánicos (VOC) que incluyen una amplia gama de compuestos gaseosos que pueden emanar de pinturas, materiales de construcción y actividad humana. La suma de estos, potencialmente se acumulan en espacios interiores como contaminantes (Llewellyn & Dixon, 2011).

La presencia de compuestos volátiles orgánicos y de altas concentraciones de CO² producen el llamado Síndrome del Edificio Enfermo (SEE) o SBS por su sigla en inglés Sick Building Syndrome (Brasche et al., 1999), afectando a las personas presentes en los espacios interiores. Ésta, es una afección médica que provoca que las personas en un edificio sufran de síntomas de enfermedad o malestar sin razones aparentes (World Health Organization, Regional Office for Europe, 2008), debido a que el aire interior a menudo contiene de 5 a 7 veces las concentraciones de contaminantes del aire exterior de la ciudad (Brown et al., 1994). Entre los factores que originan los síntomas de este síndrome, está la exposición a la humedad, la mala ventilación, descompensación de temperaturas, los contaminantes de ambientes, los compuestos volátiles, las reacciones químicas, la construcción del edificio, los materiales que lo integran, así como también el uso y el mantenimiento de éste (Cam-

pusano, 2012; Narváez, Villa & Martín, 2015). Los efectos nocivos de estas mezclas han sido reconocidos como componentes del SEE, con síntomas de dolor de cabeza, mareos, náuseas, dolor de ojos y garganta, pérdida de concentración entre otros (Brasche et al., 1999). Según la Organización Mundial de la Salud, el Síndrome del Edificio Enfermo afecta al 70% de las construcciones chilenas (Campusano, 2012). El profesor Juan Luis Ramírez, PhD, presidente del Comité Tecnológico en 2012, menciona que los inversionistas “no están dispuestos a invertir en edificaciones inteligentes y sólo costean la cáscara y espacios amplios para rentabilizar mejor los recintos” (Campusano, 2012). Añade que los edificios “no están concebidos con las ventilaciones adecuadas, asoleamientos, iluminación, acústica, conservación térmica, ni materialidad correcta ante la humedad”. Una de las grandes problemáticas de este síndrome, es que los humanos no estamos capacitados para poder identificar malas calidades de aire, a pesar de lo imprescindible que es poder respirar aire de calidad. Megan Schires plantea que “los seres humanos pueden sobrevivir hasta 30 días sin comer y 3 días sin beber pero sólo 3 minutos sin respirar. Nuestra necesidad de aire también es constante, confiamos en él en todo momento en interiores y exteriores, aunque a menudo puede ser menos limpio de lo que esperamos.” (Schires, 2019). No obstante es difícil para las personas percibir una mala calidad del aire de manera que pueda reconocer que un espacio está contaminado. Si bien la sensación de pesadez puede referirse a la falta de ventilación, la autora explica que “los olores desagradables nos hacen conscientes de la mala calidad del aire, pero muchos agentes irritantes y gases no saludables no son detectables por el olfato y, al mismo tiempo, afectan nuestra salud” (Schires, 2019). Debido a que los humanos producen y exhalan dióxido de carbono, las concentraciones de CO² en los espacios interiores ocupados son más altas que las concentraciones en el exterior (Satish, et al., 2012). De modo que, entre más personas haya en un lugar con escasa ventilación, habrá un aumento en la saturación de CO² en el espacio, y por ende, el aire inhalado por las personas tendrá una concentración de dióxido de carbono mayor.

Los niveles atmosféricos de CO² en 2020 fueron de aproximadamente 417 partículas por millón (ppm) (Global Monitoring Laboratory, 2020), mientras que las concentraciones de CO² dentro de los edificios varían desde niveles encontrados en el exterior para construcciones abiertas hasta varios miles de partes por millón en espacios cerrados y sobre ocupados (Persily y Gorfain, 2008). Dado que el aire exhalado por una persona es de 40.000 ppm de dióxido de carbono aproximadamente; es difícil no ver por qué los niveles de CO² pueden aumentar rápidamente dentro de entornos de alta ocupación y cerrados (Llewellyn & Dixon, 2011).

1.1. Efectos contaminantes en espacios cerrados para personas

Estudios del Lawrence Berkeley National Laboratory demuestran una significativa reducción en el desempeño de toma de decisiones en los sujetos de estudio al exponerlos a distintos niveles de CO², disminuyendo sus funciones cognitivas a medida que la concentración del dióxido de carbono aumenta (Satish et al., 2012). En el estudio se analizaron las respuestas de personas al estar enfrentadas a tres condiciones diferentes en una cámara

ambiental controlada equipada. Las concentraciones de CO² al que fueron expuestos fueron de aproximadamente 600, 1.000, y 2.500 ppm. Durante cada condición de exposición, los participantes realizaron una prueba que medía el rendimiento en la toma de decisiones en nueve diferentes tipos de tareas. Los resultados arrojaron que en seis de las nueve categorías de toma de decisiones disminuyó moderada pero significativamente a los 1.000 ppm en relación la línea de base de los 600 ppm, y siete disminuyeron sustancialmente a los 2.500 ppm (Satish et al., 2012).

Un estudio realizado por Ii, Taguchi & Yamashita (2016) en cual se hacía una medición de ppm de CO² en una habitación de 23,5 m³ con ventanas y puertas cerradas. Los datos arrojaron que luego de 1 hora y 40 minutos, hubo un aumento de concentración de CO² desde los 300 a los 1300 ppm. Produciendo entre 0,02±0,01 m³/hora de CO². Este número depende del tipo de actividad que la persona esté realizando, si la actividad realizada es más intensa, habrán más exhalaciones por minuto, por lo tanto más producción de CO² por hora. En el mismo artículo, se exponen resultados de un similar experimento en la Universidad de Wakayama, Japón, en el cual en una sala de clases de 416 m³ con 80 estudiantes realizando ejercicios de lectura, en 90 minutos el aumento en las concentraciones de dióxido de carbono subieron desde 1.200 a 4.400 ppm aproximadamente.

Los resultados de estos diversos estudios demuestran que en general los espacios interiores suelen estar con condiciones atmosféricas que son adversas para los ocupantes y perjudiciales para su salud. Además, al ser la calidad del aire una condición poco medible, los espacios suelen regular poco estas condiciones y es muy difícil para las personas percibir si estos están contaminados.

1.2. Plantas y soporte vital para los humanos

“Desde la existencia de los seres humanos en la tierra, estos dependen de un sistema de soporte vital que involucra una intrincada relación con plantas y sus microorganismos del suelo asociados; y que por lo tanto debería ser obvio que cuando se les intenta aislar en edificios herméticamente cerrados lejos de este sistema ecológico, surgirían problemas.” (Wolverton et al., 1989).

La idea de que el exterior proporciona un sistema de soporte vital para los animales comienza en el siglo XVIII, cuando Joseph Priestley, mientras estudiaba las propiedades del aire, descubre la particular influencia de diferentes seres vivos en la calidad del aire. Al científico y teólogo británico, se le atribuye el descubrimiento del oxígeno, quien por primera vez demostró la necesidad del intercambio de gases entre los organismos vivos y la atmósfera que lo rodea. Esto fue evidenciado debido a su experimentación con roedores que sobrevivían mucho más tiempo al interior de un recipiente sellado, cuando este, también contenía una planta iluminada. Gracias a este resultado, en 1771 escribió que “la lesión que se hace continuamente a la atmósfera por la respiración de animales es, en parte, reparada por la creación vegetal”.

Más de 200 años después, la NASA, frente a la posibilidad de que el humano se mude a ambientes cerrados, en la Tierra o el espacio, plantea que es obvio que tendrían que llevar consigo la naturaleza como sistema de soporte vital (Wolverton et al., 1989). Es por esto que, desde 1974 intentaron encontrar formas de reducir los contaminantes de futuros hábitats espaciales (NASA, 1974). Wolverton y Cols (1989) colocaron plantas en maceteros dentro de cámaras selladas, inyectando sustancias comúnmente encontradas en el aire interior. Los resultados mostraron que las hojas, el suelo y las plantas están asociadas a los microorganismos que cumplen una función importante en la reducción de contaminantes del aire interior.

“la biorremediación es el proceso que utiliza las habilidades catalíticas de los organismos vivos para degradar y transformar contaminantes tanto en ecosistemas terrestres como acuáticos, presentando un enorme potencial en la mitigación de la contaminación ambiental” (Garbisu et al., 2002).

Llewellyn y Dixon, en su texto “Can plants really improve indoor air quality” (2011), realizan una revisión bibliográfica de “los numerosos mecanismos mediante los cuales las plantas vivas y sus microcosmos asociados podrían tener el potencial de mejorar la calidad del aire interior”, en las cuales se destaca la degradación de contaminantes gaseosos a través de diversas vías metabólicas, la eliminación de CO² y producción de O² mediante la fotosíntesis y la reducción de la concentraciones de polvo y bioaerosol (hongos, bacterias, virus y polen) en el aire.

Este proceso de homeostásis entre organismos fotosintéticos y aquellos que requerimos respiración aeróbica ha permitido mantener un equilibrio en el aire del planeta. No obstante, al comenzar la sociedad a utilizar espacios cerrados, aislados del ecosistema, el humano ha tenido que ingeniárselas para poder hacer recambios de aire del exterior al interior. Cuando este intercambio se ve mermado por la aislación de los espacios o las dificultades en la renovación del aire interior, plantear soluciones que purifiquen el ambiente interior parece ser una opción plausible.

Es por esto, que las investigaciones generadas por la NASA se vuelven tan relevantes, quienes frente a la pregunta de ¿Cómo cuidamos la calidad del aire en espacios que están aislados del exterior? Responden de la misma manera que funciona en los ecosistemas: con plantas.

1.3. Efectos psicológicos que generan la presencia de vegetación para las personas

Estudios indican que el contacto de las personas con la naturaleza, incluso si este es solo visual, es beneficioso para el estado de ánimo, ayudando a la recuperación de la fatiga mental -la cual es definida por Kaplan y Kaplan (1989) como el agotamiento de la atención- y mejora el comportamiento y estado de salud (Taylor, Kuo y Sullivan, 2001). El contacto con la naturaleza se define como tener algunos elementos naturales, como ve-

getación, cuerpos de agua o cielos azules a la vista (Kaplan, Kaplan y Ryan, 1998). Si bien generalmente el periodo no está especificado, Han (2009) afirma que incluso un breve período de contacto con la naturaleza puede proporcionar alivio temporal del agotamiento de la atención y el estrés psicofisiológico en vida cotidiana ordinaria, produciendo una experiencia micro restaurativa.

Ke-Tshung Han (2009) desarrolló un estudio experimental para investigar el efecto de las plantas de interior en la psicología, fisiología y comportamiento de las personas. Los resultados concluyeron que el grupo experimental que estuvo expuesto a la presencia de plantas tuvo “un inmediato y significativo sentimiento de preferencia, comodidad y amistad mucho más alto en comparación al grupo de control” (Han, 2009). Este resultado es denominado efecto restaurador, el cual es un concepto utilizado para definir el impacto que tiene un ambiente sobre las personas (Rivero & Schulmeyer, 2018). Han (2003) considera que la restauración hace referencia a la renovación de los recursos y las capacidades funcionales disminuidas, permitiendo devolverlas a su estado original o natural. Rivero y Schulmeyer (2018) afirman que “esta se puede observar en cambios positivos del humor, la disminución de la excitación, la mejora del rendimiento en tareas que requieren atención dirigida, entre otros cambios”; y tras su estudio concluyen planteando la hipótesis de que las escenas naturales (físicas o virtuales) “producen un mayor efecto restaurador en las personas que las escenas urbanas a nivel cognitivo, emocional y comportamental” (Rivero & Schulmeyer, 2018).

Es inferible, que el efecto restaurador de las plantas o naturaleza parece tener un resultado similar al de la biorremediación anteriormente descrita. Por lo tanto, las plantas tienen la capacidad de afectar tanto al ambiente como a las personas de manera de controlar su estado, permitiendo cambios que acercan a un estado no contaminado.

La presencia de vegetación en espacios interiores, beneficiarían tanto a nivel psicológico-conductual a las personas que utilizan dichos lugares, como a nivel atmosférico, mejorando la calidad del aire lo cual repercutiría en la salud de sus habitantes. De esta manera surge la interrogante:

¿Cómo reproducir artificialmente las condiciones ecosistémicas necesarias para la existencia, preservación y propagación de organismos biorremediadores autótrofos en espacios humanos cerrados?

1.4. Briófitas como biorremediación.

Dentro del reino plantae es posible hacer una gran división entre las plantas terrestres vasculares y no vasculares. Las primeras, son aquellas que poseen vasos de conducción de agua y savia, por ejemplo, árboles, arbustos y helechos. Mientras que las plantas no vasculares, se distinguen por no tener tejidos conductores de nutrientes especializados, lo que repercute en su pequeño tamaño (máximo 20-30 cm). Estas son las briófitas (musgos y hepáticas) y los antoceros (Omora, 2004).

Las briófitas son plantas criptógamas, término que Gutiérrez y Albanchez (2010) definen como cualquier vegetal pluricelular terrestre que no utiliza flores para su reproducción.

Soria y Ron (1995) sostienen que estas especies se han adaptado a través de una multiplicación vegetativa como estrategia para lograr el aumento del número de individuos de una población. Así, logran con gran eficacia colonizar medios inhóspitos, donde no se podrían desarrollar si dependieran de condiciones óptimas para la fecundación que normalmente tienen las plantas.

Asimismo, en materia de organización celular, estas plantas no permiten distinguir tejidos agrupados en forma de órganos especializados, es decir, no tienen raíz, tallo ni hojas. Sus células forman estructuras primitivas similares a las mencionadas, pero no alcanzan su grado de formación y desarrollo.

Las briófitas tienen hojas sin cutícula, “que es una capa de cera que está presente en las plantas vasculares y que les sirve para evitar la desecación. Por eso, los musgos y sobre todo las hepáticas crecen generalmente en lugares húmedos” (Omora, 2004).

Algunas características interesantes de estos organismos:

Resiliencia: Los musgos son parte de un grupo de plantas terrestres primitivas que evolucionaron hace más de 500 millones de años, en una época donde la Tierra era un lugar muy húmedo. Por ello, nunca desarrollaron raíces: simplemente crecen sobre cualquier superficie, absorbiendo la humedad presente en el aire. También, pueden tolerar temperaturas y humedades extremas. “Pueden sobrevivir porque tienen la capacidad de variar su nivel de hidratación de acuerdo a la humedad ambiente sin sufrir daños importantes, es decir, pueden resistir periodos de escasez de agua y recuperarse más tarde cuando exista una fuente de agua” (Omora, 2004).

Bajo mantenimiento / Libre de plagas: Los musgos no necesitan poda, debido a que el crecimiento es reducido porque como no tienen tejidos conductores que transportan agua o nutrientes, la planta autorregula su crecimiento en beneficio de que todo su sistema pueda alimentarse de manera correcta. Además, no es necesario usar suplementos de suelo o fertilizantes para que crezcan debido a que son naturalmente anti patógenas, a causa de los compuestos bioquímicos que almacenan en sus tejidos. Esto significa que no son vulnerables a las afecciones que pueden tener las plantas vasculares, y por ende, no necesitan de compuestos químicos para detenerlas (Benner, 2019). Por añadidura, no se conocen plagas de insectos que se aprovechen de los musgos, de modo que no es necesario usar pesticidas para regularlos (Benner, 2019).

Bioindicadores - Estudio de polución basado en briofitas: Las briófitas han sido estudiadas por el importante rol que juegan en el monitoreo de cambios en la atmósfera terrestre. Algunas especies, han sido ocupadas como briómetros: una bolsa de musgo que responde de manera predecible a diferentes niveles de contaminación del aire (Glime, 2007). Esta medición es posible gracias a las características de sus hojas, es decir, la ausencia de cutícula y que son de una sola capa de células. Dada a esta arquitectura y la falta de un sistema de conducción de nutrientes bien desarrollado, la mayoría de los musgos absorben tanto nutrientes como contaminantes directamente de la atmósfera, tan solo al ser interceptados por su superficie. (Glime, 2007).

Filtración del aire: Los investigadores coreanos Gong, Kang, Jeong, Jeong y Yun (2019), afirman que los musgos son efectivos para eliminar partículas en virtud de su gran superficie por unidad de área, debido a los innumerables pliegues presentes en su estructura. Los mismos autores, realizaron una investigación para verificar el poder biorremediador de musgos en la eliminación de Compuestos Orgánicos Volátiles y materia particulada. Los resultados revelaron que entre más presencia de musgo haya en el ambiente, el efecto de eliminación de COV aumenta. Por ejemplo, la concentración de formaldehído disminuyó 40 veces y las de monóxido de carbono 30 veces, en comparación al grupo de control. A partir del estudio, los autores concluyeron que los musgos son muy efectivos para la eliminación de partículas en suspensión y COV, por lo que “se espera que sean altamente utilizados con el propósito de decorar interiores y paisajismo para mejorar la calidad del aire interior” (Gong et al. 2019).

Para esta investigación se utilizó una especie de briófitas extraída en la Región del Biobío, Chile, en las cercanías de la ciudad de Puerto Montt. Estas son cosechadas —a modo de rescate—, de terrenos donde la construcción de proyectos inmobiliarios está eliminando el ecosistema natural de la zona.

Algunas especies de briófitas utilizadas en paneles de reducción de sonido es *cladonia rangiferina*. Sin embargo, estas se usan teñidas de verde y preservadas. Este último, es un proceso donde se sustituye la savia por glicerina, lo que genera que el aspecto estético de las briófitas se mantenga, pero no están vivas, pues no necesitan agua ni luz. A manera de experimentación, se usaron *cladonias* vivas, para poder ver la reacción a la variabilidad térmica y humedad ambiental durante el tiempo de implementación, y a la vez evaluar su adecuación biológica - fitness - en relación a los sistemas de humidificación utilizados.

2. Diseño biotecnológico basado en briófitas como medio de filtración ambiental.

Según lo expuesto, la presencia de vegetación en espacios interiores, beneficia tanto a nivel psicológico-conductual a las personas que utilizan esos lugares, como a nivel atmosférico, ya que mejoran la calidad del aire, lo cual repercute en la salud de los habitantes de estos recintos. Si bien un amplio espectro de especies de plantas pueden cumplir con estas características, las especies no vasculares, entre ellas musgos y hepáticas, presentan un alto potencial de integración en el diseño de los espacios interiores humanos. Es así como el diseñador Antonino Reinoso, autor de este artículo, desarrolla como proyecto de tesis un sistema biorremediador para espacios interiores, que soporte y brinde de manera automatizada las condiciones de vida óptimas para las briofitas. Al mismo tiempo, mediante un sistema de ventilación forzada permita potenciar los procesos naturales de fijación de carbono y filtración de contaminantes, ya que este dispositivo mejoraría los índices de calidad de aire y la percepción del espacio.

El propósito de este dispositivo es provocar una mejora en la calidad de los espacios, pues influye en la salud, comodidad y bienestar de las personas. Problemáticas que afectan ampliamente en la equidad y percepción de los espacios interiores. Por lo tanto, ayuda a desarrollar el sentido de pertenencia, a través del fortalecimiento y modernización de los ambientes donde los individuos pasan largos periodos de su tiempo.

A continuación se presentan algunas de las consideraciones que emergen desde el proceso de diseño, requerimientos asociados tanto a la integración interespecie como a la capacidad de un objeto, soporte de especies primarias, de funcionar como biorremediador y de ser un medio para reconocer el valor de estos procesos de regulación ecosistémicos.

2.1. Affordance: la controversia del uso versus el entendimiento

¿Qué ocurre cuando el éxito de un diseño no radica exclusivamente en el cumplimiento de las funciones para las cuales fue diseñado, sino además, que su triunfo esté determinado por hacer evidente su propósito y los mecanismos que utiliza en este proceso?

Cuantificar la usabilidad de un producto, un espacio o un intangible nos invita a revisar el concepto de affordance, que en palabras de Donal Norman en su libro “La psicología de los objetos cotidianos”, se define como las características perceptibles de un objeto que le dan un aspecto intuitivo a la hora de comprender cómo usarlo. El autor enfatiza en diferentes tipos de formas o respuestas de un objeto para que el usuario “pueda entender el funcionamiento de las cosas” (Norman, 1998).

Se puede reconocer en esta relación entre affordance y función, una relación simple de entrada/salida, apropiada para un contexto utilitario del diseño de dispositivos. Las formas que se desarrollarán serán capaces de transferir de manera inequívoca su modo de interacción con el usuario. En palabras de Maier y Fadel el affordance se entiende como “el conjunto de interacciones entre artefacto y usuario en el que las propiedades del artefacto son o pueden percibirse por el usuario como usos potenciales” (Como se cita en Brown & Blessing, 2005).

Existen ocasiones donde la comprensión de la función de un dispositivo es menos intuitiva de transferir. Para esto, se entregan pistas con referencias semánticas que nos conectan con el objetivo del dispositivo. En los electrodomésticos, por ejemplo, su función como artefacto no suele ser interpretada de forma intuitiva a partir de la forma total, independiente de lo bien resuelto que estén sus partes para promover la interacción con el aparato (e.g. una correcta manilla para la apertura de la puerta de un horno o el botón adecuado para el encendido de un extractor de aire), en muchos casos, se debe esperar un tiempo para obtener el beneficio deseado. Por lo cual, se utiliza un recurso semántico en el nombramiento del objeto para poder dar pistas de su función.

Refrigerador, es el sustantivo del verbo refrigerar. Si es usado por primera vez por una persona, en la indagación inicial podría parecer tan solo un armario que enciende su luz al abrirse y está más frío que el exterior. Solo posterior al primer uso, este nuevo usuario, puede percatarse que al dejar algo dentro por un tiempo y luego sacarlo tendría una menor temperatura que antes. Si este mismo usuario deja un alimento en su interior y otro a

temperatura ambiente, después de un par de horas o días, se percatará que los alimentos a menos temperatura permanecen en mejores condiciones que los mantenidos sin refrigerar. En este caso, la suma entre la percepción y lo verbal, ayuda a determinar la función del refrigerador, pues se puede percibir su beneficio, pero no es la intención del objeto que se entienda cómo funciona dicho proceso.

Cuando se diseña un refrigerador no se tiene como propósito educar a los destinatarios sobre el efecto bacteriano que sufren los alimentos en distintos gradientes térmicos, tampoco es el rol del diseñador dar a entender cómo se reduce la temperatura por medio de la evaporación de un líquido a presión; la forma del artefacto ha quedado relegada a un envolvente que aísla a las personas de estos procesos y que simplifica la interacción del usuario a la mera operación del artefacto para obtener un beneficio.

Al hablar de aquel que usa, se limita el rol del diseñador o diseñadora como transformadores de la sociedad en la que se desarrollan. Si bien, la disciplina interpela a entender las dinámicas que los destinatarios naturalizan en su interacción con las propuestas diseñadas, en muchos casos, el desafío trasciende a la relación de forma es a función y es menester plantear ¿qué elementos y formas deben ser relevados para avanzar hacia la revelación de un propósito que emerge desde un uso?.

Si bien podemos afirmar que las personas son concientes que las plantas realizan funciones vitales para los humanos (e.g. liberan oxígeno y fijan dióxido de carbono). En el diario vivir, la percepción de ellas en entornos urbanos o en espacios interiores están arraigadas a funciones secundarias, como la ornamental o recreativa, y parece ser que se entiende que son otras plantas las que ejecutan esta actividad esencial, no las que rodean a los individuos en su cotidianidad. En este sentido, el desafío de configuración formal de un filtro asistido por plantas, consiste en diseñar un artefacto que purifique el aire con ayuda de briófitas, y también, logre evidenciar su funcionamiento junto con los beneficios que representa la ayuda de plantas en procesos de biorremediación ambiental. De este modo, evitar que se transforme perceptivamente en un jardín vertical y que su razón de ser sea meramente estético.

2.2 ARB 1.0 - Artefacto remediador briofitario

ARB, por su sigla Artefacto Remediador Briofitario es un sistema de biorremediación ambiental de código abierto, basado en los procesos metabólicos de briófitas y asistido por mecanismos de ventilación forzada. Está destinado para espacios interiores contaminados con altos niveles de dióxido de carbono y otros gases inertes. El sistema cuenta con una estructura modular de perfiles metálicos, un sustrato sintético para la fijación y propagación de las briófitas, la electrónica asociada a la ventilación y un sistema autónomo de irrigación que determina el nivel de humedad y activa los dispositivos de humidificación por nebulización ultrasónica.

La alta presencia de contaminantes ambientales (e.g. CO₂, COV, entre otros) en espacios con poco intercambio de aire con el exterior, ha sido reconocida como componentes del Síndrome del Edificio Enfermo. Esto implica efectos nocivos para la salud, manifestados

en síntomas como dolor de cabeza, mareos, náuseas, dolor de ojos y garganta, o disminución en funciones cognitivas que se reflejan en pérdida de concentración y reducción en el desempeño la toma de decisiones. Su propósito es mejorar los índices de calidad ambiental en espacios sometidos a condiciones de contaminación “no visual”, y también provocar un efecto restaurador a nivel psicológico en las personas que habitan estos espacios, mediante las capacidades biorremediadoras de las briófitas y otros organismos autótrofos. A continuación se describen los componentes del sistema, sus requerimientos operativos y los mecanismos de organización y cooperación.

Soporte y estructura

Para albergar todos los sistemas del artefacto se utilizaron dos formatos: [1] la estructura que aloja todos los componentes electrónicos, los mecanismos de ventilación y los sistemas de irrigación; [2] y el soporte que permite la fijación y propagación de los musgos.

El primero consiste en la estructura que sostiene cada una de las partes del prototipo. Fue realizado con perfiles V-Slot de acero inoxidable de 20 por 20 mm. Estos comúnmente son usados para la construcción de máquinas, como impresoras 3D y CNC Router, por su alta firmeza y resistencia a las vibraciones. La decisión del uso de este tipo de estructuras basada en perfiles armables versus la opción de un chasis consolidado de perfiles unidos o soldados se funda en la necesidad de articular un sistema adaptable, que pueda variar según los requerimientos espaciales o la inclusión de elementos extra. La adaptabilidad que otorgan los V-Slot, permitieron repensar la organización de los espacios en repetidas ocasiones, cuyas dimensiones son de 400 mm de ancho, 400 mm de alto y 210 mm de profundidad.

En segundo lugar, está el soporte para los musgos que va adosado a unas de las caras cuadradas de la estructura de acero. Este fue realizado en acrílico transparente de 5 mm de grosor, con un sistema de ensamblaje hecho con corte láser. La estructura se compone de dos niveles conectados entre sí. El primer nivel es el que se une al soporte metálico con el sistema de humidificación para los musgos y los medidores de humedad. El segundo es el almacenador de musgos, que tiene una profundidad de 40 mm para su estancia, en un cuadrado de 310 mm de largo por 310 mm de alto. La base, tiene 289 perforaciones de 7 mm de diámetro, distribuidas en 17 líneas para permitir la succión de aire desde el ambiente hacia el extractor y que pase por la alfombra de musgos. La decisión de tamaño y distancia se basa en el ánimo de tener la mayor cantidad de perforaciones posibles, pero que la superficie no pierda estructura ni resistencia. Además, para evitar la pérdida de sustrato de las plantas, la base incluye unas hendiduras para que con sujetadores, se pueda atar una capa de malla al acrílico. De esta forma, se pueden sostener con mayor facilidad los módulos de musgo, ya que es una superficie porosa que aumenta el roce, lo que facilita la adhesión.

Sistema de irrigación

El sistema de riego utilizado para el dispositivo es por humidificación ultrasónica. Contempla tres etapas: censado, producción de niebla y distribución, además de los componentes que permiten este proceso. La primera fase del proceso, la define un medidor de Humedad Relativa DHT22 que se encuentra en el soporte de acrílico junto a las briófitas. Este es capaz de detectar humedad, en un rango de 0% a 99.9% HR con una precisión de $\pm 2\%$. Con la ayu-

da de un microcontrolador de 8 bits integrado, el DHT22 convierte la señal analógica en una señal digital que se transmite a la placa controladora y con una detección cada 10 segundos, evalúa la HR. Si es menor a 40% HR, activa el sistema de humidificación.

En la parte trasera del artefacto, hay un recipiente de acrílico transparente de 5 mm construido con ensamblajes hechos por corte láser. Las piezas fueron unidas por medio de un adhesivo químico (CHCl_3), el cual actúa mediante disolución fijando las piezas. Asimismo, se aplicó un sello de silicona termofusible sobre todas las aristas interiores para asegurar que no exista filtración de agua. El recipiente está afirmado a la estructura metálica, mediante uniones impresas en PLA que fueron apernadas al soporte. Dicho contenedor, alberga la reserva de agua, un generador de neblina y un ventilador que permite la circulación de esta. La producción de niebla, es decir la segunda etapa, está a cargo de un humidificador ultrasónico de 25V. Este aparato, produce gotas de agua de entre 1 y 3 micras, a través de vibraciones de muy alta frecuencia (1,7 MHz) de una membrana cerámica. Cuando se activa el generador de neblina y está sumergido en agua, produce una niebla que aumenta las condiciones de humedad sin riesgos de condensación.

En resumen, el sistema funciona de la siguiente manera: cuando el sensor indique un bajo nivel de HR, la placa electrónica dará una señal a un relé para activar el paso de corriente hacia el humidificador, el cual comenzará a producir microgotas. Al mismo tiempo, se encenderá el ventilador de 12V adosado al recipiente, que inyectará aire desde el exterior al interior de la caja para provocar un impulso de este y así, empujar la niebla con más fuerza hacia los musgos.

La distribución homogénea de la neblina producida, es la tercera etapa del sistema de riego. El movimiento de aire, tiene por objetivo que la neblina salga por un agujero (sobre el humidificador) ubicado en la tapa del recipiente, el cual conectará la producción de niebla, con el sistema de distribución de esta. El fin es que la humedad generada, sea llevada hasta las briófitas. Esto se hará mediante un sistema de distribución hecho con canaletas de PVC, de 10 mm de ancho por 20 mm de alto —ideales por su bajo costo y porque tienen conectores en forma de L y T que facilitan la construcción—. Con estos perfiles poliméricos, se construirá un recorrido para trasladar la niebla generada hasta el soporte de los musgos. Para lograr un riego uniforme, se creó un borde de canaletas continuo al marco de fierro que afirma la superficie de las plantas con 6 perforaciones equidistantes en cada lado, es decir, hay 24 puntos de expulsión de neblina. De esta forma, habrá una hidratación homogénea de las plantas.

Organismos autótrofos - Musgos y microbiota

A modo de experimentación, para verificar la posibilidad de mantener la vida de los musgos por medio de un sistema de humidificación y comprobar si es posible el traspaso del aire, se utilizaron especies extraídas en la Región del Bío-bío, al sur de Chile, específicamente de las cercanías de Puerto Montt. Al igual que las *cladonias* mencionadas previamente, los musgos utilizados son cosechados —a modo de rescate—, de terrenos donde la construcción de proyectos inmobiliarios está eliminando el ecosistema natural de la zona. Estas briófitas fueron recogidas junto a una capa de sustrato de 20 mm aproximadamente, para evitar desarticular el conjunto de plantas. Posterior a la cosecha, se mantuvieron

a 40% de Humedad relativa hasta el traslado. Al llegar, se les mantuvo en el exterior a la sombra y fueron regadas con aspersor manual tres veces al día. Antes de colocar los musgos en el soporte, se les extrajo toda contaminación que pudieran traer, por ejemplo tierra, plantas o insectos que estuvieran en el lugar. Posterior a la limpieza, se comenzaron a adherir los módulos sobre la malla en el soporte con ayuda de pequeñas aplicaciones de silicona para facilitar la unión entre superficies. Dado los tamaños del soporte, la alfombra de musgo quedó con una superficie de 300 mm de ancho por 300 mm de alto. La humidificación funcionó de manera correcta debido al mecanismo de salidas de niebla, lo que permitió el riego de toda la superficie vegetal. De este modo, al estar regulados ambientalmente los musgos, podrían producir sus funciones biorremediadoras correctamente. Un paso posterior en la investigación, corresponderá —en condiciones de laboratorio— a definir la capacidad biorremediadora de este musgo en particular y qué especies serían las más idóneas para este trabajo. Para ello, deben ser principalmente tolerantes a la ubicación artificial, al agua dura y a la acumulación de polvo. Las características antes señaladas contribuirían a un desarrollo óptimo de un artefacto remediador briofitario para espacios interiores.

Sistema de Ventilación forzada

Para poder absorber el aire del ambiente y que este pase por el medio vegetal, el artefacto cuenta con un extractor de aire metálico de tipo axial. Además, posee un motor de 40W, el cual puede llegar a 2.800 revoluciones por minuto y su capacidad de extracción de aire es de 250 m³/hora. Este mecanismo, fue acoplado a través de los ángulos de acero inoxidable de 2 travesaños ubicados especialmente dentro de la estructura para dar estabilidad al dispositivo. El extractor es comandado por una placa Arduino Uno. El componente accionará en distintos ciclos de extracción de aire a lo largo del día, lo que permite hacer circular el aire por el biofiltro.

3. Resultados

El sistema respondió bien según los resultados esperados. Se obtuvo un caudal de ventilación de 220 m³/h promedio, que es mayor a los 150 m³/h que se tenían como referencia. En posibles iteraciones podría ser conveniente evaluar si la utilización de extractores con menor potencia podrían llegar a esos caudales o similares. Eso sería beneficioso para aplacar el ruido emitido por el extractor de aire, que es entre 30 y 35 db, lo cual se considera como moderado.

A modo de especulación y proyección de posibles resultados del artefacto biorremediador, se tomó como referencia el estudio de Gong y colaboradores (2019), quienes tomaron 3 especies de musgos nativos de zonas montañosas y los usaron en su investigación de degradación de contaminantes por briófitas. El experimento consistió en medir las concentraciones de contaminantes artificialmente producidos, comparando resultados de la muestra de control con los arrojados en presencia de 2, 4 y 6 placas de 210 mm de ancho

por 297 mm de largo, cubiertas uniformemente con musgos. Los resultados revelaron que —en lapsos de 4 horas—, entre más placas hayan, existe una mayor reducción de contaminantes como los COV, material particulado y CO², en todos los casos testeados. Realizando un parangón proporcional con el tamaño del biofiltro ARB 1.0 y los promedios de disminución en presencia de dos placas según el experimento mencionado, podría haber una disminución de 252 µg · m³ de material particulado y 0,34 mg·L⁻¹ de COV. A esto, habría que agregar que el artefacto incluye un sistema de ventilación forzada por lo que aumentaría el contacto del medio aéreo con los musgos, lo que provocaría una mayor fijación de contaminantes.

A pesar de los posibles resultados positivos, es importante indagar en la relación empírica que tendrían los musgos locales con la reducción del CO². Asimismo, poder identificar qué especies son las más adecuadas para la fijación de este contaminante, y también, explorar la posibilidad de modificaciones genéticas que permitan aumentar el proceso biorremediador del dióxido de carbono.

ARB 1.0 es conceptualizado como un artefacto: “objeto formado por un conjunto de piezas, fabricados para un fin determinado” (Oxford Language, s.f., definición 1). Todos sus sistemas trabajan en pos de mantener una unidad ecológica briofitaria autónoma y auto-suficiente, catalizando sus capacidades biorremediadoras y maximizando el intercambio atmosférico. El sistema de humidificación, permite entregar el agua necesaria para la proliferación de las plantas no vasculares, el sistema de ventilación aumenta el contacto con el medio aéreo que tiene el biofiltro y los musgos. De esta manera, su metabolismo se enriquece desde el aire succionado, filtrando contaminantes presentes en los espacios cerrados. Todo el conjunto de sistemas, se comportan como una unidad ecosistémica híbrida natural-sintética con repercusión en el espacio donde se encuentra inserta. Un simbiote compuesto por un componente biológico artificialmente asistido, permite aumentar el valor biorremediador propio de estos organismos primarios.

4. Conclusiones

Esta investigación y el proyecto presentado en este artículo son parte de un esfuerzo por desarrollar iniciativas de Diseño Biológicamente Inspirado ((Lenau, Metze & Hesselberg, 2018), que desde una perspectiva de código abierto responde a una transferencia de soluciones de cooperación interespecies. En este sentido, los próximos pasos están referidos a la transferencia de su diseño e instrucciones de fabricación en plataformas de código abierto con el fin de conectar a comunidades de creadores y potenciales usuarios, incluyendo mejoras, adaptaciones locales y resultados que nutran un cuerpo de conocimiento dinámico de esta forma enriquecida de habitar.

Somos una especie formadora de hábitats (Thomsen, 2010) y nuestra relación con los consorcios ecológicos que han sido parte de nuestra historia evolutiva no puede ser relegada o excluida de los espacios que habitamos y del cómo los diseñamos. Nuestra relación con el entorno debe trascender una mera dimensión consumo dependiente hacia la promoción

de modelos de interacción que favorezcan la biodiversidad en los espacios que habitamos, no solo como reservorios ajenos a nuestras experiencias cotidianas.

Lectura de imágenes



Imagen 1. Detalle de cultivo de briofitas (*Cladonia Rangiferina*) utilizadas en las etapas de experimentación de cultivo y propagación.



Imagen 2. Artefacto biorremediador briofitario con sistemas interconectados.



Imagen 3. Detalle estructura polimérica de nebulización e hidratación de organismos fotosintéticos.

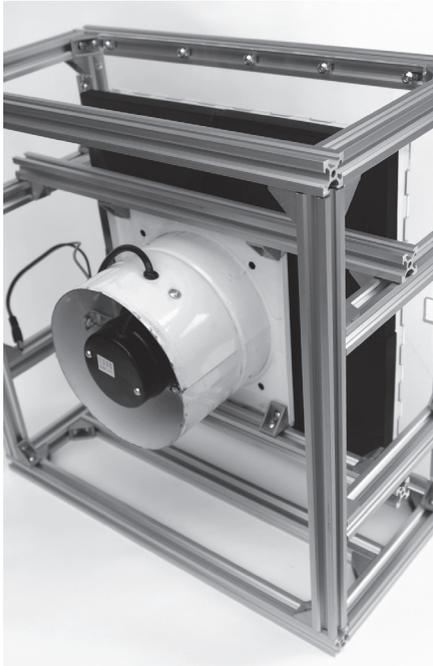


Imagen 4. Sistema de ventilación forzada para el ingreso de aire al sistema.

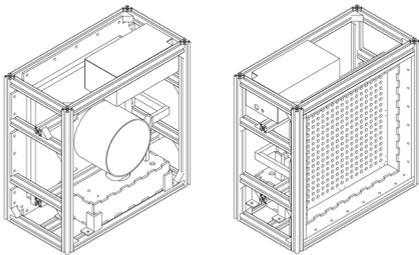


Imagen 5. Detalle constructivo del ARB v01.

5. Referencias bibliográficas

- Benner, A. (2019) En Beneficial characteristics of moss. *AEC1206 Live Moss Wellness Walls: Soothing the Senses and Revitalizing Indoor Air* (pg. 33). AEC Daily Corporation.
- Brasche, S., Bullinger, M., Gebhardt, H., Herzog, V., Hornung, P., Kruppa, B., Meyer, E., Morfeld, M., Schwab, R. V., Mackensen, S., Winkens, A. and Bischof, W. (1999). 'Factors Determining Different Symptom Patterns of Sick Building Syndrome – Results From a Multivariate Analysis', in *Proceedings of Indoor Air '99*. The 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Edinburgh, Scotland, August, 1999, pp. 402–407.
- Brown, D. C., & Blessing, L. (2005). The relationship between function and affordance. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 4742, pp. 155-160).
- Brown, S. K., Sim, M. R., Abramson, M. J., & Gray, C. N. (1994). *Concentrations of volatile organic compounds in indoor air—a review*. *Indoor air*, 4(2), 123-134.
- Campusano, R. (2012). Síndrome del edificio enfermo. *Revista Sustentabit*. Recuperado de <http://colegioarquitectos.com/noticias/wp-content/uploads/2012/02/Rev-SustentaBit.pdf>
- Earth System Research Laboratories Global Monitoring Laboratory (2020) *Global Monthly Mean CO2*. ESRL NOAA. Recuperado de <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>
- Garbisu, C., Amézaga, I., & Alkorta, I. (2002). Biorremediación y ecología. *Revista Ecosistemas*, 11(3).
- Glime, J. M. (2007). Economic and ethnic uses of bryophytes. *Flora of North America*, 27, 14-41.
- Gong, G. Y., Kang, J. S., Jeong, K. J., Jeong, J. H., & Yun, J. G. (2019). *Effect of Several Native Moss Plants on Particulate Matter, Volatile Organic Compounds and Air Composition*.
- Gutiérrez F. & Albanchez, I. (2010) *Botánica*. Ed. FIRMAS Press. Montevideo, Uruguay. 172 p.
- Han, K. T. (2003). *A reliable and valid self-rating measure of the restorative*. *Landscape and Urban Planning*, 64(4), 209-232.
- Han, K. T. (2009). *Influence of limitedly visible leafy indoor plants on the psychology, behavior, and health of students at a junior high school in Taiwan*. *Environment and Behavior*, 41(5), 658-692.
- Ii, H., Taguchi, K., & Yamashita, M. (2016). *Natural ventilation effect on CO2 concentration in the classroom, Wakayama University, Japan*. *International Journal*, 10(21), 1936-1942.
- Kaplan, R. & Kaplan, S. (1989). *The Experience of Nature: A Psychological Perspective*. CUP Archive.
- Kaplan, R., Kaplan, S. & Ryan, R. (1998). *With People in Mind: Design and Management of Everyday Nature*. Washington DC: Island Press.
- Lenau, T. A., Metze, A. L., & Hesselberg, T. (2018). Paradigms for biologically inspired design. In *Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication VIII* (Vol. 10593, p. 1059302). International Society for Optics and Photonic
- Llewellyn, D., & Dixon, M. (2011). 4.26 *Can plants really improve indoor air quality*. *Comprehensive Biotechnology* (Second Edition), Academic Press, Burlington, 331-338.

- National Aeronautics and Space Administration. (1974). *Proceedings of the Skylab Life Sciences Symposium*, 27-29 agosto, 161-168. NASA TM-X-58154. Houston, TX: Johnson Space Center.
- Norman, D. A. (1998). *La psicología de los objetos cotidianos* (Vol. 6). Editorial Nerea.
- Omora, F. (2004). *Explorando la Micro-Biodiversidad del Cabo de Hornos*
- Oxford Language. (s.f.). *Lexico*. Recuperado de <https://www.lexico.com/es/definicion/artefacto>
- Persily, A. K., & Gorfain, J. (2008). *Analysis of ventilation data from the US Environmental Protection Agency Building Assessment Survey and Evaluation (BASE) Study*, NISTIR-7145-Revised. US National Institute of Standards and Technology.
- Rivero, T., & Schulmeyer, M. K. (2018). *El impacto del medio ambiente en estudiantes universitarios. Percepción del efecto restaurador de imágenes naturales y urbanas*. *Ajayu. Órgano de Difusión Científica del Departamento de Psicología UC BSP*, 16(1), 150-171.
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). *Is CO2 an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO2 concentrations on human decision-making performance*. *Environmental health perspectives*, 120(12), 1671-1677.
- Schires, M. (2019) *La importancia de diseñar contemplando una buena calidad de aire interior*. *Plataforma Arquitectura*. (Trad. Castro, Fernanda) *Plataforma Arquitectura* Recuperado de: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/916475/la-importancia-de-disenar-contemplando-una-buena-calidad-de-aire-interior>
- Soria, A. & Ron, E. (1995). Los briófitos y el medio urbano. *Agricultura: Revista agropecuaria y ganadera*, (751), 96-101.
- Taylor, A. F., Kuo, F. E. & Sullivan, W. C. (2001). *The surprising connection to green play settings*. *Environment and behavior*, 33(1), 54-77.
- Thomsen, Mads S., et al. (2010). "Habitat Cascades: The Conceptual Context and Global Relevance of Facilitation Cascades via Habitat Formation and Modification." *Integrative and Comparative Biology*, vol. 50, no. 2, Aug. 2010, pp. 158-75. DOI.org (Crossref), <https://doi.org/10.1093/icb/icq042>.
- UNFPA. (2007). *State of world population 2007: unleashing the potential of urban growth*. In *State of world population 2007: unleashing the potential of urban growth*. UNFPA.
- Vargas, F., & Gallego, I. (2005). Calidad ambiental interior: bienestar, confort y salud. *Revista española de salud pública*, 79, 243-251.
- Wolverton, B. C., Johnson, A., & Bounds, K. (1989). *Interior landscape plants for indoor air pollution abatement*.
- World Health Organization Regional Office for Europe. (2008). *Sick building syndrome*. ONU. Recuperado de www.wondermakers.com/Portals/0/docs/Sick%20building%20syndrome%20by%20WHO.pdf

Abstract: Living in urban ecosystems produces changes in mobility routines that lead us to spend more than 80% of our time in closed spaces. This way of living presents negative externalities associated with environmental pollution caused by the reduction of indoor-outdoor air exchange, increasing the concentration of CO₂ and other volatile organic compounds. The bioremediation produced by bryophytes has shown a high performance in the fixation and degradation of these pollutants, in addition to the biorestorative effects of plants on people's emotional state. This research presents the design of an open-source bryophyte remedial device (BRD) that improves the environmental conditions of closed spaces.

Keywords: Bioremediation - Bryophyte - Sick Building Syndrome - Open-source - Biologically Inspired Design

Resumo: Habitar ecossistemas urbanos gera mudanças nas rotinas de mobilidade que nos levam a viver mais de 80% do nosso tempo em espaços fechados. Esse modo de vida apresenta externalidades negativas associadas à poluição ambiental causada pela redução da troca de ar interior-exterior, aumentando a concentração de CO₂ e outros compostos orgânicos voláteis. A biorremediação produzida por briófitas tem demonstrado um alto desempenho na fixação e degradação desses poluentes, além dos efeitos biorestauradores dos organismos vegetais sobre o estado emocional das pessoas. A presente investigação apresenta o projeto de um dispositivo de correção de briófitas (BRA) de código aberto que melhora as condições ambientais de espaços fechados.

Palavras chave: Biorremediação - Briófitas - Síndrome do Edifício Doente - Código Aberto - Design Biologicamente Inspirado

[Las traducciones de los abstracts fueron supervisadas por su autor]
