

Movilidad urbana y redes biológicas sistémicas

Urban mobility and biological systemic networks

Recibido: 18 de noviembre de 2011. Aprobado: 24 de agosto de 2012.

Andrés Hernando Valencia
Escobar

✉ andres.valencia@upb.edu.co

Ingeniero mecánico. Magíster en Ingeniería
Área de Nuevos Materiales. Docente investi-
gador de la Universidad Pontificia Bolivariana
(UPB), Colombia

Elizabeth María Jiménez Rojo

✉ elizabethmaria.jimenez@alfa.upb.edu.co

Juliana Gallego López

✉ juliana.gallego@alfa.upb.edu.co

Juan David Franco Muñetón

✉ juandavid.franco@alfa.upb.edu.co

Estudiantes de pregrado del Programa de
Diseño Industrial de la UPB y miembros
del Semillero de Investigación Morfolab
de la Línea de Investigación en Morfología
Experimental

Artículo de investigación derivado del trabajo
adelantado por el Semillero de Investigación
Morfolab, UPB

Todas las imágenes son de los autores,
excepto donde se indique lo contrario.

Resumen

El mejoramiento de la movilidad urbana se considera uno de los principales retos para desa-
rrollar las localidades de todo el mundo, debido al incremento constante de medios, sujetos e
intenciones de desplazamiento. Dado que el espacio disponible no se incrementa de manera
proporcional a estos elementos, se genera una tensión que implica problemáticas importantes.
Este trabajo está enfocado en la búsqueda de oportunidades de solución para los problemas de
movilidad vial del Valle de Aburrá y se sustenta en la biomimética como estrategia metodológica
que reconoce a la naturaleza como sistema articulado que ajusta y perfecciona sus componentes
y procesos según sus requerimientos.

Palabras clave: movilidad urbana, biónica, red sistémica, sistema de venación de las hojas,
diseño.

Abstract

Due to the constant increase of methods of transportation, people, and reasons for travel, the
improving of urban transportation is considered to be one of the major challenges in developing
local areas world over. Given that the space available has not increased in a manner that is
proportional to its elements, a tension has resulted that involves important problems. This paper
focuses on the search for opportunities to solve transport issues on the Valle de Aburrá road and
support is given to biomimicry as a methodological strategy that takes nature into consideration
as a structured system that adjusts and perfects its components and processes according to their
requirements.

Key words: urban mobility, bionics, systematic network, leaf venation system, design.

Actualmente se pueden identificar falencias en la dinámica de movilidad del Valle de Aburrá, asociadas —en parte y de forma directa— con un crecimiento exponencial de los sujetos que se desplazan y de los medios a través de los cuales lo hacen, sin que esto se contrarreste con un aumento proporcional del número y el tamaño de las vías y espacios para ello. Esto parece dar como resultado una respuesta ineficiente del sistema vial, al no estar concebido para adaptarse y responder a dichos aumentos, lo que genera una situación crítica frente a lo que se debería tener para la actualidad y para el futuro. Lo anterior en términos, por ejemplo, de la ocurrencia de un accidente que genere una interrupción que puede ser parcial o permanente en una vía. Esta situación hace que el sistema colapse, ya que muchas de las vías principales del Valle no tienen rutas alternativas suficientemente eficaces como para evacuar los automóviles que se estancan. El análisis de dicha problemática, que caracteriza a las redes urbanas de movilidad del Valle de Aburrá, se presenta como una constante temática de estudio, la cual ha sido abordada desde múltiples disciplinas como el urbanismo, la arquitectura, el diseño, la ingeniería civil, entre otras.

Esta investigación se basa en el modelo metodológico de la biomimética, para el cual se propone identificar principios de funcionamiento naturales que puedan interpretarse o traducirse como referentes de diseño.¹ Se trabaja desde el concepto de *redes biológicas sistémicas y adaptables* como punto de partida para la búsqueda de modelos de trabajo que permitan subsanar la carencia de conocimiento, iniciativas e intervenciones realizadas en el contexto local de movilidad.

Las redes naturales que transportan sustancias se caracterizan por haber evolucionado de manera que el manejo de los flujos y las presiones se optimiza, a fin de usar eficientemente la energía. Dentro de ellas, los sistemas vasculares de las plantas representan un foco de estudio importante, por cuanto de su eficiencia depende la vida de estos organismos y, por ello, debe ser muy alta la confiabilidad y la capacidad de adaptación que tienen. Además, estos

sistemas naturales están expuestos a variaciones constantes en sus condiciones de funcionamiento, lo que los obliga a reaccionar de manera oportuna y efectiva para mantener sus funciones. A partir de lo anterior se justifica la intención de comparar los sistemas vasculares vegetales con los sistemas viales urbanos.

Los sistemas de venación de las hojas dicotiledóneas representan una oportunidad de trabajo en el marco del mejoramiento de los trazados de las redes viales urbanas, en la medida en que se observan como un conjunto de vías que toman los fluidos que se mueven en el interior de este órgano de planta, de manera que puedan abarcar la mayor cantidad de área posible recorriendo el mínimo espacio. De esta manera, el concepto de *caminos mínimos*, trabajado por ejemplo por Frei Otto y Bodo Rash, aparece como un esquema que puede aportar desde un cambio en el paradigma de los trazados ortogonales a la dinamización de la movilidad urbana, por cuanto, incluso en presencia de alteraciones drásticas en uno o varios de los elementos constitutivos de la “red de caminos”, las hojas deben garantizar el acceso al agua para su evaporación en el proceso de fotosíntesis y el transporte de líquidos cargados con alimento hacia las demás partes de la planta.²

La revisión bibliográfica realizada permitió establecer como punto de referencia el sistema de venación de las hojas de las plantas dicotiledóneas, el cual funciona como una red biológica compleja que se caracteriza por cumplir dos funciones importantes asociadas a la resistencia estructural y al transporte y distribución interna de sustancias y nutrientes.³ Además, se presenta como un modelo jerárquico de organización que forma una red cerrada en el cual se presenta un patrón geométrico que proporciona la dimensión de cada segmento respecto a su radio.⁴ Bajo estas características, este modelo se puede comparar con el trazado vial de una ciudad, como se muestra en la figura 1, y por ello representa una oportunidad de trabajo que posibilita el estudio de su funcionamiento y comportamiento tanto en condiciones normales como en presencia de alteraciones que amenacen su actividad

1 Vincent et al., “Biomimetics: Its Practice and Theory”.

2 Otto y Rasch, *Finding Form*.

3 Roth-Nebelsick et al., “Evolution and Function of Leaf”.

4 Bohn et al., “Constitutive Property of the Local Organization”.

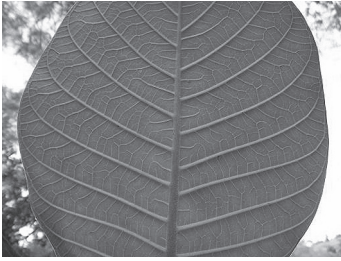


Figura 1. Arriba: sistema de venación de la hoja de una planta dicotiledónea. Abajo: mapa vial de la ciudad de Medellín. Fuente: Municipio-de-Medellín 2009

natural. Su análisis permite comprender cómo esta se adapta en pro de su supervivencia, y de esta forma abstraer modelos de funcionamiento que puedan ser implementados en posibles situaciones hipotéticas de perturbación en las redes urbanas de movilidad.

Por lo tanto, con el fin de abstraer una serie de principios naturales que conformen bases conceptuales que mitiguen la problemática real y cotidiana de la movilidad vial, esta investigación tuvo como objetivo principal determinar las características y estrategias naturales utilizadas por el sistema de venación de las hojas de las plantas dicotiledóneas para el

transporte de nutrientes y sustancias, tanto en condiciones normales como en presencia de alteraciones internas, bajo un esquema que tiene en cuenta el tiempo como variable determinante, en función de su aplicabilidad como referente que permita el mejoramiento y estructuración futura de una red de movilidad sistémica y adaptable en el Valle de Aburrá.

El análisis del sistema de venación de las hojas ha sido ampliamente desarrollado tanto desde el punto de vista biológico como desde el físico y matemático; sin embargo, no se evidenció ningún trabajo que tomara sus características y las transfiriera hacia esquemas que mejoraran la movilidad, aunque sí se menciona esta oportunidad como una posible ruta de trabajo.⁵ Los antecedentes sobre el proceso de adaptación del sistema de venación de las hojas ante alteraciones aluden solo a la hoja de limón y a cómo ella distribuye el fluido a través de su sistema ante la presencia de una interrupción en la trayectoria del flujo, usando circuitos cerrados que optimizan la función;⁶ pero esta aproximación no tiene en cuenta el tiempo que le toma a la planta adaptarse, que es una variable importante a la hora de transferir los resultados al modelo artificial.

Este proyecto se desarrolló en el marco del Sistema de Formación en Investigación, de la Facultad de Diseño Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana, dentro del cual la línea de investigación en Morfología Experimental lidera la ejecución de proyectos de investigación formativa por medio de los cuales se hacen aproximaciones científicas a través de la biomimética para solucionar problemas humanos reales. Estos proyectos tienen una duración de tres semestres académicos, por lo cual es profunda la rigurosidad científica que se alcanza. El enfoque utilizado hace hincapié en la comprensión y posterior abstracción de los principios y patrones naturales, para con ello plantear como trabajos futuros las transferencias tecnológicas de los resultados del proyecto. Lo anterior implica que los resultados presentados no incluyen su aplicación directa en el entorno artificial, aunque su origen sí está basado en una problemática real identificada y caracterizada.

5 Biomimicry-Institute, "Vein System Resilient".

6 Katifori, Szöllösi y Magnasco, "Damage and Fluctuations".

Materiales y métodos

Inicialmente, y con el fin de caracterizar la red que configura el sistema de venación de la hoja y los principales componentes y características de su estructura, se llevó a cabo un estudio y definición de posibles especies potenciales, dentro de las cuales se contemplaron algunas con diferentes tipos de ramificación y niveles de distribución, tanto monocotiledóneas como dicotiledóneas. Mediante un escaneo digital de alta definición, proporcionado por el Herbario del Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe de la ciudad de Medellín, se identificaron cada una de sus particularidades formales y estructurales, lo que posteriormente condujo a la elección de la especie *Epipremnum aureum*, comúnmente conocida como potus, como un adecuado elemento de estudio, debido no solo a sus componentes físicos, sino a su facilidad de adaptación a diversos ambientes y condiciones.

De la especie *Epipremnum aureum* (fig. 2) se tomaron hojas maduras con longitudes entre los seis y los ocho centímetros con el peciolo completo. Estas muestras se coleccionaron con ayuda de un bisturí y puestas de inmediato en contacto con un fluido fluorescente para disminuir los efectos de la deshidratación. La caracterización anatómica del sistema de venación de la hoja se hizo a partir de un escáner digital de alta definición con el que se obtuvo una imagen detallada de la superficie de la hoja que luego fue digitalizada por medio del *software* Rhinoceros versión 4.0. Se utilizó un montaje de observación construido localmente, en el cual se posicionó la hoja de manera que absorbiera una sustancia líquida fluorescente dispuesta en un tubo de ensayo en el que se sumergía el peciolo de la hoja. La hoja fue iluminada por una lámpara ultravioleta GE F40BLB 40 watts que permitía ver el desplazamiento de la sustancia en su interior. Se tomó un registro fotográfico con una cámara digital Canon EOS Rebel T3 y se registró el tiempo de llenado del sistema completo con un cronómetro digital Casio H-3. Las intervenciones sobre el sistema de venación se hicieron con un punzón de madera de cinco milímetros de diámetro.

Luego de haber realizado dicha selección, se procedió a reconocer y referenciar geoméricamente la red, a través tanto de una caracterización anatómica

de sus partes principales como del sometimiento de una muestra a un proceso de secado controlado sin pérdida de la flexibilidad y una siguiente digitalización por medio de vectores utilizando el *software* Rhinoceros 4.0. Posteriormente, con el fin de identificar las trayectorias en el interior de la red empleadas para el flujo de sustancias, se realizó una toma y preparación de muestras de la especie que se iba a analizar, las cuales —con el fin de estandarizar y optimizar la observación— se cortaron con una longitud aproximada de seis u ocho centímetros, e inmediatamente fueron sumergidas en siete mililitros de una solución de líquido fluorescente, para inducir un proceso de absorción y distribución, tal y como se observa en la figura 3.

Dichas muestras se expusieron a la luz de una lámpara UV, la cual proporcionó una óptima observación por medio del contraste generado tras el recorrido de la sustancia. Este proceso fue documentado mediante un registro fotográfico con una cámara de alta definición a un intervalo de tres minutos, en un montaje que se puede observar en la figura 4.



Figura 2. Hoja de la *Epipremnum aureum*

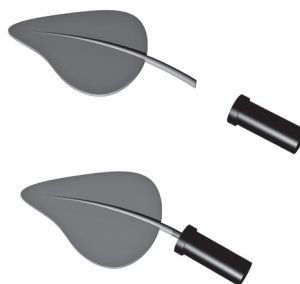


Figura 3. Toma y preparación de muestras

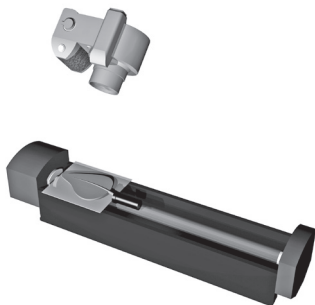


Figura 4. Proceso de experimentación

Luego de observar el proceso de absorción y transporte de sustancias en condiciones normales a través de todo el tejido vascular, se elaboraron una serie de alteraciones ubicadas al 10% y al 50% de la longitud del nervio central de cada una de las muestras, como se indica en la figura 5, y que después, de forma similar, se sometieron al proceso mencionado. Ello permitió reconocer el mecanismo de adaptación que presenta la red en una situación de interrupción de flujo.

Con el fin de comparar objetivamente el comportamiento del flujo de sustancias en la red, tanto en condiciones normales como al intervenir su estructura, se definieron las variables que se presentan a continuación:

- Presencia de alteraciones: existencia en la muestra de alteraciones artificiales elaboradas en puntos específicos y que conducen a un cambio en la dinámica de transporte de sustancias en la red de venación de la hoja.

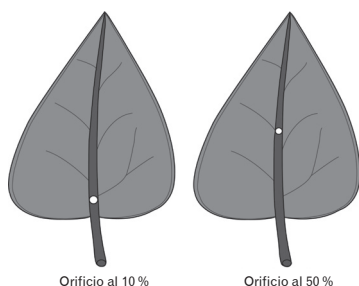


Figura 5. Tipos de alteraciones

- Ubicación del orificio: posición específica dentro del tejido vascular en el cual se encuentra ubicada la alteración. Esta puede ser al 10% o al 50% del nervio central.
- Tiempo de llenado: tiempo total medido en minutos tomado por la muestra para absorber y distribuir la sustancia a lo largo de toda su extensión, partiendo desde la base hasta su punta.
- Trayectoria: reúne la serie de rutas y nervios utilizados por la hoja para realizar el proceso de transporte y distribución de nutrientes.

Resultados y discusión

En primera instancia se pudo identificar que el sistema de venación de las hojas de la *Epipremnum aureum* se encuentra conformado por dos diferentes estructuras en su interior. Su estructura principal es una red ramificada bidimensional de tipo fractal y su estructura interna es una red dendrítica con características similares a una de tipo Voronoi (fig. 6). Esta configuración genera un conjunto de circuitos cerrados que permiten que el flujo de sustancias tome diferentes caminos en caso de alguna alteración.⁷ La manera en que se configuran e interconectan estos dos modelos de redes difiere de una especie de plantas a otra;⁸ sin embargo, todas se estructuran en circuitos cerrados (fig. 7). A diferencia de las redes viales, donde los ángulos rectos son un patrón común, en las redes biológicas las rutas se configuran desde un modelo jerárquico que combina diferentes patrones geométricos que no usa los ángulos rectos, de manera que optimiza el flujo de nutrientes, aun en condiciones que alteren el recorrido.

Se evidenció la presencia de una serie de partes estratégicas organizadas de manera jerárquica para la distribución de sustancias en la estructura de la hoja, las cuales dieron lugar a una caracterización anatómica clave durante el proceso de observación (fig. 8): la estructura central o nervio central que parte de la zona distal del peciolo y que va disminuyendo de tamaño a lo largo de su longitud. En el mismo punto en el que el peciolo se convierte en el nervio central o base inician los nervios periféricos,

⁷ Ibíd.

⁸ Price et al., "Leaf Extraction and Analysis".

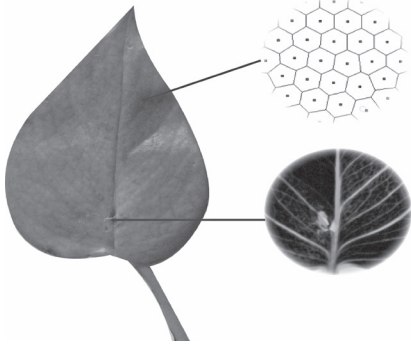


Figura 6. Configuraciones estructurales presentes en la *Epipremnum aureum*

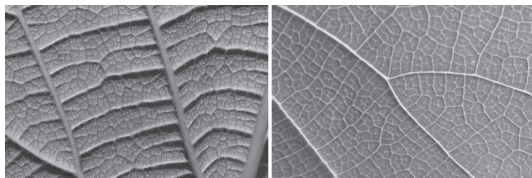


Figura 7. Configuraciones de las redes dendríticas en dos especies de plantas dicotiledóneas

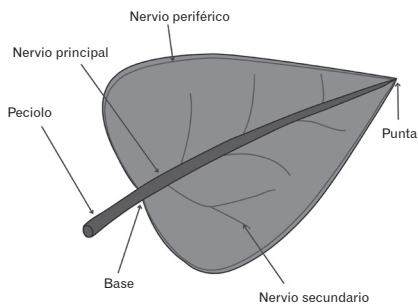


Figura 8. Caracterización anatómica

que son menores en tamaño al central y se visualizan como simétricos respecto al nervio principal. Los nervios secundarios componen la red ramificada fractal que se divide secuencialmente desde el nervio central hasta llegar al nervio periférico. Dentro de cada uno de los espacios dejados por las ramificaciones de los nervios secundarios se configuran las redes dendríticas que interconectan todo el sistema. Tanto el nervio central como los nervios periféricos terminan en la punta de la hoja.

Por otra parte, y de forma concreta durante el proceso de experimentación, se evidenciaron grandes diferencias entre el comportamiento de las muestras

en condiciones normales y aquellas que cuentan con algún tipo de alteración, entre las cuales es pertinente mencionar las siguientes:

Las muestras que no presentan ningún tipo de alteración llevan a cabo un proceso de llenado de forma estructurada y secuencial: se llena primero el nervio central y, posteriormente, los nervios secundarios, terciarios y el periférico (fig. 9). La zona basal de la lámina de la hoja se empieza a llenar por completo más rápido que la zona distal cercana a la punta. Esto da cuenta de un modelo jerárquico de funcionamiento en el cual el orden de llenado de cada una de las partes obedece a la presión interna en los conductos.

Por el contrario, las muestras que presentan algún tipo de alteración, tanto la realizada al 10% como al 50% de la longitud de la hoja, hacen un uso relativamente rápido de los nervios periféricos como rutas alternas principales para continuar el proceso de llenado (fig. 10). En las muestras sin alteración, este nervio solo se ve lleno cuando los demás elementos del sistema se han llenado. Además, en presencia de una alteración, el nervio central se llena primero que los demás, como lo muestra la figura 11.

La presencia de un orificio ubicado ya sea al 10% o al 50% de la longitud de la hoja implica un proceso de llenado más rápido del nervio central cuando se compara con una muestra sin alteración. En la muestra con alteración al 10%, el nervio central toma un tiempo 37% menor para llenarse; mientras que en la muestra con alteración al 50%, el nervio central toma un 26% menos de tiempo para llenarse.

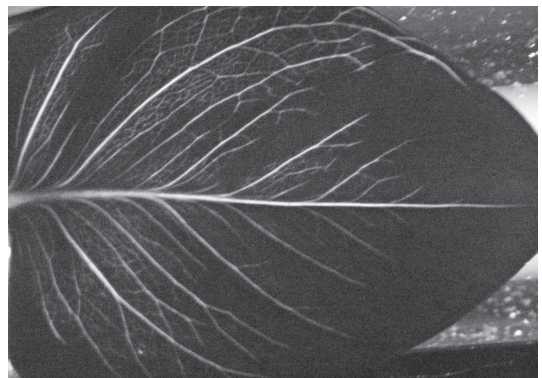


Figura 9. Llenado de muestra sin alteraciones

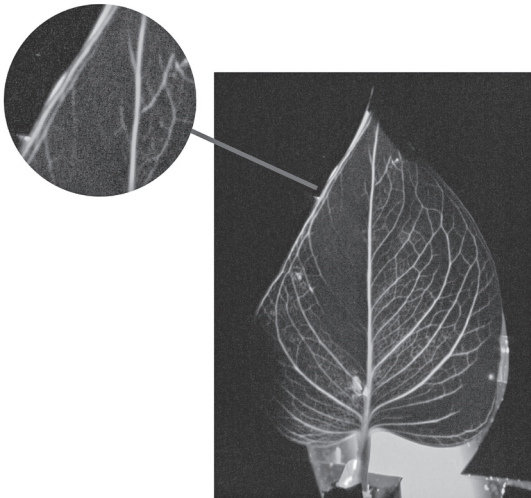


Figura 10. Llenado de muestra con alteraciones que evidencia el uso de los nervios periféricos como ruta alterna



Figura 11. Derecha: nervio periférico lleno primero que los demás nervios. Izquierda: nervios secundarios y periférico llenos luego del central

Contrario a esto, en los nervios secundarios la presencia de dicha alteración en las muestras implica un retardo en su proceso de llenado. En la muestra con alteración al 10%, el tiempo de llenado fue un 21% mayor, y en la muestra con alteración al 50% el tiempo de llenado fue 39% mayor. Esto podría significar que la hoja usa las redes dendríticas cercanas a la alteración para distribuir el flujo de manera que rápidamente pueda volver a encausarse en la vía principal.

Conclusiones

Las plantas evolucionaron de manera que el sistema de venación de sus hojas fuera capaz de adaptarse

ante la presencia de alteraciones drásticas generadas por insectos, semillas que caen o factores ambientales como el granizo, que impidieran el normal suministro de fluidos. El sistema vascular de la hoja de la *Epipremnum aureum* reacciona de manera inmediata ante una alteración drástica de su estructura sistémica, usando vías alternas que abren y cierran circuitos de movimiento adicionales. Con esto, propicia que el movimiento interno de los fluidos se dé en los nervios periféricos y secundarios como apoyo de comunicación y garantiza el suministro de líquido a la totalidad de la hoja. Además, la disminución del tiempo de llenado del nervio central de la hoja manifiesta que la planta mejora sus condiciones de flujo ante la presencia de una alteración. Estos hechos, asociados a la manera como se organiza jerárquicamente el sistema, pueden compararse con el trazado vial de una ciudad, por lo que es probable que el uso de este modelo geométrico en el diseño de una maya vial genere una alternativa para el manejo del flujo vehicular urbano cuando en este se presente una alteración.

Es posible afirmar que una malla vial urbana cuya configuración se base en la combinación de una red ramificada bidimensional de tipo fractal como estructura principal interconectada con una red dendrítica con características similares a una de tipo Voronoi —que rellene los espacios entre las ramas de la red principal y en la que se mantengan las relaciones entre los tamaños de cada una de las vías de transporte— podría dar pie para que el estancamiento de vehículos automotores —provocado por acción del aumento de flujo en las horas pico o por la presencia de una interrupción súbita de la vía— disminuya en función de la posibilidad que tendrían los vehículos para usar vías alternas de circulación que liberen el espacio.

Esta conclusión no tiene en cuenta factores como la eficiencia urbanística que se tendría en los espacios que esta red permitiría o variables como la semaforización de la malla vial; sin embargo, establece un cambio total del paradigma del trazado vial actual. Ello podría significar una oportunidad de innovación social, en términos del mejoramiento de la movilidad.

La observación objetiva de la naturaleza y, con ella, la interpretación de sus modelos y principios de funcionamiento —en términos por medio de los cuales

el diseño pueda acercarse— posibilitan el planteamiento de proyectos que mejoren las condiciones actuales de la artificialidad humana, al darse por hecho que todo sistema natural no es más que el resultado de una serie de interacciones entre lo interno y lo externo a través de millones de años. Según lo anterior, se establecen las líneas de trabajo futuro que se desprenden de los resultados de este proyecto. Dentro de ellas se presenta como una de las principales el escalado de los patrones geométricos encontrados hacia un tamaño en el cual se puedan relacionar no solo las condiciones del flujo vehicular, sino factores como las redes de servicios, los peatones y las construcciones civiles que dependen, en última instancia, de los trazados de la malla vial. Con esto se esperaría ratificar que la abstracción de las trayectorias usadas por las plantas dicotiledóneas en la distribución de los fluidos en sus hojas representa una oportunidad real de mejoramiento urbano.



Bibliografía

Biomimicry-Institute. "Vein System Resilient to Damage: Plants", 2011. <http://www.asknature.org/strategy/d41a93a6b006f4c35fe85df5ba37059f>.

Bohn, S., B. Andreotti, S. Douady, J. Munzinger, y Y. Couder. "Constitutive Property of the Local Organization of Leaf Venation Networks". *Physical Review E* 65, no. 6 (2002). DOI: 10.1103/PhysRevE.65.061914.

Katifori, Eleni, Gergely J. Szöllösi, Marcelo O. Magnasco. "Damage and Fluctuations Induce Loops in Optimal Transport Networks". *Physical Review Letters* 104, no. 4 (2010): 1-4.

Otto, Frei y Bodo Rasch. *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*. s. l.: Axel Menges, 1996.

Price, Charles A., Olga Symonova, Yuriy Mileyko, Troy Hilley y Joshua S. Weitz. "Leaf Extraction and Analysis Framework Graphical User Interface: Segmenting and Analyzing the Structure of Leaf Veins and Areoles". *Plant Physiology* 155, no. 1 (2011): 236-245. DOI: 10.1104/pp.110.162834.

Roth-Nebelsick, Anita, Dieter Uhl, Volker Mosbrugger y Hans Kerp. "Evolution and Function of Leaf Venation Architecture: A Review". *Annals of Botany* 87, no. 5 (2001): 553-566. DOI: 10.1006/anbo.2001.1391.

Sistema de Información Territorial de la Alcaldía de Medellín. "Mapas protocolizados ajustados según Resolución 619 de 2009", <http://poseidon.medellin.gov.co/MapasProtocolizados/MapasResolucion.html>

Vincent, Julian, Olga A. Bogatyreva, Nikolaj R. Bogatyrev, Adrian Bowyer y Anja-Karina Pahl. "Biomimetics: Its Practice and Theory". *Journal of the Royal Society Interface* 3 no. 9 (2006): 471-482. DOI: 10.1098/rsif.2006.0127.