

Del Conectoma Humano, al Conectoma Verde Urbano

From the Human Connectome to the Urban Green Connectome

Eunice María Avid Nava

Fernando Noel Winfield Reyes

Fecha de recepción: 18/05/2022

Fecha de aceptación: 24/06/2022

DOI: <https://doi.org/10.25009/rua.14i28.166>

Resumen

El presente ensayo emerge del trabajo de investigación doctoral "Redes verdes urbanas como conectoma para la resiliencia climática. Modelo de Evaluación Sistémica", considerando campos disciplinares como el verde urbano, la conectómica y la resiliencia, vinculados a su comprensión desde el enfoque sistémico, la evaluación urbana, los sistemas de información geográfica y la ecología del paisaje, entre otros afines.

La parte que aquí se desarrolla, es la premisa de las redes verdes urbanas entendidas como conectoma, mediante las aportaciones detectadas en el campo de las neurociencias, que facilitan la comprensión de la diversidad de escalas, la multimodalidad de conexiones, patrones y estructuras que pueden observarse en el cerebro, así como en la ciudad; del conectoma humano o mapa de conexiones cerebrales, al conectoma urbano para comprender la ciudad, como ejemplo de urbanismo transdisciplinar.

Palabras clave: Transdisciplina, Conectoma, Verde Urbano.

Abstract

This essay emerges from the doctoral research work "Urban green networks like connectome for climate resilience. Systemic Evaluation Model", considering disciplinary fields such as urban green, connectomics and resilience, linked to its understanding from the systemic approach, urban evaluation, geographic information systems and landscape ecology, among other related.

Keywords: Transdiscipline, Connectome, Urban Green.

Introducción

La relación de las neurociencias con el estudio de la ciudad, ha producido el traslado de conocimientos y procedimientos para tratar de descifrar el conectoma urbano, o mapa de conexiones y patrones de la ciudad. Estas aplicaciones son consideradas en el modelo de evaluación sistémica de las redes verdes urbanas en su comprensión como conectoma, visualizando su aportación a la resiliencia climática.

La exploración teórica de las neurociencias para esta investigación, abarca desde una introducción a las aportaciones de este campo disciplinar, concerniente a la visión epistémica de la neurociencia y su participación transdisciplinar en las ciencias de la complejidad con el enfoque sistémico; además de la contribución referida a la neurocultura, concepto relacionado a cómo la cultura derivada del conocimiento del cerebro, se está extendiendo a diversos ámbitos de estudio.

La revisión de los conceptos conectivismo, conexionismo y conectoma, es un análisis imprescindible para vincularlos con otros campos de estudio, debido a que la noción de conexión y redes, son importantes en la conformación de sistemas. La utilización de los conocimientos del conectoma humano, al vegetal y urbano, tiene una aportación especial para la configuración del modelo de evaluación de las redes verdes, mediante las métricas cerebrales.

Se describe, una parte importante de los procesos metodológicos para identificar el conectoma verde urbano en una zona de estudio. Con la finalidad de mostrar los avances actuales de la investigación, la utilización de ciertos procedimientos al campo urbano, así como los futuros caminos por recorrer, considerando incluso el surgimiento de nuevos saberes.

Como se observará en el desarrollo de los siguientes subtemas, la relación de conceptos vinculados al campo de las neurociencias y sus aplicaciones en diversas disciplinas, pone de manifiesto los nuevos paradigmas del siglo XXI ante el abordaje integral de nuevas visiones en una frontera transdisciplinar.

El enfoque sistémico y la transdisciplina

Debido a las interconexiones globales en las que se manifiestan diversos fenómenos disciplinares, se plantea la necesidad de considerar perspectivas sistémicas y ecológicas, como nuevos paradigmas, donde podamos acercarnos al conocimiento. Es necesaria entonces una visión holística, considerando que el conocer, es "siempre aprender un dato, de una cierta función, bajo una cierta relación, en tanto significa algo dentro de una determinada estructura... si el conocimiento se entiende como articulación de toda una estructura epistémica, nada ni nadie puede ser eximido" (Martínez, 2012, p. 228).

La ciencia colapsa, cuando se trata de estudiar entidades conformadas por relaciones, donde no basta con la observación, descripción y estudio de las partes por las que está compuesto, en este sentido solo se intenta

distinguir, diferenciar y clasificar. En cambio, cuando se trata del estudio de las relaciones entre elementos “es necesario preguntarse por aquello que los une y los mantiene como un todo. ¿Qué es lo complementario a cortar, diferenciar, distinguir, separar y reducir?” (Garcíandía, 2011, p. 23), en este caso, en lugar de distinguir, sería identificar, que significa mirar que tienen de igual un objeto con relación a otros, en lugar de separar o fusionar, sería conectar.

La sistémica enfatiza el juntar, unir y buscar conexiones. Se podrían plantear preguntas como: “¿Qué es aquello que conecta?, ¿Cuáles son los elementos conectores?, ¿Cuáles son las relaciones, las estructuras y organización entre los diferentes elementos de un grupo y que flotan en el vacío del espacio que los separa?” (Garcíandía, 2011, p. 24). Los cuestionamientos que plantea la sistémica, se enlazan a esta investigación, donde un punto fuerte visualizado desde las neurociencias, tiene que ver con los enlaces y sus conexiones, cómo se producen, cómo funcionan y cuáles son sus estructuras.

Considerar un enfoque sistémico dentro de la transdisciplina, (Martínez, 2007) es indispensable, ya que se trabaja con estructuras de corte dinámico, que no contienen elementos homogéneos.

El pensamiento sistémico “comporta además un cambio de la ciencia objetiva a la ciencia epistémica, es decir se tiene en cuenta la posición personal del sujeto investigador, como el físico tiene en cuenta la temperatura previa del termómetro que usa” (p. 7).

En el análisis de Enrique Luengo (2018), sobre la diversidad creativa del paradigma de la complejidad, plantea que, a partir de las distintas visiones o aproximaciones del pensamiento sistémico, han aparecido nuevos desarrollos, tales como: “el comportamiento colectivo, las redes, la evolución adaptativa, la formación de patrones, la teoría sistémica y la dinámica no lineal” (p.p. 92-95), y desde luego una conexión desde la complejidad hacia los nuevos paradigmas del siglo XXI.

Una razón de peso para mencionar un enfoque sistémico es debido a que “la sistémica es el arte de ver, averiguar y especialmente reconocer conexiones entre las entidades observadas” (Garcíandía, 2011, p.20). Las redes verdes urbanas, su influencia en la resiliencia climática y su vínculo con la neurobiología desde el conectoma, hace latente la necesidad de estudiar, analizar y reconocer las conexiones entre las variables mencionadas.

Neurocultura. La transdisciplina de la neurociencia

Explorar los saberes del cerebro, genera un abanico de conexiones de conceptos, así como de inspiraciones biológicas. No por nada su estudio se ha convertido en todo un proyecto global, para descifrar sus misterios y obtener la clave para resolver múltiples problemas humanos. El Neurocientífico Francisco Mora propone el concepto de Neurocultura, que publicaría para 2014 en un libro con el mismo nombre, definiéndola como: “una cultura basada en los conocimientos que aportan las ciencias del cerebro” (p. 30), este paradigma podría reconfigurar nuevas formas de pensar, de hacer cambios en los estilos de vida, así como de la infinidad de estructuras que establecen las tendencias del momento.

En su libro le dedica un apartado especial dentro del Neuroarte a la Neuroarquitectura, surgida en 2003, en la universidad de California, en San Diego, donde arquitectos y neurocientíficos se reunieron para discutir la relación, entre la actividad cerebral y el proceso creativo del arte, en el diseño de casas y edificios. De esta reunión surgió el ANFA, The Academy of Neuroscience for Architecture, como un Capítulo Verde de la AIA. Una de las

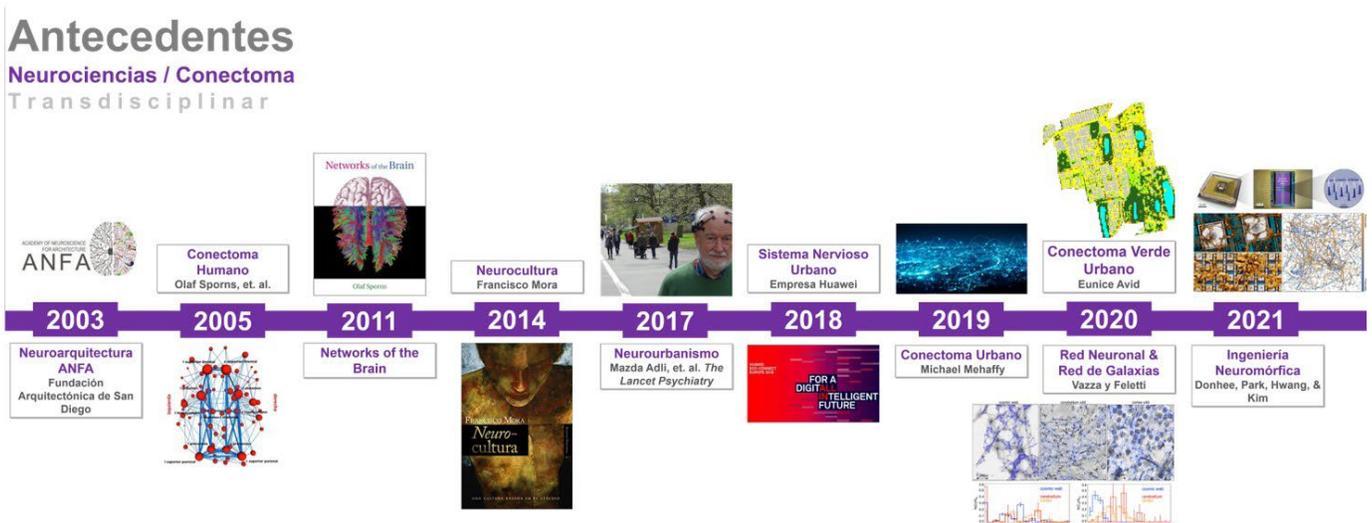


Figura 1. Antecedentes de aportaciones transdisciplinares desde las neurociencias. Elaboración propia. Fecha de aceptación: 26/11/2021

premisas principales es “¿cómo percibe el cerebro humano la arquitectura?” (Mora, 2014, p. 326). Así mismo algunos otros cuestionamientos sobre “¿cómo los ambientes arquitectónicos creados por el hombre influyen en su pensar y sentir?... ¿cómo puede contribuir el conocimiento de cómo procesa el cerebro nuestra percepción del espacio, influir en el futuro de la práctica de los arquitectos?” (Mora, 2014, p. 327), este antecedente fincado en las percepciones sensoriales, es una visión inicial de una aportación de frontera.

Como parte de la misma neurocultura efervescente, en 2017, The Lancet Psychiatry, publica Neurourbanism: towards a new discipline, donde Mazda Adli, junto con 13 autores más, describen cómo la vida urbana y el bienestar mental, se encuentran conectados de múltiples formas, de ahí la importancia de generar grupos de investigación que integren neurociencias, planeación urbana, arquitectura, sociología, psicología, entre otros, para mejorar la salud de los habitantes en las ciudades, con un crecimiento global acelerado. Si bien este acercamiento es a nivel perceptivo, sobre la salud mental urbana, es un precedente de la importancia del estudio del cerebro y la ciudad.

Otro enfoque, es cuando comenzamos a relacionar los sistemas biológicos, como el nervioso en el ser humano, con sistemas urbanos. Con sus elementos clave, como son el propio cerebro, la red nerviosa y sus células motoras. En su publicación Incógnito, David Eagleman (2011), neurocientífico de la Universidad de Stanford, plantea que las células neuronas de nuestro cerebro, pueden ser tan complicadas como una ciudad.

Varios científicos y tecnólogos de la actualidad, vinculan de manera inmediata al sistema nervioso y las redes neuronales, con sistemas

computacionales o de comunicaciones; en el 2018, la empresa Huawei dentro del encuentro internacional realizado en Roma: eco-Connect Europe, lanzó la idea de un “sistema nervioso urbano para las ciudades inteligentes” (eSmartCity, 2018), planteando que el futuro digital de las Smart cities se basa en la comprensión del sistema nervioso humano. Si la tendencia en el mundo de la tecnología camina por entender al sistema nervioso como la analogía perfecta para las redes globales de comunicación, porque no igualarlo en su calidad sistémica a las redes verdes urbanas en la ciudad.

Michael Mehaffy (2019a), publica Wonders of the urban connectome, análisis en el que establece las similitudes entre las ciudades y el cerebro, coincidiendo en su conformación como grandes redes de patrones conectados. Donde las ciudades bien conectadas son capaces de autoorganizarse, volviéndose más inteligentes en su habilidad para propiciar vitalidad urbana. En contraposición una ciudad pierde conocimiento al fragmentarse o expandirse.

En noviembre de 2020, se publica el artículo The quantitative comparison between the neuronal network and the

cosmic web en la revista Frontiers in Physics, sus autores, el astrofísico Franco Vazza y el neurocirujano Alberto Feletti, investigaron las similitudes entre 2 de los sistemas más complejos, mediante un análisis cuantitativo, a través de simulaciones de la red cósmica de galaxias, y la red de células neuronales, con secciones de la corteza cerebral y el cerebelo.

Este estudio explora las propiedades estructurales y morfológicas de la red, así como la capacidad de memoria, con un enfoque cuantitativo. Por tanto, para obtener un análisis, el procedimiento considera una aproximación de la verdadera conectividad neuronal, basada en proximidad. Los resultados sugieren que la autoorganización en ambos sistemas está siendo moldeada por principios similares a la dinámica de redes, a pesar de las escalas y procesos radicalmente diferentes (Vazza & Feletti, 2020).

Una parte interesante del estudio, es la utilización de simulaciones, la comparación morfológica, el análisis espectral y de redes, que, en similitud, se realiza para la ciudad, por ejemplo, en el proyecto Redes Verdes Urbanas como Conectoma, donde se consideran en el Sistema de Información Geográfica, el

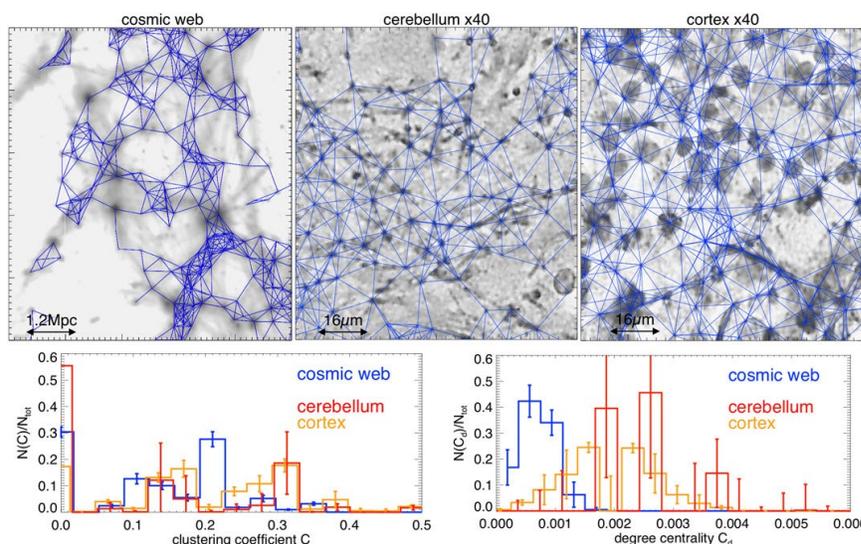


Figura 2. Comparativa de la red neuronal y la red cósmica. Tomado de Vazza & Feletti, 2020.

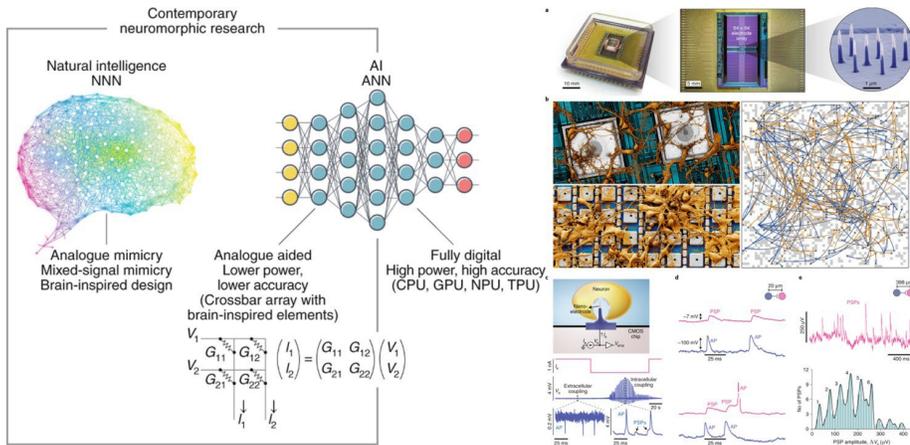


Figura 3. Creación de chips neuromórficos. Tomado de Donhee, Park, Hwang, & Kim, 2021. Fecha de aceptación: 26/11/2021

uso de imágenes multispectrales, así como las comparaciones estructurales y funcionales de conectividad en la red.

Otra exploración de influencia biológica, es la ingeniería inversa del cerebro, en septiembre del 2021 se publica el artículo Neuromorphic electronics base on copying and pasting the brain, en la revista Nature electronics, los autores explican que al revisar los enfoques actuales de la ingeniería neuromórfica, buscaron proporcionar una visión que devuelve su objetivo original: copiar el mapa de conectividad sináptica funcional de una red neuronal, utilizando herramientas avanzadas de neurociencia.

Se podría entonces conducir a circuitos que aproximen los rasgos informáticos del cerebro, como la baja potencia, el aprendizaje fácil, la adaptación e incluso la autonomía y la cognición (Donhee, Park, Hwang, & Kim, 2021). Este siendo un esfuerzo de investigadores de Harvard, en vínculo con Samsung Electronics, para obtener lo que sus autores llaman chips neuromórficos o matriz de nanoelectrodos. Las aplicaciones del conocimiento del cerebro son infinitas, sin importar las escalas, se detectan similitudes estructurales y funcionales, así como en los procesos de análisis. Al parecer

mientras más se aprende del cerebro humano, más respuestas obtenemos para los problemas planteados desde diversos campos disciplinares.

Conectivismo, conexionismo y conectoma

Tres conceptos, separados por tres siglos, en los cuales se ha podido aprender la importancia de las conexiones y sus diversas aplicaciones, en este caso desde el campo de las neurociencias. Para 1874, Karl Wernicke propuso una nueva teoría de la función cerebral llamada conectivismo. En la cual planteaba que “solo las funciones más básicas se limitan a determinadas zonas cerebrales, mientras que funciones

complejas, son el resultado de la interacción de varias zonas localizadas” (Vélez, 2019). El principio de la función localizada, en el marco conectivista, indicaba que diferentes aspectos de una misma función, son procesados en diferentes lugares del cerebro. Esta noción se conoce actualmente como procesamiento distribuido (Díaz, 2014).

El conexionismo por su parte, fue iniciado entre 1940 – 1965 por Frank Rosenblatt y Oliver Selfridge, entendiéndolo como una “aproximación a la modelización de sistemas cognitivos que utiliza redes formadas por unidades de procesamiento simples, inspiradas en la estructura del sistema nervioso” (Audi, 2004, p. 192). Existe una variedad de disciplinas que utilizan las redes de tipo conexionista, tales como: la psicología, la inteligencia artificial, la neurociencia y la física. Los modelos conexionistas, muestran también una “característica que exhibe el cerebro... cuando las unidades o conexiones son eliminadas, o cuando la capacidad del sistema es superada, su eficacia disminuye con agilidad, en vez de romperse por completo” (Audi, 2004, p. 192).

En el 2005, un equipo de científicos liderados por Olaf Sporns, publican The Human Connectome, a structural description of the human brain, en

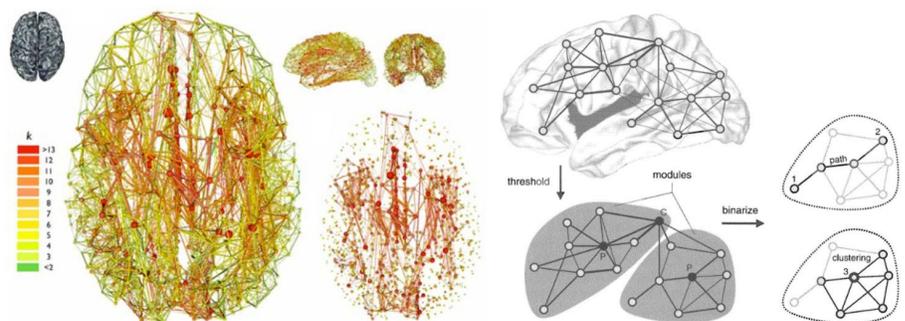


Figura 4. Red estructural cerebral, la organización del conectoma humano y aplicación de conceptos básicos de la teoría de grafos. Tomado de Sporns, 2011 y 2012. Fecha de aceptación: 26/11/2021

su artículo explican que la matriz de conexión del cerebro humano o conectoma humano, representa una plataforma para la investigación básica y aplicada de la neurobiología. Más, sin embargo, la red de conexiones anatómicas que conectan los elementos neurales del cerebro humano, sigue siendo grande y desconocida.

Del conectoma en neurociencia, al conectoma en urbanismo

El conectoma humano representa un elemento indispensable para la investigación en neurobiología básica y aplicada, entendiendo el cerebro como una red compleja. Las redes cerebrales están organizadas en múltiples escalas y dan forma a los patrones de la dinámica neuronal. La ciencia de redes ofrece un marco teórico para el estudio del sistema nervioso. El conectoma es una descripción completa de la conectividad cerebral: un conjunto de datos fundamental, que informará el diseño global de los modelos computacionales del cerebro humano (Sporns, Tononi, & Kötter, 2005).

El complejo patrón de conexiones neuronales es observado en el ser

humano desde su nacimiento, y va cambiando conforme se generan nuevos aprendizajes o se experimentan nuevos contextos. Mehaffy (2019b) afirma que importa sustancialmente la totalidad de patrones y formas en que se conectan o desconectan las diversas partes del cerebro, propiciando nuevas ideas, imágenes y patrones. A su vez Steven Johnson (2001) en su libro *Sistemas Emergentes*, menciona que existen razones para pensar que al igual que los cerebros, mucho de lo que sucede en las ciudades tiene que ver con el patrón general de conexiones y menos con elementos particulares: "Tanto los cerebros como las ciudades hacen algo más que conectar, porque la inteligencia requiere tanto conectividad, como organización... Las ciudades se organizan en barrios o en ciudades satélites, las conexiones neuronales de nuestros cerebros desarrollan regiones extraordinariamente especializadas" (p. 105).

Mientras más patrones de conexiones se puedan formar y reformar vías neuronales, en el cerebro de una persona, ésta podrá recordar y aprender.

En el caso de las ciudades, se tendría que asegurar que estén bien conectadas y transitables, lo que facilitaría muchas conexiones cruzadas. Este patrón de conexión cruzada neuronal, en el caso del cerebro, es la clave para la formación de la conciencia, donde sus diferentes partes se unen en un sistema mayor y el resultado es un sistema autoorganizado, que es más inteligente y consciente (Mehaffy, 2019b).

En un enfoque general con el interés de mapear los patrones urbanos característicos y propicios para proporcionar vitalidad y capacidad de autoorganización urbana, un equipo de trabajo liderado por Mehaffy y en asociación con ONU-Hábitat, se encuentran desarrollando un "Nuevo lenguaje de patrones por regiones de crecimiento" (2020), tomando como antecedente la aportación de Christopher Alexander de "Un lenguaje de patrones (1977)", la intención es capturar ciertas características del conectoma urbano, que podrían ser: redes de circulaciones, paisajes urbanos transitables, grupos de elementos, y muchos más patrones.

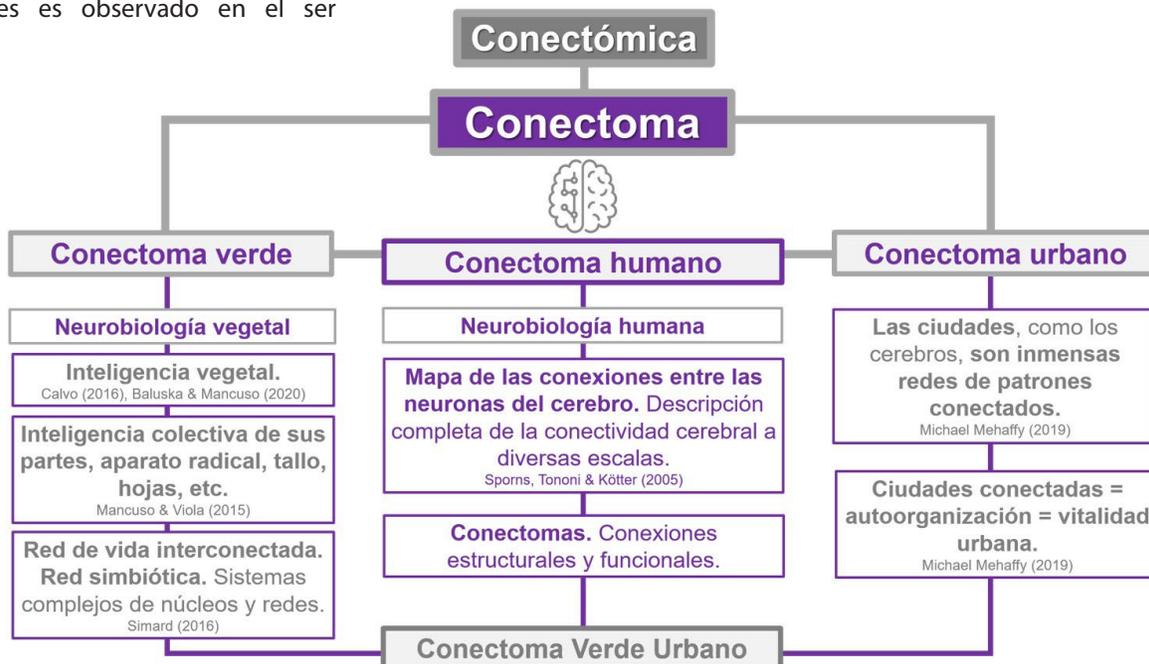


Figura 5. Esquema de aportaciones transdisciplinares desde el conectoma. Elaboración propia. Fecha de aceptación: 26/11/2021

La red cerebral, vegetal y urbana

En las bases de la neurobiología humana, se han obtenido principios clave para conceptualizar la importancia de las conexiones y conformación de redes complejas como sistemas. Desde la definición del conectivismo y conexionismo, se planteaba las funciones complejas de un sistema, otorgadas por la interacción de la suma de sus partes, así como por sus elevados niveles de interconexión y procesamiento en la conformación de redes.

A su vez, la definición de conectoma humano (Sporns, et al. 2005), plantea la versión más completa del entendimiento cerebral como red compleja, organizada en múltiples escalas y patrones formales, aludiendo a la dinámica neuronal. Esta demostración multiescalar, multimodal y estructural de la red, se puede ver analógada con la red urbana, en este caso con la infraestructura verde.

Si observamos que “las redes complejas son los esqueletos de los sistemas complejos” (Cuenca, 2017, p.11), el cerebro siendo un sistema complejo, puede ser estudiado como una red compleja, la cual está formada por un

gran número de regiones cerebrales, teniendo cada una su función, e información que entre ellas comparten. Recordando que las redes cerebrales se describen en micro, meso y macro escala, así mismo, dependiendo también del tipo de conectividad y de escala, los nodos y enlaces pueden simbolizar diferentes partes del cerebro.

En el mundo vegetal, de igual forma se observan las mismas propiedades complejas y emergentes, en este caso, comunes de los superorganismos; en relación al comportamiento adaptativo, las plantas evidencian también lo que se conoce como inteligencia de enjambre (sistemas autoorganizados), que les permite comportarse, no como un individuo sino como una multitud y manifestar comportamientos grupales (Mancuso & Viola, 2015).

Un punto importante a destacar es el reconocimiento de la red simbiótica o red de vida interconectada que representan las plantas, de acuerdo

con Simard (2021), conforman sistemas complejos de nodos y enlaces, y algunos de ellos llegan a ser nodos centrales o arboles madre de la red. Las plantas se comunican a través de sus raíces mediante agentes químicos. A su vez los ápices de las raíces también se comunican con las micorrizas y organizan redes integradas de raíces y hongos (Simard, 2016). Más del 90% de todas las plantas, forman estas redes simbióticas, que mejoran la nutrición, además de mejorar el rendimiento de las plantas bajo estrés y permitir que entre ellas compartan mensajes y señales con plantas vecinas (Baluska & Mancuso, 2020).

Del conectoma urbano, se comprende que las ciudades, son redes de patrones conectados (Mehaffy, 2019a), que dan por resultado autoorganización y la búsqueda de la vitalidad urbana. El vínculo red verde urbana tiene lógica desde la visión del funcionamiento y dinámica vegetal a nivel neurobiológico. Esto hace posible conformar un conectoma verde urbano, donde la parte estructural de nodos y enlaces, equipara el funcionamiento en comunidades, así como de caminos o corredores, donde entre más conexiones existan, más se enriquece el sistema. En este

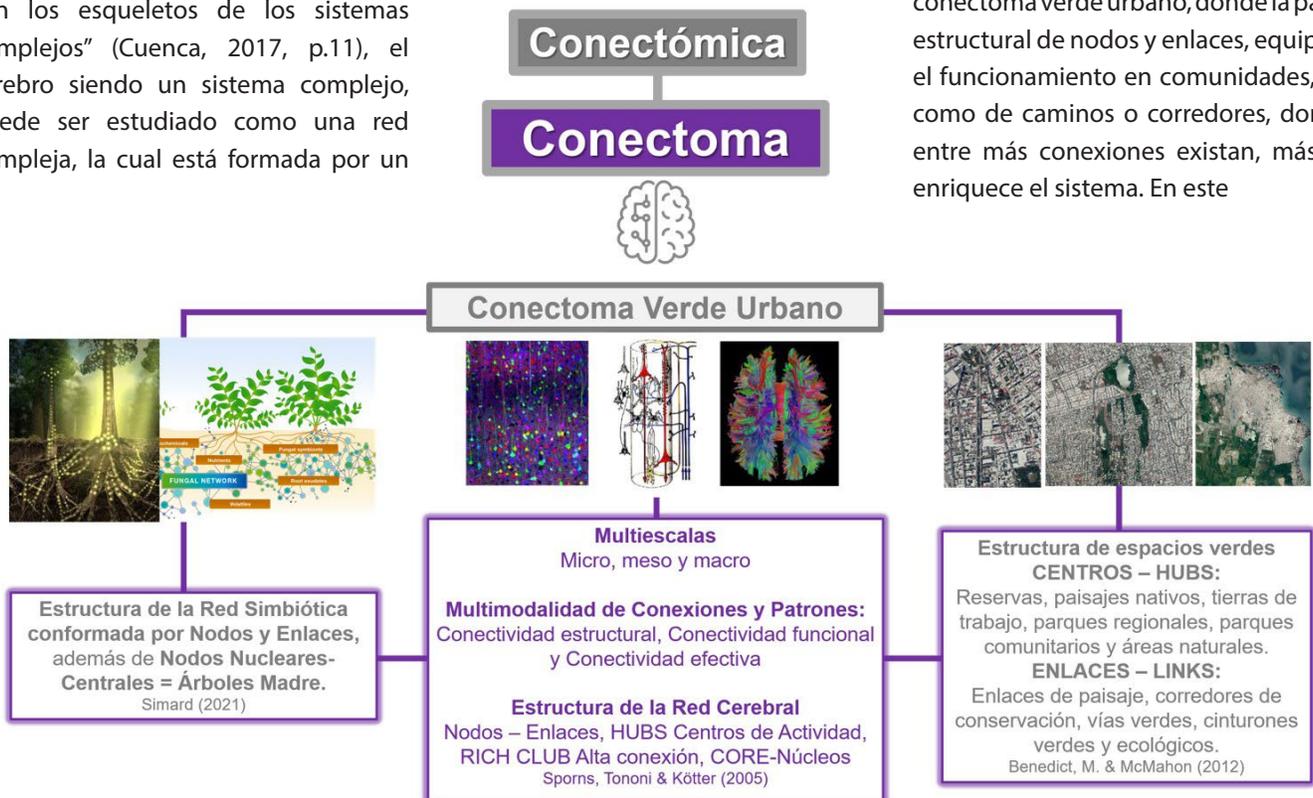


Figura 6. Correlación de conceptos que forman el conectoma verde urbano. Elaboración propia. Fecha de aceptación: 26/11/2021

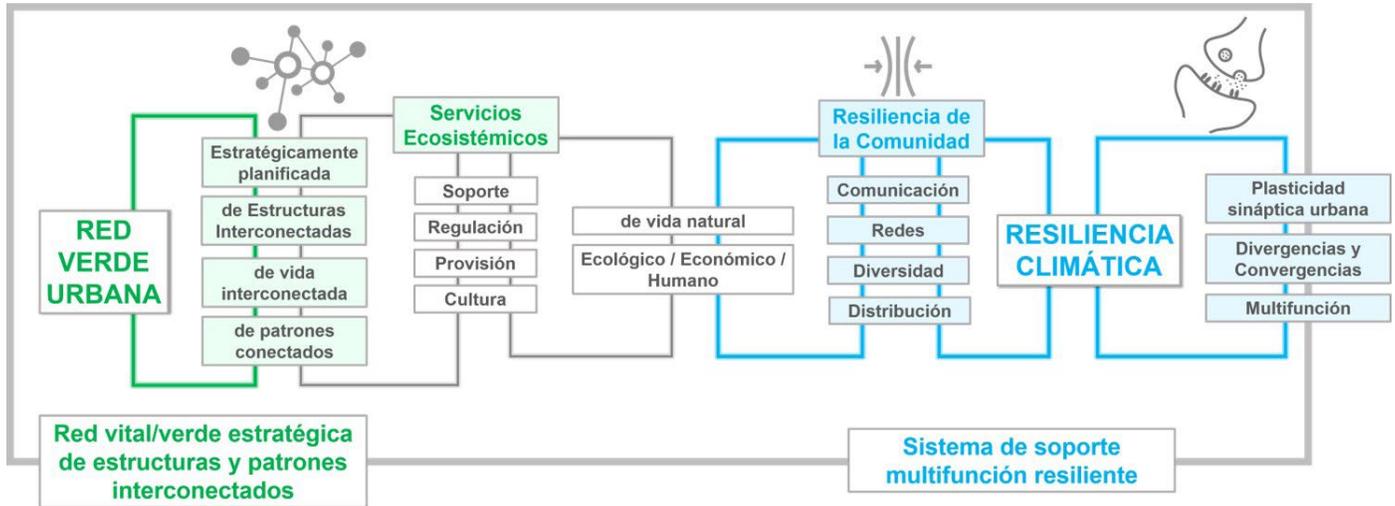


Figura 7. De la red verde estratégica, al sistema de soporte multifunción resiliente. Elaboración propia.

caso se buscaría el enriquecimiento del ecosistema natural-urbano.

Plasticidad sináptica e inteligencia colectiva vegetal

Los sistemas biológicos cerebral y vegetal, cuentan con determinadas funciones complejas para afrontar problemas, reestablecerse y continuar, incluso evolucionar. En investigaciones recientes, se ha determinado que la clave de la resiliencia cerebral está en la plasticidad sináptica, definida como el “aumento o disminución de la cantidad de sinapsis... dependiendo de la eficiencia funcional y activaciones que tengan”, en sí misma la plasticidad es entendida como los “cambios producidos en el sistema nervioso como resultado de la experiencia” (Mora & Sanguinetti, 2004, pág. 211).

La resiliencia necesita un sistema neuronal altamente plástico y multifuncional, que integre información vital. Montes y Urteaga (2018), concluyen que la resiliencia cerebral no está determinada por una sola estructura neuronal, sino que es producto de una compleja interacción entre sistemas y su plasticidad sináptica asociada.

De igual forma en la ciudad, podríamos hablar de una plasticidad sináptica urbana, si bien en el cerebro existen

sinapsis eléctricas y químicas que tratan de la transmisión de flujos de actividad y comunicaciones precisas. A nivel urbano, podría referirse a las conectividades por actividad que generen un pulso o transmisión, así como por la interrelación de sus elementos. Podrían derivarse en divergencias y convergencias sinápticas (Muñoz, 2021) que, aplicadas a la ciudad, la primera sería cuando la información se transmite a muchos nodos, la segunda, cuando varios enlaces conectan en un mismo nodo. Si la sinapsis es el lenguaje de comunicación entre las neuronas, ¿Cuál es el lenguaje entre nodos y enlaces en la ciudad?, ¿Cuál es el código de comunicación – conexión de las áreas verdes urbanas?

En el caso de las plantas, tienen un agente inteligente que interactúa con el contexto a través de su cuerpo físico. El sistema vegetal funciona a través de la señalización, conteniendo señales eléctricas, hidráulicas y químicas, mediante de un complejo sistema vascular (Mancuso & Viola, 2015). Un elemento clave son las estomas en las hojas y la raíz o aparato radical, que es donde ocurre el intercambio de información, control y gestión de la red compleja. Lo anterior es mencionado ya que, gracias a estas características, las plantas poseen una resistencia pasiva a los ataques externos.

La señalización en las plantas, es comprendida como un intercambio de información, control y gestión de una red compleja (Calvo, 2016), que refuerza la importancia de la infraestructura verde multiescalar, tal cual se analizó en relación a la red cerebral. Debido a que la comunicación de las plantas radica en su capacidad de conexión, así como para conformar sistemas a base de sus raíces, (desde nivel celular), si estas se ven interrumpidas, los sistemas se fragmentan y la continuidad ecosistémica se pierde.

De métricas cerebrales a indicadores urbanos

La aplicación dentro del modelo de evaluación sistémica, se vincula con las métricas utilizadas para analizar los conjuntos de datos de conectividad cerebral, que comprenden redes de regiones conectadas por asociaciones funcionales. De acuerdo con Rubinov y Sporns (2010), el análisis de redes complejas es un enfoque multidisciplinario para el estudio de sistemas complejos, que tiene como objetivo caracterizar estas redes cerebrales con una pequeña cantidad de medidas significativas y fácilmente computables.

De las métricas cerebrales, se obtienen las medidas de red más

Tabla 1. Métricas de evaluación cerebral. Fuente: Elaboración propia, tomado de Rubinov & Sporns (2010) y Sporns (2011).

Sistema de evaluación	Categoría	Indicadores	Descripción
Complex Network Measures of Brain (2010) Networks of the Brain (2011)	Métricas Básicas	Degre / grado.	Número total de enlaces conectados al nodo.
		In-degre.	Número de aristas que entran al nodo.
		Out-degre.	Número de aristas que salen del nodo.
	Métricas de Integración	Path lenght.	Un path es la secuencia de nodos unidos por aristas en la que nunca se pasa por un mismo nodo más de una vez. El path lenght es el número medio de aristas que se deben cruzar para ir del nodo i al resto de nodos de la red.
	Métricas de Segregación	Coefficiente de clustering / agrupamiento de un nodo.	Es una medida del grado en que los nodos de una red tienden a agruparse entre ellos.
		Modularidad	Mide el grado de subdivisión de la red en grupos claramente delineados.
	Métricas de Centralidad	Coefficiente rich club / hubs.	Los hubs son un conjunto de nodos de la red con elevada importancia central en la estructura de la red. Estos nodos presentan un numero de enlaces que excede la media (grado elevado). El rich club implica que los nodos con un elevado grado, presentan una conectividad elevada entre ellos.

comúnmente utilizadas de estructura y funcionalidad. Se describen medidas que detectan la integración funcional y la segregación, cuantifican centralidad de las regiones, caracterizan patrones y prueban la resiliencia de las redes. Esta aportación se vio reflejada en The Brain Connectivity Toolbox, que es una caja de herramientas MatLab para análisis de redes complejas de los conjuntos de datos de conectividad cerebral a nivel estructural y funcional (Rubinov & Sporns, 2010). Algunas de las categorías que se ven reflejadas en el análisis del conectoma verde urbano son: grado, integración, agrupamiento, modularidad y conjunto enriquecido.

Aportaciones derivadas de los estudios de Sporns, publicados en su libro Networks of the brain (2011), afianzan las posibilidades de aplicación de la estructura conectoma, en diversas áreas, considerando su composición estructural, y su evaluación correlacionada a las redes complejas, a través de una métrica de redes (Cuenca, 2017), que permiten caracterizar los aspectos de la conectividad, que se pueden presentar de múltiples formas.

Desde la referencia a elementos individuales como los nodos y los enlaces-bordes-aristas, que reflejan la manera en que están insertados en la red.

La medición de la red compleja cerebral a través de las métricas de redes: básicas, de integración, segregación y centralidad, muestran una variedad de formas para interpretar sus conexiones estructurales, efectivas y funcionales – dinámicas. Esta es una aportación crucial, que podrá verse reflejada en la propuesta para evaluar infraestructura verde urbana, a través del nivel y forma de las conexiones. Estos parámetros a su vez podrían respaldar la conjetura, de que, a mayor conexión verde en el sistema urbano, mayor será su resiliencia climática.

Descifrando el Conectoma Verde Urbano

Para identificar las características del conectoma verde urbano, y realizar un análisis acorde a los indicadores planteados en el proyecto del modelo de evaluación sistémica de las redes

verdes urbanas, se ha tomado por caso de estudio una zona de la Ciudad de Veracruz, México, conocida como el Coyal, que paso por un proceso de selección de muestra, mediante un análisis de matrices de comparación pareada.

Como parte del proceso de selección de muestra territorial, se ha comenzado en primera parte, utilizando los Sistemas de Información Geográfica mediante el software QGis y la plataforma Copernicus Open Acces Hub para la obtención de una imagen multiespectral, que facilite la realización de ciertos procesos, en la búsqueda de las tramas vegetales urbanas. Cabe resaltar que estos métodos principalmente realizados en ámbitos agrícolas, se han estado probando cada vez más en ámbitos urbanos.

Para la extracción de rasgos de identificación de las áreas verdes a través de una imagen multiespectral, se realiza una primera exploración, el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado, NDVI por sus siglas en inglés (Normalized Difference Vegetation Index), (ver

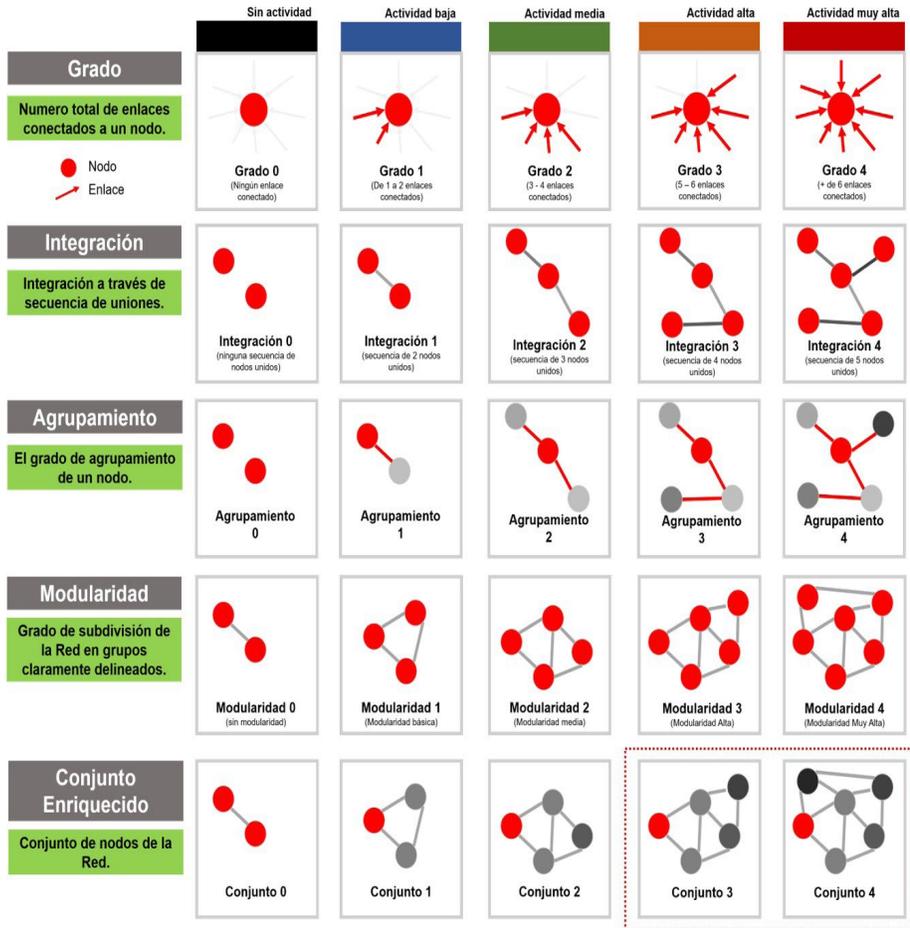


Figura 8. Interpretación gráfica, con base a las métricas cerebrales, donde se destaca el nivel de actividad de las conexiones. Elaboración propia con base en la descripción de las métricas cerebrales de Rubinov & Sporns, 2010.

sección A de figura 9). Este índice de vegetación combina las bandas del espectro electromagnético B4 y B8, detectadas en este caso por el satélite Sentinel 2, “cuya función es realzar la vegetación en función de su respuesta espectral” (Alonso, 2015, párrafo 1).

Las características del NDVI, es que produce una “escala lineal de medición que va de -1 a 1 con el valor de cero, representando el valor aproximado donde empieza la ausencia de vegetación” (Muñoz, 2013, pág. 2). La fórmula del NDVI puede ser resuelta desde el software SIG utilizado, como en el caso de Qgis para este proyecto.

Una vez procesada la imagen con NDVI, se puede resaltar las propiedades verdes de la zona urbana, realizando un proceso de Reclasificación del NDVI.

Con este proceso se obtienen tres rangos, 1 donde no hay vegetación, 2 con vegetación intermedia y 3 con vegetación arbórea. Pueden realizarse posteriormente los cortes de las zonas seleccionadas para estudio por sus características vegetales.

Como parte del geoproceto, se ha planteado pertinente, la clasificación por bandas de la imagen multispectral, en un proceso de análisis por píxeles, para poder visualizar y separar con mayor detalle capas vegetales por estrato y diferenciar así los nodos y enlaces (ver secciones B y C de la figura 9). El proceso inicial es hacer una combinación de capas, al utilizar el satélite Sentinel 2, se consideraron las denominadas blue, green, red, red edge 1, 2, 3, NIR 1 y 2, además de las SWIR 1 y 2. Una vez que se obtiene la

visualización adecuada por bandas de colores, se proceden a capturar Macro Clases y sub clases de temas para clasificar los estratos vegetales, así como los elementos urbanos construidos. Cuando se logra la clasificación que satisface todas las clases contrastadas en el lugar de estudio, se procede a una etapa de vectorización o generación de polígonos, donde se resaltan los rasgos de nodos y enlaces verdes, con el fin de revelar las conexiones en la red (ver sección D de la figura 9).

La siguiente herramienta a utilizar es el software Graphab, dedicado al modelado de redes ecológicas, desde el marco de la teoría de grafos, incluye construcción y visualización de gráficos y análisis de conectividad, siendo compatible con sistemas de información geográfica (Foltête, Clauzel, & Vuidel, 2012). Para este proyecto servirá en la obtención de grafos y su posterior análisis mediante las métricas del conectoma.

Una tercera herramienta, que podría ayudar a interpretar los niveles de conectividad del espacio, sobreponiendo las capas ya encontradas de nodos, enlaces y grafos, es el Space Syntax. Entendido no solo como una plataforma, sino también como una teoría y método, que ha sido de utilidad para investigar y analizar fenómenos multiescala, así como de redes. Esta metodología considera la geometría, interrelación y conectividad, así como la capacidad de los espacios para conectar, considerando la posibilidad de proximidad, lejanía y capacidad de movimiento.

El resultado es un análisis gráfico de visibilidad a través de colores, los Cálidos: representan elementos más integrados, más centrales y los Fríos: elementos más aislados. El análisis de redes, se plantea desde la accesibilidad y la configuración

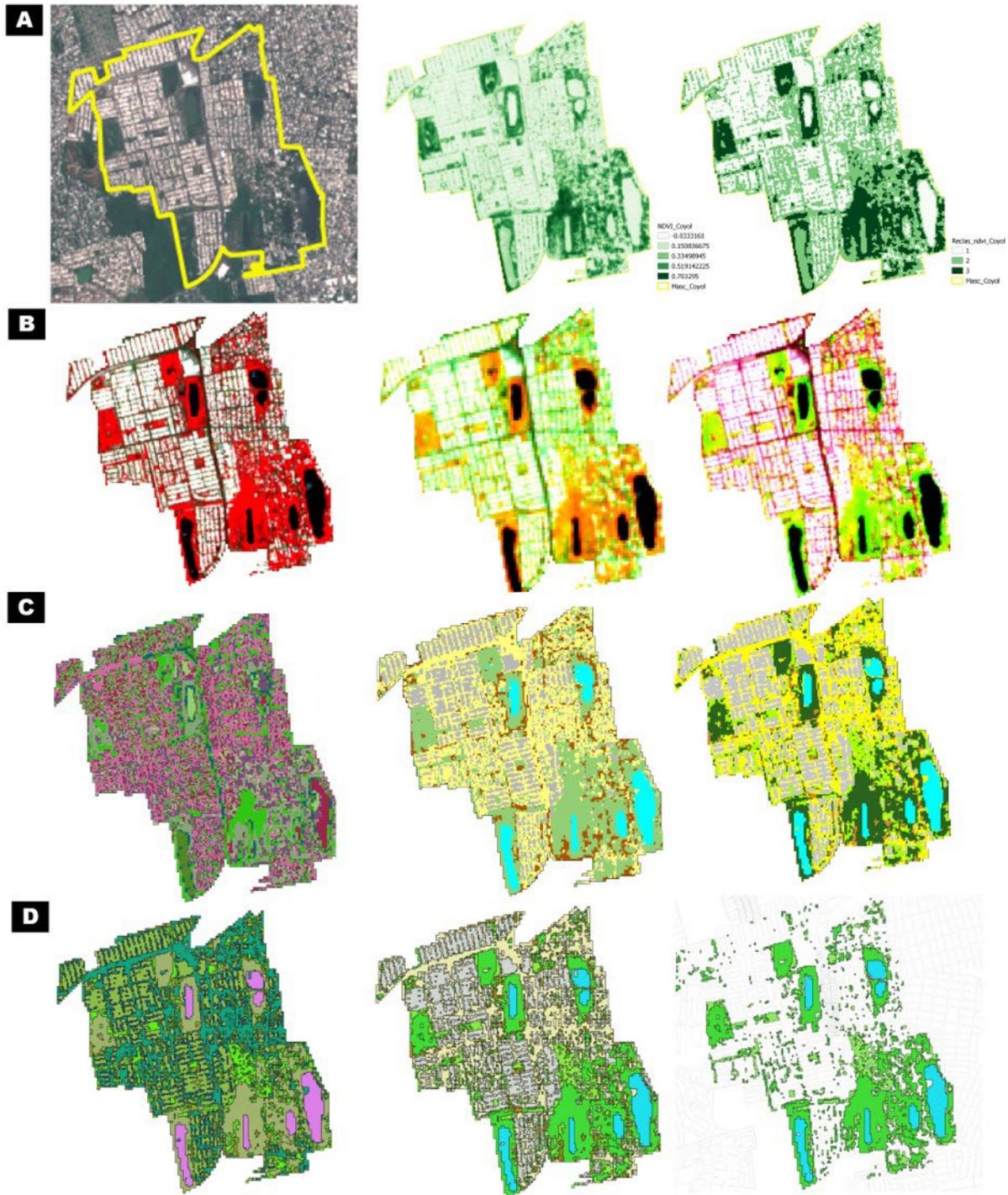


Figura 9. Procesamiento de imagen multispectral, de zona de estudio Coyoil, en Veracruz, México, para el proyecto Redes Verdes Urbanas como Conectoma. Imagen original obtenida de Copernicus Open Acces Hub. Procesamiento realizado en software Qgis.

espacial, en su condición de sistema multi-escala, se aplica desde lo micro (edificios-arquitectura), meso (planes maestros), macro (desarrollos urbanos, estrategias regionales) (Maya, 2017).

Con estos procesos se estaría mapeando y entendiendo la parte de conectividad estructural del conectoma verde

urbano, a la que tendrá que ensamblarse la conectividad funcional. Es la primera parte para poder evaluar la dimensión vinculada a los niveles/grados de conexiones entre nodos y enlaces de la red verde urbana.

Conectómica y patoconectómica urbana. Más allá de las conexiones en la ciudad

Como resultado del estudio del conectoma ha surgido la conectómica, entendida como la disciplina que integra el análisis de neuroimágenes con base en la teoría de redes, y que

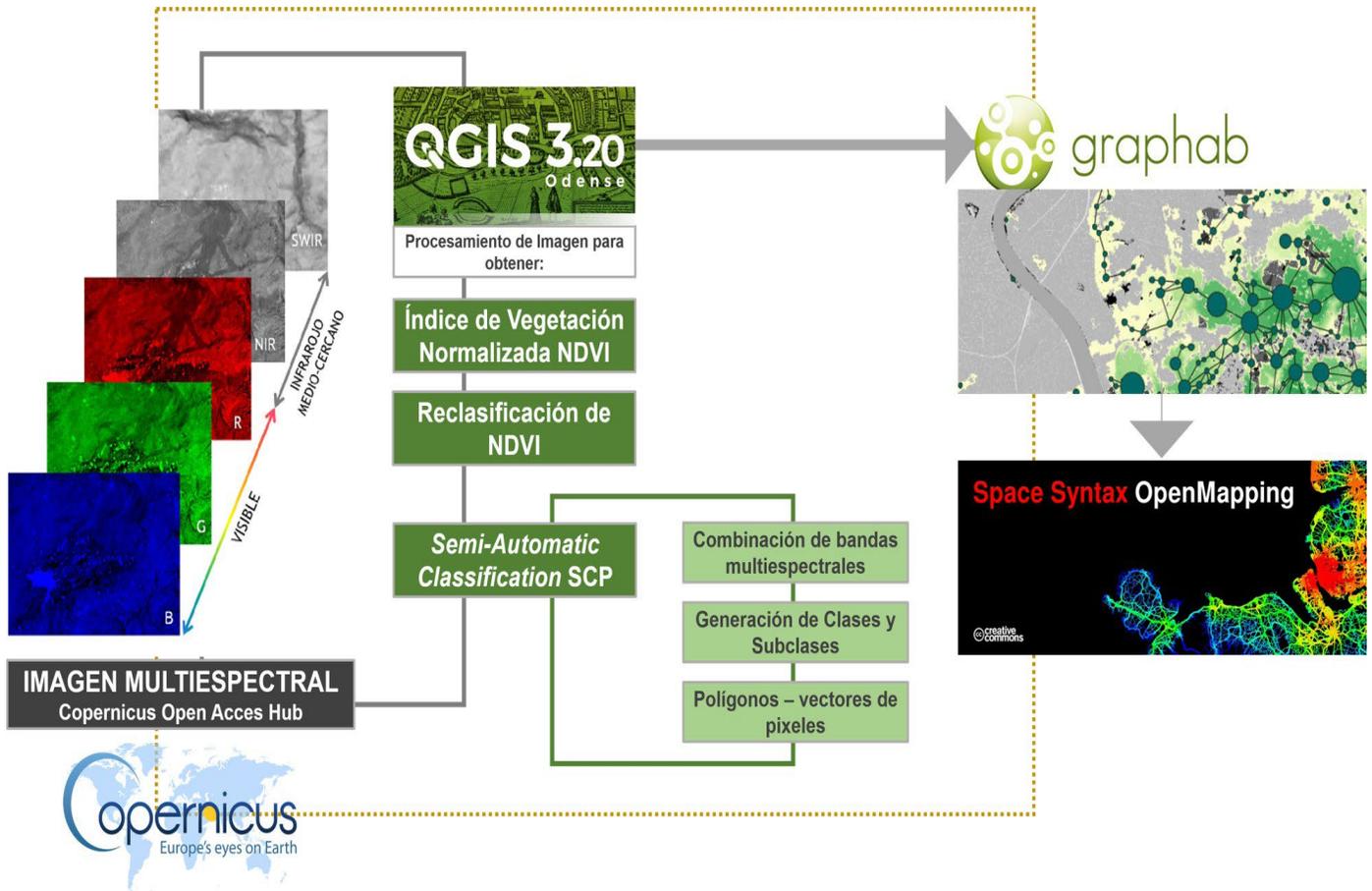


Figura 10. Procesamiento y uso de plataformas especializadas para la obtención del conectoma verde urbano. Elaboración

va más allá de la pura visualización del cerebro y su estructura (Rodríguez-Caso & López-Rodríguez, 2016). Derivado de las descripciones analógicas anteriores, relacionadas con la matriz de conexiones cerebrales, vegetales y urbanas, se apuesta a que, de igual forma, podría plantearse una conectómica urbana, para observar más allá de las puras conexiones estructurales en la ciudad.

Es importante destacar que, así como la conectómica analiza las redes de conexiones sinápticas de un cerebro sano, la patoconectómica estudia las anomalías del conectoma. Se indaga para “explicar, qué estructuras y qué funciones se alteran en las conexiones que se establecen entre las redes neuronales, cuando el cerebro está enfermo” (SINC, 2014, párrafo 5) en la búsqueda de estrategias para su posible cura o recuperación. En la ciudad, la

patoconectómica urbana, serviría para detectar las conexiones en mal estado o dañinas para la red. Sería esta una de las posibles evidencias de la evaluación del proyecto conectoma verde urbano.

Es posible, que este planteamiento visualice un entretrejimiento de conceptos y elementos, que ayuden a observar nuevas y diversas formas de conexiones, cómo se realizan, cuáles son sus efectos, qué factores y actores intervienen, y que, de cierta forma, apoye al surgimiento emergente de nuevas disciplinas y líneas de investigación derivadas de las neurociencias aplicadas al estudio de la ciudad.

Conclusión

El abordaje teórico de las bases y antecedentes de aplicación para este proyecto de investigación, demuestra cómo en las primeras 2 décadas del

siglo XXI, los estudios y conocimientos sobre el cerebro, han influenciado a diversos campos disciplinares, entre ellos la arquitectura y el urbanismo, y que paralelamente a campos de la biología y ecología del paisaje han entretrejido nuevas teorías y disciplinas.

Nos encontramos cada vez más cerca, de lo que visualizábamos como un futuro distante, así como en este ensayo se consideraron exploraciones del cerebro y las plantas, hacia sus aplicaciones al urbanismo. Ya se lleva un camino avanzado en la comprensión del cerebro y su relación con la arquitectura y la ciudad, en nuevas disciplinas como la neuroarquitectura y el neurourbanismo, si bien desde ámbitos perceptuales, pero podría haber más dentro de lo ya observado, en sus diferentes dimensiones y realidades.

Es importante destacar, que en el

proceso de hacer evidente el conectoma verde urbano, para poder analizarlo y evaluarlo, en su grado de conectividad como sistema y su aportación a la resiliencia climática, un reto, ha sido la necesidad de mezclar diversas plataformas y softwares para destacar los elementos verdes, y además para el proceso de evaluación, donde cada indicador deberá ser analizado con resultados obtenidos de diversos instrumentos de recolección de datos.

Procesar una zona muestra para señalar las similitudes estructurales y funcionales de la red cerebral, vegetal y urbana, lleva su tiempo, por lo cual pensar en destacar el conectoma verde de una ciudad o de una zona metropolitana, requeriría nuevos esfuerzos y posiblemente el tener equipos y plataformas más potentes para analizar mayor información.

Desde el conocimiento del conectoma humano, al conectoma urbano, y su aplicación con las redes verdes, el reconocimiento de sus analogías se ha hecho más evidente que nunca. Como la similitud en la capacidad multiescalar y multifuncional del sistema cerebral y urbano, en su estructura de conectividad, además de la jerarquía de elementos referenciales como nodos y enlaces, que permiten la integración, modulación y conformación de núcleos enriquecidos para los sistemas.

La conectómica que surge del estudio de las conexiones cerebrales, también analiza los problemas, fallas o padecimientos de la conectividad a través de la patoconectómica. Una posibilidad es el surgimiento de la conectómica y patoconectómica verde urbana, además de la inclusión de talleres y laboratorios dedicados al análisis y evaluación del conectoma verde de ciudades y regiones metropolitanas.

Esto conlleva a pensar, por supuesto en una planeación conectómica

del verde urbano, con estrategias que surgen del análisis y evaluación sistémica. También es muy probable el surgimiento de otra línea emergente de investigación, con la fusión de enfoques, del neurourbanismo y conectoma urbano, donde se analice la percepción de los usuarios, ante el uso, función y estructura del conectoma verde urbano, con equipos de investigación transdisciplinar y tecnología de medición cerebral y urbana.

Bibliografía

Adli, M. (2017). Neurourbanismo: towards a new discipline. *The Lancet Psychiatry*, 4, 183-185. doi:10.1016/S2215-0366(16)30371-6

Alonso, D. (2015). NDVI: Qué es y cómo calcular con SAGA desde QGIS. Recuperado el 16 de febrero de 2021, de MappinGIS : <https://mappinggis.com/2015/06/ndvi-que-es-y-como-calcularlo-con-saga-desde-qgis/>

Audi, R. (2004). *Diccionario Akal de Filosofía*. Ediciones Akal.

Baluska, F., & Mancuso, S. (27 de febrero de 2020). Plants, climate and humans. *Plant intelligence changes everything*. *Science & society*. doi:10.15252/embr.202050109

Benedict, M., & McMahon, E. (2002). *Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century*. *The Renewable Resources Journal*, 20(3).

Calvo, P. (2016). *The Philosophy of Plant Neurobiology: A Manifesto*. *Synthese*, 1323-1343. doi:<https://doi.org/10.1007/s11229-016-1040-1>

Cuenca, I. (2017). *Caracterización de la conectividad estructural cerebral basada en la teoría de redes complejas*. (Tesis de grado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

Díaz, R. (2014). *Neuromarketing. Macro*. Obtenido de https://books.google.com.mx/books/about/NEUROMARKETING.html?id=2NJFDwAAQBAJ&redir_

esc=y

Donhee, H., Park, H., Hwang, S., & Kim, K. (2021). Neuromorphic electronics based on copying and pasting the brain. *Nature electronics*(4), 635-644. doi:<https://doi.org/10.1038/s41928-021-00646-1>

Eagleman, D. (2011). *Incógnito. Las vidas secretas del cerebro*. Anagrama.

eSmartCity. (16 de noviembre de 2018). El «sistema nervioso urbano» de Huawei para las ciudades inteligentes en el mercado europeo. Obtenido de <https://www.esmartcity.es/2018/11/16/sistema-nervioso-urbano-huawei-para-ciudades-inteligentes-mercado-europeo>

Foltête, J.-C., Clauzel, C., & Vuidel, G. (Edits.). (2012). *A software tool dedicated to the modelling of landscape networks*. *Environmental Modelling & Software*, 38, 316-327.

Garciandía, J. (2011). *Pensar sistémico. Una introducción al pensamiento sistémico*. (Segunda ed.). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.

Johnson, S. (2001). *Sistemas emergentes*. Turner. Fondo de Cultura Económica.

Luengo, E. (2018). *Las vertientes de la complejidad. Pensamiento sistémico, ciencias de la complejidad, pensamiento complejo, paradigma ecológico y enfoques holistas*. ITESO.

Mancuso, S., & Viola, A. (2015). *Sensibilidad e inteligencia en el mundo vegetal*. Galaxia Gutenberg.

Martínez, M. (2007). *Conceptualización de la transdisciplinariedad*. *Polis. Revista Latinoamericana*, 1-16. Obtenido de <http://journals.openedition.org/polis/4623>

Martínez, M. (2012). *Nuevos fundamentos de la investigación científica*. Trillas.

Maya, G. (2017). *Space Syntax, movimiento e interacción*. Recuperado el 28 de septiembre de 2020, de <https://vimeo.com/224347341>

- Mehaffy, M. (2019a). Wonders of the "urban connectome". Obtenido de Future of Places Research Network: <https://foprn.org/2019/10/20/wonders-of-the-urban-connectome/>
- Mehaffy, M. (2019b). Cities are like brains—immense networks of connective tissue. Obtenido de Congress for the New Urbanism: <https://www.cnu.org/publicsquare/2019/12/10/wonders-urban-connectome>
- Mehaffy, M., Kryazheva, Y., Rudd, A., & Salinger, N. (2020). A new pattern language for growing regions. Places, networks, processes. Sustasis press.
- Montes, C., & Urteaga, E. (2018). Plasticidad sináptica como sustrato de la resiliencia. *Revista de neurología*, 453-460. doi:<https://doi.org/10.33588/rn.6711.2018258>
- Mora, F. (2014). Neurocultura. Una cultura basada en el cerebro. Alianza Editorial.
- Mora, F., & Sanguinetti, A. (2004). Diccionario de neurociencia. Alianza Editorial.
- Muñoz, P. (2013). Apuntes de teledetección: índices de vegetación. CIREN.
- Muñoz, S. (15 de septiembre de 2021). Qué es la sinapsis neuronal y tipos de sinapsis. Obtenido de PsicoActiva: <https://www.psicoactiva.com/blog/la-sinapsis-neuronal-tipos-sinapsis/>
- Rodríguez-Caso, C., & López-Rodríguez, D. (18 de noviembre de 2016). ¿Qué es la conectómica? Blog de la Revista: Encuentros en la biología. Obtenido de <https://www.encuentrosenlabiologia.es/2016/11/que-es-la-conectomica/>
- Rubinov, M., & Sporns, O. (2010). Complex network measures of brain connectivity: Uses and interpretations. *NeuroImage*. doi:10.1016/j.neuroimage.2009.10.003
- Simard, S. (2016). Cómo los árboles se comunican entre sí. Obtenido de https://www.ted.com/talks/suzanne_simard_how_trees_talk_to_each_other/up-next?language=es
- Simard, S. (2021). Finding the mother tree: Discovering the Wisdom of the Forest. Knopf.
- SINC. (2014). La conectómica estudia las redes neuronales en el cerebro enfermo. Obtenido de <https://www.agenciasinc.es/Noticias/La-conectomica-estudia-las-redes-neuronales-en-el-cerebro-enfermo>
- Sporns, O. (2011). Networks of the brain. The MIT Press.
- Sporns, O. (2012). Discovering the human connectome. Indiana University.
- Sporns, O., Tononi, G., & Kötter, R. (2005). The human connectome: A structural description of the human brain. *PLoS Comput Biol*, 1(4), 245-251. doi:10.1371/journal.pcbi.0010042
- Vazza, F., & Feletti, A. (16 de noviembre de 2020). The Quantitative Comparison Between the Neuronal Network and the Cosmic Web. *Frontier in physics. Interdisciplinary physics*. doi:<https://doi.org/10.3389/fphy.2020.525731>
- Velez, M. (2019). Breve historia de la neurociencia. Obtenido de La mente es maravillosa: <https://lamenteesmaravillosa.com/breve-historia-de-la-neurociencia/>