

Tarea 2: Comparación con modelos nulos

Mariana Ayala Ochoa

Introducción

La red social de vertebrados cavícolas se construyó a partir de la proyección unipartita de una red bipartita entre especies de vertebrados (aves, reptiles y pequeños mamíferos) y árboles utilizados como sitios de nidificación. En esta proyección, dos especies quedan conectadas cuando comparten el uso de cavidades en las mismas especies arbóreas, lo que permite visualizar asociaciones indirectas mediadas por el hábitat. El resultado fue una red altamente conectada que refleja un fuerte solapamiento en el uso de las distintas especies de árboles, por aves generalistas como *Aphrastura spinicauda* (Ralladito), *Troglodytes musculus* (Chercán), *Colaptes pitius* y *Pygarrhynchus albogularis* destacando como nodos centrales con múltiples vínculos, lo que las posiciona como estructuralmente relevantes en la dinámica de coexistencia de la comunidad.

Estadística descriptiva de la red

Para los análisis de la red social de vertebrados se eliminaron de la lista de especies de árboles los registros correspondientes a la categoría UKN, ya que no representa una especie en particular, sino un grupo de árboles que no pudieron ser identificados y que, por lo tanto, podrían corresponder a múltiples especies distintas.

En la Tabla I, se muestran las métricas básicas de la red de vertebrados construida a partir del uso compartido de cavidades en distintas especies de árboles.

Tabla I. Métricas básicas de la red de vertebrados

N_vertices	N_aristas	Diametro	Dis.Media	Densidad	Centralidad_closeness	Centralidad_betweenness
31	350	2	1.247	0.753	0.600	0

La red social de vertebrados cavícolas presenta un total de 31 vértices (antes de eliminar los UKN eran 33 vértices), correspondientes a especies de aves, reptiles y pequeños mamíferos, lo que refleja una notable diversidad de nodos vinculados por el uso compartido de cavidades en árboles.

La red presenta 350 aristas, lo que refleja un alto nivel de asociaciones indirectas mediadas por los árboles. Con un diámetro de 2 y una distancia media de 1.247, prácticamente cualquier especie está a pocos pasos de otra, mostrando una estructura fuertemente interconectada y con solapamiento intenso en el uso de cavidades de las mismas especies de árboles. La densidad de 0.753 confirma que más del 75% de las conexiones posibles existen, configurando una red altamente cohesionada. En cuanto a la centralidad, el valor de closeness (0.600) indica que la especie analizada ocupa una posición cercana y relevante para mantener la conectividad del sistema.

Planteamiento de la pregunta comparativa

La red analizada tiene una estructura altamente conectada, lo cual sugiere fenómenos de solapamiento de nicho y competencia potencial por recursos limitados, más que interacciones sociales directas entre individuos, esto nos lleva a la pregunta central de estudio: ¿la conectividad observada en esta red es el resultado de un patrón ecológico no aleatorio, o podría explicarse por un proceso aleatorio de asignación de vínculos?

Para abordarla, se plantea la hipótesis de que la red real mostrará mayores niveles de cohesión y centralidad de ciertas especies clave en comparación con redes generadas a partir de modelos nulos.

Hipótesis

La red observada tendrá una densidad y distancia media menores que las obtenidas en un modelo nulo de tipo *Erdős–Rényi* (conexiones aleatorias), reflejando un solapamiento no aleatorio en el uso de cavidades.

Elección de modelos nulos

En la siguiente tabla (Tabla II) se presenta la comparación de las métricas básicas de la red de vertebrados con tres modelos nulos generados (Erdos Rényi, Watts–Strogatz y Barabási) a partir de la red de vertebrados (red real).

Tabla II. Comparación de métricas de la red de vertebrados con modelos nulos.

Red	N_vertices	N_aristas	Diametro	Distancia_media	Densidad	centr_betweenness	centr_closeness
Red vertebrados	31	350	2	1.247	0.753	0.009	0.821
Erdos-Reny	31	360	2	1.226	0.774	0.008	0.818
Watts Strogatz	31	93	4	2.271	0.200	0.044	0.443
Barabasi	31	59	4	2.411	0.127	0.049	0.424

Complementariamente, se generaron gráficos comparativos que permiten visualizar la forma de cada red. Esta representación facilita apreciar de manera más intuitiva las similitudes y diferencias en la conectividad y en la distribución de enlaces entre la red real y los modelos nulos.

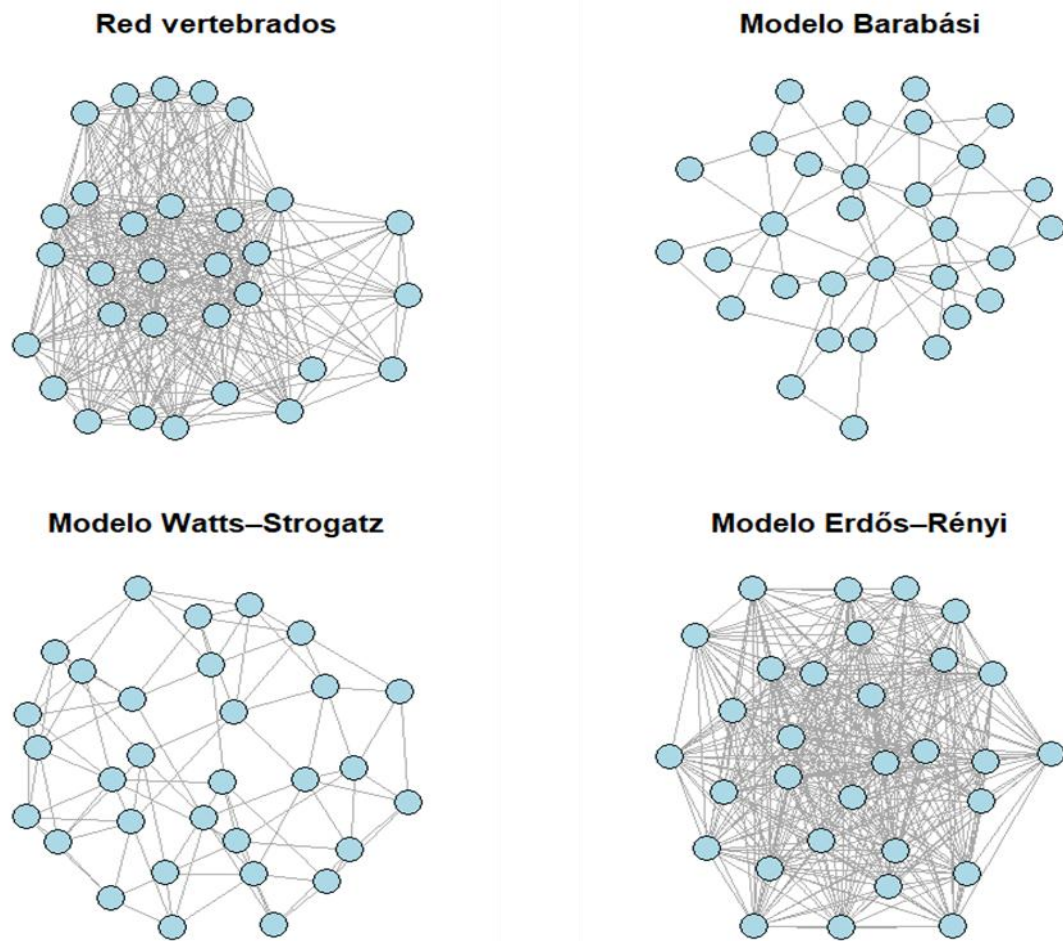


Figura 1. Comparación de la red de vertebrados con modelos nulos (Barabási–Albert, Watts–Strogatz y Erdős–Rényi).

Tanto en la Tabla II como en la figura 1, se observa que la red original de vertebrados es muy similar a la Erdos Rényi: la red original presenta métricas muy similares a las del modelo aleatorio de Erdos Rényi, especialmente en el número de aristas, el diámetro, la distancia media y la densidad, lo que sugiere que su estructura podría explicarse por una distribución de conexiones cercana al azar. El parecido con un modelo aleatorio resulta pertinente, ya que el uso compartido de cavidades en las mismas especies de árboles puede responder más a la disponibilidad general de árboles en el bosque que a una estrategia específica de las especies de vertebrados.

Por otra parte, el modelo al que menos se parece la red real es el de Barabási–Albert, ya que este genera una estructura con pocas especies muy conectadas (hubs), mientras que la red de vertebrados tiene una densidad muy alta y una conectividad distribuida de manera más uniforme.

Implementación de simulaciones / bootstrapping

A continuación se presenta la implementación de un análisis de simulación mediante bootstrapping, con el objetivo de comparar las propiedades estructurales de la red observada con las de redes generadas bajo tres modelos nulos clásicos: Erdos Rényi, Small-World y Barabási. Para cada modelo, se simularon 1000 redes que conservan el tamaño y densidad de la red real. En cada simulación se calcularon métricas relevantes (distancia media, diámetro, densidad, closeness y betweenness), y posteriormente se estimaron p-valores empíricos para determinar si los valores observados difieren significativamente de lo esperado bajo estos esquemas aleatorios. Esta aproximación permite evaluar si la estructura de la red real podría explicarse por azar o si presenta patrones no triviales.

Tabla III. Contrastes estadísticos (p-valores empíricos) entre la red real y los modelos nulos.

Metrica	Real	ER_p	SW_p	BA_p
Distancia_media	1.247	0.515	1	1
Diámetro	2	1	1	1
Densidad	0.753	0.526	0	0
Closeness	0.821	0.098	0	0
Betweenness	0.009	0.511	1	1

La tabla III muestra que las métricas de densidad y closeness de la red real/original difieren significativamente de las distribuciones generadas por los modelos Small-World y Barabási ($p \approx 0$). Por su parte, el modelo Erdos - Rényi presenta valores de p más altos en la mayoría de las métricas, indicando que se asemeja más a la red real.

Con el fin de comparar la estructura de la red empírica frente a diferentes modelos generativos, se realizaron 1000 simulaciones bajo los modelos nulos de Barabási–Albert, Erdos–Rényi y Small-World. En cada simulación se calcularon métricas estructurales clave (betweenness, closeness, densidad, diámetro y distancia media), cuyos resultados se presentan como distribuciones en forma de boxplots. La línea roja punteada indica el valor observado en la red real.

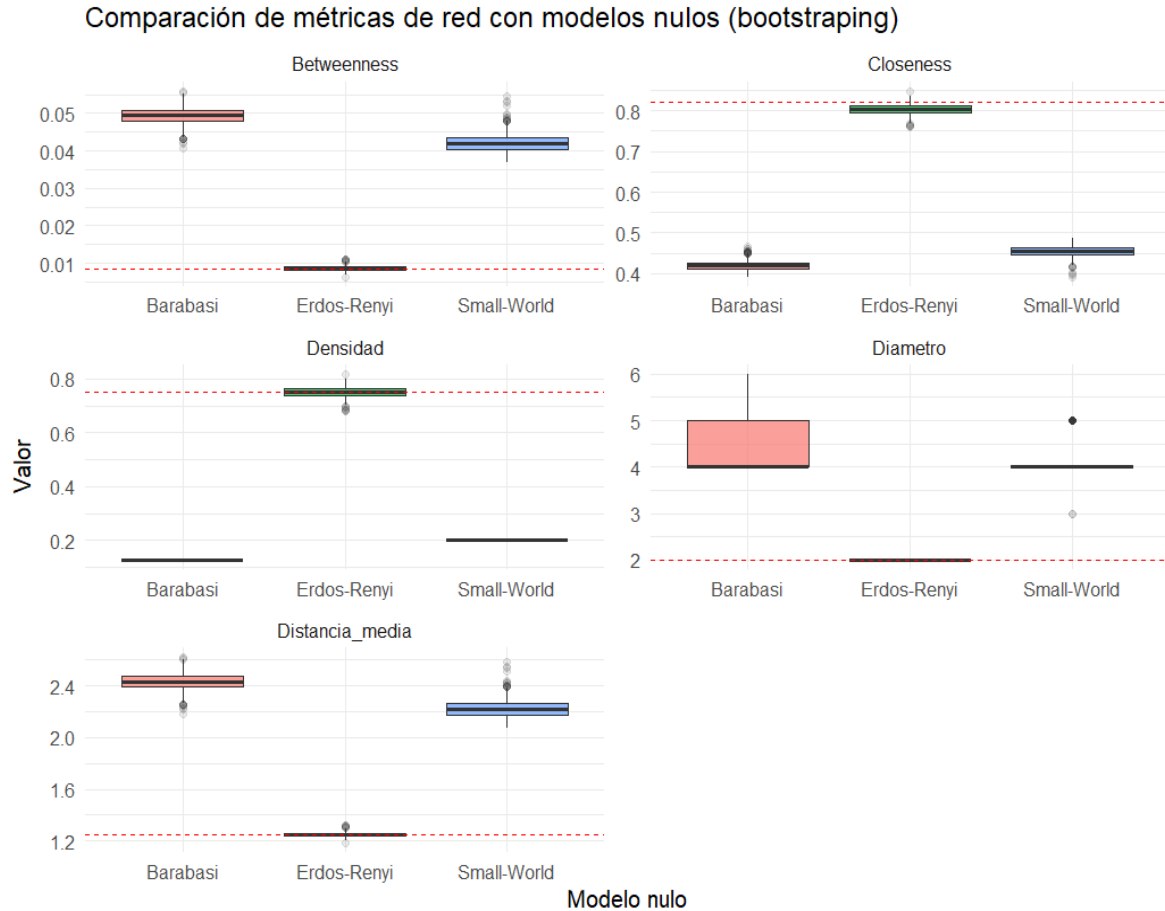


Figura 2. Distribuciones de métricas de red obtenidas mediante bootstrapping de modelos nulos

La comparación visual confirma lo observado en los contrastes estadísticos: el modelo Erdos-Rényi reproduce con mayor fidelidad la densidad, closeness y diámetro de la red real. En cambio, los modelos Small-World y Barabási–Albert presentan distribuciones alejadas de los valores empíricos, especialmente en distancia media y densidad.

Conclusiones

En conjunto, los resultados apoyan la conclusión de que Erdos-Rényi es el modelo nulo que más se aproxima a la estructura observada.

Ahora bien, desde el punto de vista biológico o ecológico biológicamente los resultados sugieren que la red estudiada no está organizada alrededor de “super especies”, sino que se aproxima a un ensamblaje más bien aleatorio de interacciones, probablemente moldeado por la disponibilidad y oportunidad de encuentros, lo que puede conferir cierta robustez ecológica frente a perturbaciones. Pareciera que los vertebrados que usan las cavidades no tienen demasiado interés en especies de árboles en particular, si no que más hay una competencia por las cavidades disponibles, independientemente del tipo de árbol.

En vista de que los resultados sugieren que no existe una preferencia marcada por especies arbóreas particulares, una hipótesis alternativa para explorar es que las aves podrían estar respondiendo más bien al estado de descomposición de los árboles (decay). Es posible que especies excavadoras como los carpinteros seleccionen árboles más jóvenes o sanos, en los cuales pueden generar sus propias cavidades, mientras que aves secundarias, como el Chercán (TROMUS) o las golondrinas (TACMEY), dependen de cavidades naturales formadas en árboles viejos o en avanzado estado de deterioro. Esto abriría la posibilidad de que la estructura de la red esté más influenciada por la dinámica temporal de los árboles y la disponibilidad de microhábitats asociados al envejecimiento, que por la identidad taxonómica de la especie arbórea en sí (se probará esta hipótesis en la tarea 3).

Red filtrada

A modo de explorar si se forma una red que no sea propiamente aleatoria, se genera una red que considera los árboles más frecuentados por las especies. La red se construye a partir de registros de interacción entre aves y árboles. Para cada especie de árbol presente en los datos, se identifican las especies de aves asociadas cuya frecuencia de observación en ese árbol sea igual o superior a 5. Si al menos dos aves cumplen con ese criterio, se generan todas las combinaciones posibles entre ellas y se crea un enlace no dirigido entre cada par en una matriz de adyacencia. Finalmente, se convierte esta matriz en una red no ponderada, en la que los nodos representan especies de aves y los enlaces indican coocurrencia frecuente (≥ 5 observaciones) en al menos un mismo árbol.

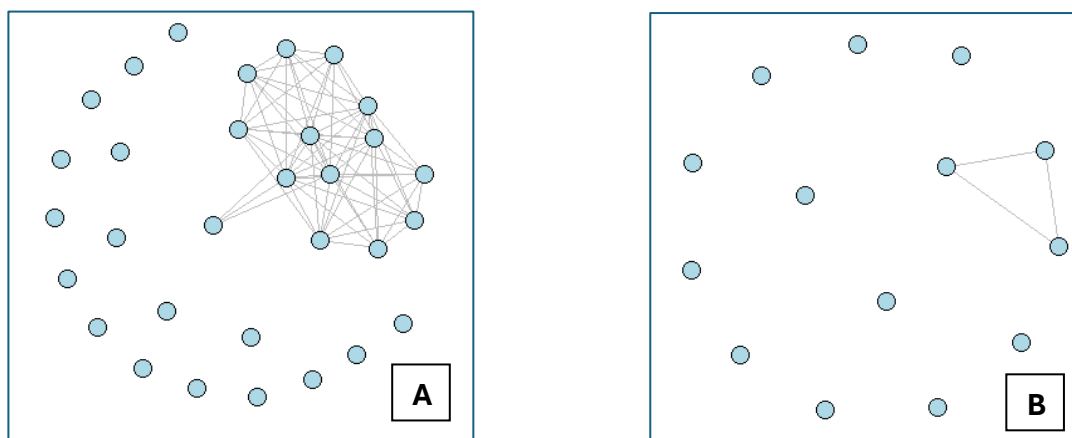


Figura 2. Redes filtradas de coocurrencia de aves en árboles con alta frecuencia de uso.

La red A muestra un núcleo denso de especies que coocurren con frecuencia en los mismos árboles, lo que sugiere competencia intensa por cavidades en ciertos árboles clave, junto a especies periféricas con menor coincidencia o hábitos más específicos. La red B, en cambio, presenta muy baja conectividad, con solo unos pocos enlaces, indicando que las coocurrencias frecuentes se restringen a un grupo reducido de especies y árboles, mientras que la mayoría utiliza los recursos de forma más independiente o dispersa.

Esto implica que, en el caso de la red B, no resulta pertinente o importante aplicar métricas globales de red (como distancia media o diámetro) sobre un grupito tan reducido de nodos conectados, ya que no reflejarían propiedades relevantes del sistema completo. Además, dado que la red está fragmentada, no tendría mucho sentido enfocarse solo en la componente gigante; Entonces, en conclusión, con estos datos en particular lo importante es considerar la estructura total de la red, incluyendo todas las componentes, para no perder información sobre la distribución real de las interacciones.