



MATERIAL COMPLEMENTARIO

RAMOS-JILIBERTO ET AL. (2013) Revista Chilena de Historia Natural 86: 21-31.

(A) RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA ESTIMAR EL VALOR DE RELEVANCIA ECOLÓGICA MEDIANTE CRITERIOS CUALITATIVOS.

A cada criterio (A-E) se le asigna un puntaje (1, 2 o 3) de acuerdo a la categoría en que se observe la especie en el ambiente. Así por ejemplo, a una especie con muy alta abundancia relativa en el sistema y de pequeño tamaño corporal se le asigna un puntaje de 3 para el criterio A y de 1 para el criterio B.

ESPECIE: XXX XXX						
Criterio		Puntaje			Carácter ⁴	Puntaje asignado
		3	2	1		
A	Abundancia relativa ¹	Dominante	Moderadamente abundante	Rara	Obligatorio	
B	Tamaño corporal relativo ²	Grande	Medio	Pequeño	Obligatorio	
C	Persistencia estacional	Permanente	Usualmente encontrada	Efímera	Optativo	
D	Distribución en el sistema	Amplia	Media	Restringida	Optativo	
E	Juicio experto ³	Muy importante	Medianamente importante	Poco importante	Optativo	
Valor de relevancia ⁵ :						

¹ Abundancia promedio estimada a través del ciclo anual, relativa a las abundancias de las otras especies de la misma categoría trófica.

² Tamaño corporal estimado del adulto promedio, relativo al tamaño de las otras especies de la misma categoría trófica.

³ El juicio experto debe estar claramente y explícitamente fundamentado. Debe exponer las razones para otorgar el puntaje, las referencias de respaldo y respaldar el grado de competencia del experto consultado.

⁴ De los 3 criterios optativos (C - E) al menos debe utilizarse uno.

⁵ El valor de relevancia ecológica es la suma de la última columna dividido por el número (3 - 5) de criterios utilizados.



(B) SELECCIÓN DE LOS ÍNDICES DE IMPORTANCIA TOPOLÓGICA MÁS USADOS EN LA LITERATURA DE REDES ECOLÓGICAS.

Índices topológicos seleccionados y sus respectivos requerimientos de direccionalidad de las interacciones: requerido (a), opcional (b) o no permitido (c).

Índice	Dirección interacciones
Grado in	a
Grado out	a
Keystone Index ¹	a
Keystone index bottom-up ¹	a
Keystone index top-down ¹	a
Information Centrality ^{2,3}	b
Topological Importance ⁴	b
Topological Importance modified ⁵	a
Katz Status Index ⁶	b
Eigenvector Centrality ⁷	b
Page Rank ⁸	b
Betweenness Centrality ^{9,2}	b
Betweenness Centrality in directed graphs ^{2,9}	a
Eccentricity Centrality ¹⁰	c
Closeness Centrality ^{11,12,2}	c

¹Jordán et al. (1999), ²Wassermann & Faust (1994), ³Borgatti et al. (2002), ⁴Jordán (2009), ⁵Liu et al. (2010), ⁶Katz (1953), ⁷Bonacich (1972), ⁸Langville & Meyer (2005), ⁹Freeman (1977), ¹⁰Harary & Hage (1995), ¹¹Beauchamp (1965), ¹²Sabidussi (1966).

(C) EXPLICACIÓN DE LOS 7 ÍNDICES TOPOLÓGICOS SELECCIONADOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ESPECIES ECOLÓGICAMENTE RELEVANTES.

Keystone index (KI_TOT): Mide el control que ejerce el nodo (GF) focal i sobre el flujo de biomasa en la red. Keystone index es la suma de Keystone index bottom-up y Keystone index top-down. El Keystone index del nodo focal se calcula como

$$KI_TOT_i = KI_BU_i + KI_TD_i$$

donde KI_BU es Keystone index bottom-up y el KI_TD es Keystone index top-down. Para el cálculo de este índice recomendamos utilizar el programa COSBILab Graph (disponible online

en

<http://www.cosbi.eu/index.php/research/prototypes/graph>).

Keystone index bottom-up (KI_BU): Mide el grado de control que ejerce un nodo i hacia los niveles tróficos superiores producto de la disponibilidad de alimento. El Keystone index bottom-up del nodo i se calcula como

$$KI_BU_i = \sum_{c=1}^n \frac{1}{d_c} (1 + KI_BU_c)$$



donde d_c es el número de nodos presa que consume el nodo depredador c -ésimo del nodo i , y KI_BU_c es el Keystone index bottom-up del nodo depredador c -ésimo. Lo anterior indica que éste es un algoritmo recursivo que debe partir de los nodos tope de la red trófica. Para el cálculo de este índice recomendamos utilizar el programa COSBILab Graph (disponible online en <http://www.cosbi.eu/index.php/research/prototypes/graph>).

Keystone index top-down (KI_TD): Mide el grado de control que ejerce cada nodo hacia los niveles tróficos inferiores producto de la depredación. El Keystone index top-down del nodo i se calcula como

$$KI_TD_i = \sum_{e=1}^m \frac{1}{f_e} (1 + KI_TD_e)$$

donde f_c es el número de nodos depredadores del nodo presa e -ésimo del nodo i , y KI_TD_e es el Keystone index top-down del nodo presa e -ésimo. Lo anterior indica que éste es un algoritmo recursivo que debe partir de los nodos basales de la red trófica. Para el cálculo de este índice recomendamos utilizar el programa COSBILab Graph (disponible online en <http://www.cosbi.eu/index.php/research/prototypes/graph>).

Betweenness centrality non-directed (BC_ND): Un nodo con alto valor de BC_ND es aquel que participa en un gran número de caminos más cortos entre los otros nodos. El índice BC_ND para el nodo i se calcula como

$$BC_ND_i = \frac{2 \sum_{j < k} g_{jk}(i) / g_{jk}}{(N-1)(N-2)}$$

donde $i \neq j, k$. g_{jk} es el número de caminos con la mínima distancia entre los nodos j y k . Por otro lado $g_{jk}(i)$ es el número de caminos más cortos (de mínima distancia) entre j y k que pasan por i . La cantidad total de nodos en la red es N . Para el cálculo de este índice recomendamos utilizar el programa COSBILab Graph (disponible online en <http://www.cosbi.eu/index.php/research/prototypes/graph>).

Betweenness centrality directed (BC_D): Es el mismo concepto del índice anterior, pero sólo permite que se consideren los caminos respetando la dirección del flujo entre los nodos. El cálculo es el mismo que BC_ND , con la diferencia que un nodo va a estar conectado con otro sólo si se puede establecer un camino unidireccional entre ellos dos. Para el cálculo de este índice recomendamos utilizar el programa COSBILab Graph (disponible online en <http://www.cosbi.eu/index.php/research/prototypes/graph>).

Eigenvector centrality (EC): Un componente con alto valor de EC corresponde a un componente conectado con un gran número de otros componentes, los que a su vez también están altamente conectados y así sucesivamente. El valor de EC del nodo i corresponde al i -ésimo elemento del vector v , el cual debe satisfacer la ecuación matricial

$$A \cdot v = \lambda_{\max} \cdot v,$$



donde A es la matriz (simétrica) de adyacencia de la red y $\lambda_{\max}$ es el mayor valor propio de A . Para el cálculo de este índice puede utilizarse cualquier programa matemático.

Topological importance (TIn). Mide la relevancia de una especie considerando efectos directos e indirectos de orden n . Asume un efecto aditivo en las interacciones directas y un efecto multiplicativo en caminos indirectos. El índice Topological importance de orden n para el nodo i se calcula como

$$TIn_i = \frac{\sum_{m=1}^n \sum_{j=1}^N a_{m,ij}}{n}$$

(D) CÁLCULO DEL ÍNDICE ADJ_NEG PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ESPECIES ECOLÓGICAMENTE RELEVANTES.

A partir de los grupos funcionales definidos en la comunidad focal y de las interacciones ecológicas entre ellos se construye la matriz comunitaria cualitativa A . Los elementos a_{ij} en A con valores -1, 1 y 0 describen efectos directos negativos, positivos o nulos del grupo funcional j sobre el grupo funcional i .

Dado que la evidencia actual apunta a que la autorregulación poblacional a través de la retroalimentación negativa es un proceso generalizado (Berryman et al. 2002, Brook & Bradshaw 2006), es adecuado asumir que todos los grupos funcionales presentan autorregulación (i.e. todos los elementos de la diagonal de A son negativos). Adicionalmente, para este análisis se incorpora competición por recursos (e.g. nutrientes) entre los productores primarios. Para ello se agrega un nodo con autolimitación que se conecta por interacciones tróficas a los productores.

donde $a_{m,ij}$ es el efecto de j sobre i de orden m (e.g. a través de caminos de largo m). Por ejemplo, para el efecto de j sobre i que pasa por dos nodos k y g de orden $m = 2$ se calcula como $a_{2,ij} = a_{1,kj}a_{1,ik} + a_{1,gj}a_{1,ig}$. Los efectos de j sobre i se miden para todos los N nodos con los cuales i está conectado. Para la aplicación de este estudio, consideramos los caminos de orden 1, 2 y 3, es decir $n = 3$. Para el cálculo de este índice recomendamos utilizar el programa COSBILab Graph (disponible online en <http://www.cosbi.eu/index.php/research/prototypes/graph>).

A partir de la matriz comunitaria A se evalúa la estabilidad del sistema según el procedimiento descrito en Dambacher et al. (2003b). En términos generales, el sistema será estable si se cumplen dos requisitos: (i) los coeficientes del polinomio característico de A tienen todos el mismo signo, (ii) la serie de matrices de Hurwitz de A (cuyos elementos son los coeficientes del polinomio característico) tiene determinantes positivos (ver detalles en Dambacher et al. 2003b). Si el sistema es estable (altamente probable para matrices pequeñas) se procede con el análisis, de lo contrario se elimina esta parte del procedimiento y se ajusta el paso 4. Luego, a partir de $-\text{adj}(-A_{ij})$ se obtienen los cambios en densidad de equilibrio de los grupos funcionales luego de aplicar una perturbación negativa (remoción bruta de biomasa) sobre un grupo funcional determinado. Para obtener una medida de certeza acerca de este cambio en estructura comunitaria se pondera el cambio en densidad de

cada nodo por la cantidad total de ciclos de retroalimentación involucrados TF (Dambacher et al. 2003a) en la respuesta a la perturbación aplicada. De este modo se obtiene la matriz de predicciones ponderadas W:

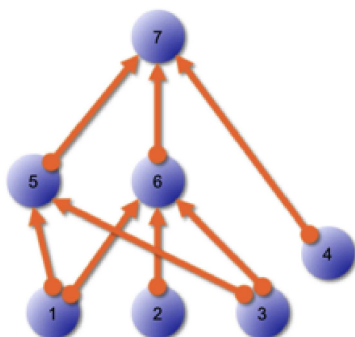
$$W = -\frac{\text{adj}(-A)}{TF}$$

donde el signo de cada elemento w_{ij} indica aumento (+), disminución (-) o no cambio (0) en densidad del grupo funcional i luego de aplicar una perturbación negativa sobre el grupo funcional j. El valor de w_{ij} indica la probabilidad de que ocurra dicho cambio. Para nuestro propósito, valores $w_{ij} \geq 0.5$ se aproximarán a 1, valores de $w_{ij} \leq -0.5$ se aproximarán a -1 y valores $-0.5 < w_{ij} < 0.5$ se aproximarán a 0. La

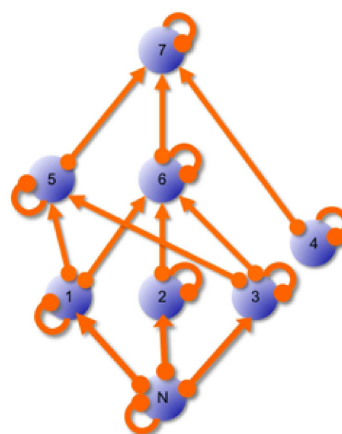
relevancia ecológica de un grupo funcional según el índice ADJ_NEG está dada por la fracción de cambios negativos, registrados en W, que la perturbación de éste produce en la comunidad (ver ejemplo de cálculo más abajo). La abreviación ADJ_NEG viene por el cálculo de la adjunta y el registro de cambios negativos. Para la ejecución del análisis dinámico cualitativo puede utilizarse un código Maple disponible en línea (<http://esapubs.org/archive/ecol/E083/022/suppl-1.htm>). En el Material Complementario sección C, se presenta un ejemplo de la aplicación de esta herramienta, que resulta en la obtención del índice ADJ_NEG para cada GF de la comunidad.

(E) EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DINÁMICO CUALITATIVO PARA LA OBTENCIÓN DE VALOR DEL ÍNDICE ADJ_NEG.

(a)



(b)



$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Figura C1: A: Estructura de una comunidad representada como dígrafo (superior) y su respectiva matriz comunitaria (inferior). B: La misma comunidad con las modificaciones necesarias para su análisis.



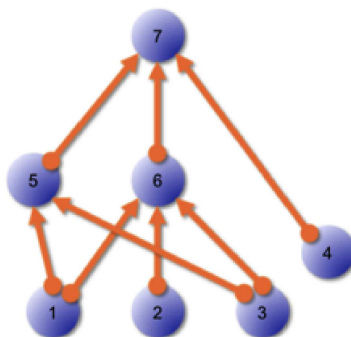
$$W = \begin{bmatrix} -0.54 & 0.14 & 0.18 & 0.14 & 0.37 & -0.12 & -0.48 & 0.37 \\ -0.14 & -0.55 & 0.17 & 0.39 & -0.15 & 0.18 & 0.032 & -0.15 \\ -0.18 & 0.17 & -0.29 & 0.17 & 0.037 & -0.35 & 0.24 & 0.037 \\ -0.14 & 0.39 & 0.17 & -0.55 & -0.15 & 0.18 & 0.032 & -0.15 \\ 0.37 & 0.15 & -0.037 & 0.15 & -0.24 & 0.17 & 0.27 & 0.27 \\ -0.12 & -0.18 & 0.35 & -0.18 & 0.17 & -0.43 & 0.33 & 0.17 \\ -0.48 & -0.032 & -0.24 & -0.032 & 0.27 & 0.33 & -0.71 & 0.27 \\ -0.37 & -0.15 & 0.037 & -0.15 & -0.27 & -0.17 & -0.27 & -0.27 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$ADJ_NEG = \frac{1}{7} \quad 0 \quad \frac{1}{7} \quad 0 \quad 0 \quad \frac{1}{7} \quad 0$$

Figura C2: Matriz de predicciones ponderadas W (a la derecha su versión categórica) y derivación del índice de relevancia ecológica ADJ_NEG. Nótese que sólo se consideran los 7 nodos originales, descartándose aquel que representa al nutriente.

F. EJEMPLO DE CÁLCULO DE RELEVANCIA ECOLÓGICA MEDIANTE ÍNDICES CUANTITATIVOS.

En la figura C3 se presenta una comunidad estructurada en GFs (tomada de Ramos-Jiliberto et al. 2012), a la cual aplicaremos el procedimiento propuesto para la selección de los GFs ecológicamente relevantes.



NODO	1	2	3	4	5	6	7
CATEGORÍA TRÓFICA	i	i	i	ii	ii	ii	iii

Figura C3: Comunidad utilizada como ejemplo para la aplicación de índices cuantitativos. Se muestra la pertenencia de cada GF (nodo) a cada categoría trófica.



Paso 1: Valores de los 8 índices cuantitativos para cada uno de los 7 nodos (GFs) de la comunidad:

		NODOS						
TIPO	INDICE	1	2	3	4	5	6	7
I	KI_TD	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	2.00	6.00
	Ki_BU	1.11	0.44	1.11	0.33	0.33	0.33	0.00
	BC_D	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	2.00	0.00
II	EC	0.37	0.20	0.37	0.17	0.45	0.52	0.43
	BC_ND	1.33	0.00	1.33	0.00	5.00	15.00	11.33
	TI3	0.77	0.39	0.77	0.44	1.31	1.92	1.39
	KI_TOT	1.11	0.44	1.11	0.33	1.33	2.33	6.00
III	ADJ_NEG	0.14	0.00	0.14	0.00	0.00	0.14	0.00

Paso 2: Ranking X_i entre los nodos para cada índice:

		NODOS						
TIPO	INDICE	1	2	3	4	5	6	7
I	KI_TD	4	4	4	4	3	2	1
	Ki_BU	1	3	1	4	4	4	7
	BC_D	3	3	3	3	2	1	3
II	EC	4	6	4	7	2	1	3
	BC_ND	4	6	4	6	3	1	2
	TI3	4	7	4	6	3	1	2
	KI_TOT	4	6	4	7	3	2	1
III	ADJ_NEG	1	4	1	4	4	1	4

Paso 3: Valores T_i de ranking (X_i) transformados:

		NODOS						
TIPO	INDICE	1	2	3	4	5	6	7
I	KI_TD	3	3	3	3	3	3	1
	Ki_BU	1	3	1	3	3	3	3
	BC_D	3	3	3	3	3	1	3
II	Promedio	4	6	4	7	3	1	2
III	ADJ_NEG	1	4	1	4	4	1	4

Paso 4: Promedios R_i de valores T_i para cada nodo y relevancia ecológica normalizada Ω_i para cada nodo.

		NODOS						
		1	2	3	4	5	6	7
R		2.34	3.88	2.34	3.93	3.18	1.96	2.60
Ω		0.81	0.03	0.81	0.00	0.38	1.00	0.68



Selección de nodos de relevancia ecológica:

NODO	Ω	CATEGORÍA TRÓFICA
6	1	ii
1	0.81	i
3	0.81	i
7	0.68	iii

(G) CÓDIGO MATLAB PARA EL CÁLCULO DE Ω_i A PARTIR DE LOS VALORES DE LOS 8 ÍNDICES DESCRITOS EN EL TEXTO PRINCIPAL.

```
function omega=EER(M)
%$ Hecho por Rodrigo Ramos-Jiliberto, 03 Diciembre 2011.
% Calcula la relevancia ecologica (omega) de cada nodo de una red,
%a partir de los valores de los 8 indices: KI_TD, KI_BU,BC_D, EC, BC_ND,
%TI3, KI_TOT, ADJ_NEG.

% Se ingresan los valores de cada indice para cada nodo en una matriz M
% Cada columna representa un nodo, y los valores de indices se ubican en
%las filas, en el orden mencionado mas arriba.
% Entonces, M tiene 8 filas y n columnas, siendo n el numero de nodos de la
%comunidad.
% Este codigo arroja un vector con el valor de Relevancia Ecologica
%Normalizada (omega) para cada uno de los nodos de la comunidad, en el
%orden en que fueron ingresados en las columnas de M.
%% La matriz de ejemplo

% M=
%[0.00  0.00  0.00  0.00  1.00  2.00  6.00
% 1.11  0.44  1.11  0.33  0.33  0.33  0.00
% 0.00  0.00  0.00  0.00  1.00  2.00  0.00
% 0.37  0.20  0.37  0.17  0.45  0.52  0.43
% 1.33  0.00  1.33  0.00  5.00  15.00  11.33
% 0.77  0.39  0.77  0.44  1.31  1.92  1.39
% 1.11  0.44  1.11  0.33  1.33  2.33  6.00
% 0.14  0.00  0.14  0.00  0.00  0.14  0.00]
%
%% Paso II: rankings
% este codigo fue creado por Francesco Pozzi, y modificado por R.
% Ramos-Jiliberto
R=zeros(size(M));
for fila=1:size(M,1);
    x=-M(fila,:)';% esto cambia el ranking desde ascendente a descendente
    [y, ind] = sort(x);
    FreqTab(:, 1) = y([find(diff(y)); end]);
    N1 = length(x);
    N2 = length(FreqTab(:, 1));
    if N1 == N2
        y(ind) = 1:N1;
    end
end
return
```




```
end
FreqTab(:, 2) = histc(y, FreqTab(:, 1));
% Find the rankings
y = (1:N1)';
k = 1;
    for i = 1:N2
        if FreqTab(i, 2) > 1
            y(k:(k + FreqTab(i, 2) - 1)) = k;
        end
        k = k + FreqTab(i, 2);
    end
y = sortrows([y, ind], 2);
y(:, 2) = [];
R(fila,:) = y';
FreqTab = [];
end
%
%% Paso III: Indices transformados
TR = zeros(5, size(M, 2));
for fila = 1:3
    for columna = 1:size(M, 2)
        if R(fila, columna) == 1
            TR(fila, columna) = 1;
        else
            TR(fila, columna) = mean(R(fila, :));
        end
    end
end
end
%
for c = 1:size(M, 2)
    TR(4, c) = mean(R(4:7, c));
end
%
TR(5, :) = R(8, :);
%
%% Paso IV: Omega
relevancia = zeros(1, size(M, 2));
for columna = 1:size(M, 2)
    relevancia(1, columna) = mean(TR(1:5, columna));
end
%relevancia
omega = zeros(1, size(M, 2));
relevmax = max(relevancia(1, :));
relevmin = min(relevancia(1, :));
for columna = 1:size(M, 2)
    omega(1, columna) = (relevmax - relevancia(1, columna)) / (relevmax - relevmin);
end
end
```



LITERATURA CITADA

- BEAUCHAMP MA (1965) An improved index of centrality. *Behavioral Science*, 10: 161–163.
- BERRYMAN AA, M LIMA ARCE & BA HAWKINS (2002) Population regulation, emergent properties, and a requiem for density dependence. *Oikos* 99: 600 - 606.
- BONACICH P (1972) Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification. *Journal of Mathematical Sociology*, 2: 113-120.
- BORGATTI SP, MG EVERETT & LC FREEMAN (2002) *Ucinet for Windows: Software for Social Network Analysis*. Harvard MA: Analytic Technologies.
- BROOK BW & CJA BRADSHAW (2006) Strength of evidence for density dependence in abundance time series of 1198 species. *Ecology* 87: 1445-1451.
- DAMBACHER JM, HW LI & PA ROSSIGNOL (2003a) Qualitative predictions in model ecosystems. *Ecological Modelling* 161: 79-93.
- DAMBACHER JM, H LUH, HW LI & PA ROSSIGNOL (2003b) Qualitative stability and ambiguity in model ecosystems. *The American Naturalist* 161: 876-888.
- FREEMAN LC (1977) A set of measures of centrality based upon betweenness. *Sociometry* 40: 35-41.
- HARARY F & P HAGE (1995) Eccentricity and centrality in networks. *Social Networks* 17: 57-63.
- JORDÁN F (2009) Keystone species and food webs. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 364: 1733-1741.
- JORDÁN F, A TAKÁCS-SÁNTA & I MOLNÁR (1999) A reliability theoretical quest for keystones. *Oikos* 86: 453-462.
- KATZ L (1953) A new status index derived from sociometric analysis. *Psychometrika* 18: 39-43.
- LANGVILLE AN & CD MEYER (2005) A Survey of eigenvector methods for web information retrieval. *SIAM Review* 47: 135-161.
- LIU WC, HW CHEN, F JORDÁN, WH LIN & CW LIU (2010) Quantifying the interaction structure and the topological importance of species in food webs: a signed digraph approach. *Journal of Theoretical Biology* 267: 355-362.
- RAMOS-JILIBERTO R, L GARAY-NARVÁEZ & MH MEDINA (2011) Retrospective qualitative analysis of ecological networks under environmental perturbation: a copper-polluted intertidal community as a case study. *Ecotoxicology* 21: 234-243.
- SABIDUSSI G (1966). The centrality index of a graph. *Psychometrika* 31: 581-603.
- WASSERMANN S & K FAUST (1994) *Social Network Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge.