



Fundación Interuniversitaria
Fernando González Bernáldez
PARA LOS ESPACIOS NATURALES

En recuerdo de Fernando González Bernáldez

La ecología, entre las ciencias naturales y las ciencias humanas. Contribución de González Bernáldez a la ecología cuantitativa

por Juan Pedro de Nicolás Sevillano y Francisco Ferrer Ferrer



De Nicolás y Ferrer (2023). La ecología, entre las ciencias naturales y las ciencias humanas. Contribución de González Bernáldez a la ecología cuantitativa. Ed. Fundación Fernando González Bernáldez.

Este documento, elaborado por los profesores Juan Pedro de Nicolás y Francisco Ferrer, quienes lo han facilitado amablemente a la Fundación Fernando González Bernáldez, documenta una época clave en la configuración del programa de investigación en ecología que González Bernáldez desarrolló desde la década de 1970. La Fundación agradece esta aportación y la difunde como un valioso complemento a la información sobre la vida y el legado de González Bernáldez que se ofrece en su página web (<https://fungobe.org>).

Índice de contenidos

Resumen	4
Summary	5
Introducción.....	5
Ecológica cuantitativa en el CSIC.....	6
Investigación sobre ecología cuantitativa en Sevilla	11
Planificación territorial en COPLACO.....	12
Investigación de los pastizales en la Universidad Autónoma de Madrid	14
Referencias	21

En recuerdo de Fernando González Bernáldez

La ecología, entre las ciencias naturales y las ciencias humanas. Contribución de González Bernáldez a la ecología cuantitativa

Juan Pedro de Nicolás Sevillano y Francisco Ferrer Ferrer

Departamento de Ecología, Universidad de La Laguna. Santa Cruz de Tenerife.

jpnsevillano@gmail.com

fjferrer@ull.es

Resumen

El desarrollo de la ecología ha requerido modificar la forma de ver, de analizar y de interpretar la realidad natural y cultural; así como incorporar conceptos, índices y métodos de análisis cuantitativos como el índice de información de Shannon y métodos de análisis multivariante; cuyos puntos fuertes y débiles se analizan a lo largo de tres periodos. Un primer periodo, en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), mientras González Bernáldez aplicaba la metodología multivariante al estudio de la vegetación, como alternativa al uso del índice de información de Shannon utilizado por Margalef para el análisis del plancton; un segundo periodo, con motivo de la elaboración de un “banco de datos ambiental” y la aplicación de métodos cuantitativos a la planificación territorial; y un tercer periodo, en el departamento de ecología de la UAM, con motivo del método estudio de los pastizales de la comunidad autónoma de Madrid combinando métodos multivariantes y el índice de información de Shannon.

Palabras clave: Comunidades vegetales, plancton, análisis multivariante, índice de información de Shannon.

Agradecimientos: a Manuel Ruiz Pérez, Francisco Díaz Pineda, Antonio Pou y a Javier Benayas.

Summary

The development of ecology has required changing the way of seeing, analyzing and interpreting natural and cultural reality; as well as incorporating concepts, indices and methods of quantitative analysis such as the Shannon information index and multivariate analysis methods; whose strengths and weaknesses are analysed over three periods. A first period, in the Higher Council for Scientific Research (CSIC), while González Bernáldez applied the multivariate methodology to the study of vegetation, as an alternative to the use of the Shannon information index used by Margalef for the analysis of plankton; a second period, on the occasion of the development of an "environmental data bank" and the application of quantitative methods to territorial planning; and a third period, in the department of ecology of the U.A.M. on the occasion of the method study of the pastures of the autonomous community of Madrid combining multivariate methods and the Shannon information index.

Key words: Plant communities, plankton, multivariate analysis, Shannon Information Index.

Introducción

La visión sobre la realidad física y cultural ha variado paralelamente al crecimiento de la población humana, de la explotación de los recursos naturales, de la pérdida de capacidad reguladora de los ecosistemas y de sucesivas crisis, superadas gracias al desarrollo cultural. Sin embargo, la actual *crisis ambiental* ha permanecido sin resolverse durante los últimos setenta años, atribuible a la falta de una visión sobre la ecología suficientemente comprensiva, que fuera operativa.

Una visión que comencé a vislumbrar a través de los comentarios de un compañero del curso selectivo de ciencias sobre la morfogénesis de Turing (Turing, A.M., 1952), que amplí en las clases de ecología de Morey Andreu y que traté de materializar al iniciar por su consejo el doctorado con Fernando González Bernáldez en el Instituto de Edafología y Fisiología Vegetal del CSIC en Madrid. Proceso que se describe entre los años 1968 y 1980, en tres periodos durante los cuales mantuvimos una relación más estrecha.

Un primer periodo, en el Instituto de Edafología y Fisiología Vegetal, mientras González Bernáldez evolucionaba de la fisiología vegetal a la ecología cuantitativa, combinando muestreos cuantitativos y métodos de análisis multivariantes; un segundo periodo, en la Comisión de Planeamiento del Área Metropolitana de Madrid (COPLACO), con motivo de la creación del "Banco de Datos Ambiental" de la Subregión de Madrid y del Plan Especial de

Protección del Medio Físico; y un tercer periodo, durante los primeros años del Departamento de Ecología de la Universidad Autónoma de Madrid, analizando la vegetación de la comunidad autónoma de Madrid combinando el análisis multivariantes y el índice de información de Shannon.

Ecológica cuantitativa en el CSIC

El primer periodo se inicia el año 1968 al conocer a González Bernáldez en el Instituto de Edafología y Fisiología Vegetal. Un centro constituido legalmente el año 1940 como Instituto Español de Edafología, Ecología y Fisiología Vegetal, que durante los primeros quince años ocupó instalaciones dispersas a la vez que perdía su nombre la referencia a la ecología. Pasando a concentrar sus dependencias en un edificio de varias plantas en 1965 a la vez que experimentaba un importante proceso de reorganización.

Circunstancia que aprovechó González Bernáldez para crear la Sección de Ecofisiología con la idea de recuperar la perspectiva ecológica del centro y evolucionar personalmente de la investigación en fisiología vegetal a la investigación en ecología cuantitativa, sin renunciar a su vocación científica cuantitativa.

Proceso que compartió con Montserrat Recoder, Director de la Sección de Ecología de Pastizales, interesado como Margalef por la fitosociología (Braun-Blanquet, 1948, 1950, 1964) y la utilización de índices cuantitativos para caracterizar las comunidades.

Dos tipos de ecología cuantitativa

Margalef y González Bernáldez, los dos primeros catedráticos de ecología en España, lideraron el desarrollo de dos metodologías análisis ecológico cuantitativo, adaptadas respectivamente al estudio de las comunidades acuáticas y terrestres, así como a su motivación, capacidad y formación.

Metodología de Margalef utilizando el índice de información de Shannon

Margalef comenzó los análisis ecológicos cuantitativos comparando la variación de la composición de las comunidades biológicas con distribuciones probabilísticas teóricas (William, C.B., 1944, 1947) como lo hacía un actuario de seguros, utilizando parámetros de las distribuciones teórica para caracterizar las comunidades (Margalef, R., 1949) hasta decantarse por el índice de información de Shannon (Shannon, C.E., 1948) al encontrarlo más adecuado

que otros para representar su visión sistémica sobre las comunidades que reclamaban un índice politético (Margalef, R., 1951), atribuible a su formación como profesor mercantil previa a su formación biológica (Margalef, R., 1957), y que contribuyó significativamente a su reconocimiento internacional (Sherwin, G.B., Prat y Fornells, N., 2019).

Metodología multivariante de González Bernáldez

Posiblemente, este reconocimiento internacional motivó a González Bernáldez a desarrollar una metodología cuantitativa más adaptada a la vegetación terrestre que superara las limitaciones y el carácter subjetivo de la fitosociología; combinando al respecto el muestreo estadístico cuantitativo de la vegetación (Greigh-Smith, 1964), diferentes técnicas de análisis multivariante (Williams, W.T.; Lambert, J.M. and Lance, G.N., 1966) y uso de los ordenadores más potentes que existían en España, el IBM 360 del Centro de Cálculo del CSIC situado próximo al Instituto de Edafología. Configurando una metodología que hundía sus raíces en la visión biogeográfica y su representación de Humboldt (Humboldt, A., 1805), menos abstracta que el índice de información de Shannon utilizado por Margalef.

Origen y desarrollo de la metodología multivariante

La metodología multivariante partía de una matriz de datos obtenidos por muestreo, a partir de la cual se calculaba una matriz de índices de similitud entre observaciones, cuya estructura se analizaba aplicando técnicas de ordenación y de clasificación.

Metodología que se aplicó inicialmente para estudiar la vegetación de la finca de Rodas Viejas (Salamanca), experimentando el uso de diferentes coeficientes de similitud (correlación lineal, distancias taxonómicas e índices de información de Shannon), que permitió evidenciar las dificultades informáticas generadas por el índice de información de Shannon (García Novo, F.; González Bernáldez, F.; Gil Criado, A., 1967).

Metodología que se aplicó posteriormente al análisis de datos fitosociológicos, combinando el índice de información de Shannon y métodos de clasificación aglomerativos (Williams, W.T.; Lambert, J.M. and Lance, G.N., 1966) que, nuevamente, puso en evidencia las dificultades de cálculo motivadas por el uso del índice de Shannon (González Bernáldez, F., Montserrat, P., Gil Criado, A., 1968). Contribuyendo a que se diferenciaron dos metodologías de análisis cuantitativo: una de carácter abstracto en torno al índice de información de Shannon, adaptada a la fluidez del plancton y a la formación numérica de Margalef; y otra de carácter más biogeográfico centrada en el análisis estadístico multivariante más adaptado a la rígida

estructura de la vegetación terrestre y a la capacidad de análisis gráfico de González Bernáldez.

Metodología multivariante que se aplicó también con éxito, al estudio del clima (González Bernáldez, F., Román Alba, R., Sempere, M.C., 1968) y a la variación morfológica de las poblaciones de *Festuca* (De Nicolás, J.P., González Bernáldez, F., 1971), de *Parnassius apollo* (Marotegui, J.; De Nicolás, J.P.; Jordana, R., 1978) y de la composición química de poblaciones de *Trifolium campestre* a lo largo de un gradiente ambiental (De Nicolás, J.P., Oliver, S. y Morey, M., 1973). Contribuyendo a la consolidación de la metodología multivariante.

Éxitos que consolidaron la metodología multivariante hasta el extremo de aplicarse para evaluar el proyecto de reducir la densidad de encinas en el monte de El Pardo para favorecer el pasto y el uso cinegético concluyendo a partir del análisis de la variación *macro* y *meso* de la vegetación que el proyecto no era adecuado, y no debería desarrollarse (González Bernáldez, F., Morey, M., Velasco, F., 1969),

Además, se experimentó la posibilidad de aplicar la metodología multivariante para el análisis automático del patrón de variación del índice de Shannon de numerosas muestras de plancton tomadas en el mar Caribe aprovechando la velocidad de cálculo de los ordenadores (Margalef, R.; González Bernáldez, F., 1969),.

Ecofisiología de *Trifolium campestre*

Por otro lado, los resultados positivos derivados de la metodología multivariante el análisis de la variación morfológica y ecofisiológica de poblaciones vegetales y animales; así como para analizar la variación de las condiciones del clima y del suelo, contribuyó a que se adoptara como tema de tesis doctoral (De Nicolás, J.P., 1976) el análisis ecofisiológico de la variación de la composición química de *Trifolium campestre* a lo largo de un gradiente altitudinal y ambiental entre el río Tajo (500 m.) y la sierra de Guadarrama (1200 m.).

Procediéndose a muestrear las estaciones encontradas en las que crecían *Trifolium campestre*, tomando muestras de material vegetal y de suelo para determinar en el laboratorio la composición química de la vegetación (Na, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Zn) y las condiciones físicas y químicas de los suelos; así como estimar las características climáticas de las estaciones en función de la altitud y de la orientación

Matriz de datos que se analizó aplicando procedimientos de ordenación y de clasificación (Sneath, P.H.E., Sokal R.R., 1963) que, si bien pusieron de manifiesto una estrecha covariación entre la variación de las poblaciones y de los factores ambientales, debido a la correlación entre las condiciones climáticas y las edáficas a lo largo del gradiente altitudinal, y no permitía precisar si los factores significativos eran los climáticos o los edáficos, optándose por sectorizar el área de estudio para ortogonalizar, en lo posible, el efecto de los diferentes factores ambientales, o diseñar un experimento en condiciones controladas.

Procediéndose a diseñar un experimento multifactorial continuado debido a las dificultades previstas que representaban sectorizar un área tan extensa como el análisis y la previsión del análisis dinámico de la vegetación. Experimento controlado consistente en establecer dos estaciones experimentales en localidades representativas del gradiente ambiental: una en Madrid, a 650 m. de altitud, con condiciones cálidas y áridas; y otra en la sierra de Navacerrada, a 1.100 m. de altitud, con condiciones más frías y húmedas. En cada una de las cuales se cultivaron semillas procedentes de tres *estaciones* representativas del gradiente en tiestos que contenían suelos procedentes de las estaciones muestreadas, obteniéndose 18 tratamientos ortogonales con 5 repeticiones por tratamiento. Cuyos resultados permitían ortogonalizar el efecto de condiciones climáticas, del suelo y de la diferenciación de ecotipos sobre la variación de las poblaciones.

Procediéndose a analizar la matriz de datos aplicando un análisis ANOVA (Sokal, R.R. and Rohlf. F.J., 1987) que permitió determinar la significación estadística del efecto del clima, del suelo, de los ecotipos y de sus interacciones. Que contribuyó a interpretar los resultados del análisis del gradiente ambiental inicial. Si bien al precio de tener que aplicar un complejo proceso de análisis, que llevó a que González Bernáldez me recomendara cursar probabilidad, procesos estocásticos, métodos de muestreo, diseño de experimentos, análisis multivariantes y teoría de la información en la Escuela de Estadística de San Bernardo dirigida por Sixto Ríos. Así como asistir a los cursos de verano de la fundación Gulbenkian sobre Taxonomía Numérica impartido por el Prof. R. Sokal (Sneath, P.H.E., Sokal R.R., 1963), y al curso sobre Biometría impartido por el Prof. R. Rohlf (Sokal, R.R. and Rohlf, F.J., 1969).

Gracias a lo cual pudimos disponer del programa MINT; un generador de programas de análisis multivariante pensábamos nos permitía abordar el análisis de cualquier problema siempre que el número de factores superara varias decenas y su efecto fuera fundamentalmente lineal y de carácter jerarquizado. Pero se fueron evidenciando que en la

mayoría de los problemas ecológicos intervienen factores no recogidos que no pueden resolverse aplicando métodos multivariantes lineales.

Problemas complejos planteados y nueva visión durante la Segunda Guerra Mundial

Problemas complejos no lineales ni jerarquizados que se pusieron en evidencia durante la Segunda Guerra Mundial, al tratar de descifrar los mensajes de las máquinas enigma utilizadas por los submarinos y el ejército alemán para codificar sus comunicaciones; así como mejorar la precisión de los dispositivos antiaéreos utilizados contra los aviones que bombardeaban Londres. Problemas dependían de múltiples factores no lineales y poco jerarquizados que solo se lograron resolver gracias a realizar ingentes inversiones para el desarrollo de los primeros ordenadores (von Newman, J., 1945) así como de la teoría de la comunicación (Shannon, G.E., 1948) y de la cibernética (Wiener, N., 1948).

Logros que, debido a su carácter estratégico, solo se dieron a conocer después de la contienda, entre los años 1946 y 1953, a través de la serie de conferencias anuales de carácter interdisciplinar organizadas por la fundación Macy en Nueva York. En las que participaron, Mc Culloch, neurólogo y cibernético; N. Wiener, creador de la cibernética (Wiener, N., 1948); el matemático von Newman, diseñador del modelo estándar de ordenador; la antropóloga Margaret Mead (Mead, M., 1935); el etólogo y semiólogo Gregory Bateson (Bateson, G., 1972); y el ecólogo C.E. Hutchinson, creador de la ecología moderna (Slack, N. G., 2010).

Autores que no asumían el paradigma científico determinista y analítico heredado del siglo XIX, sino un nuevo paradigma que partía de la visión atómica y molecular de la realidad basada en la termodinámica y de la mecánica estadística de Boltzmann (1964); así como en los principios de la filosofía científica desarrollada por Popper (1934), Kuhn (1962) entre otros autores, que posibilitó el desarrollo de la teoría general de sistemas (Bertalanffy, C., 1968), de sistemas industriales (Forrester, J.W., 1961), de sistemas urbanos (Forrester, J.W. y Collins, 1964), de sistemas sociales (Forrester, J. 1971) y de los ecosistemas (Bateson, G., 1972) y de la biosfera en términos fisicoquímicos (Lovelock, L., 1985) y biológicos (Margulis, L., Sagan, D., 1996).

Contribución de la Unesco a la difusión de la nueva visión

A la difusión de esta información contribuyó la Unesco a través de sus publicaciones, programas y conferencias. Publicaciones que consultaba González Bernáldez en la biblioteca del Instituto de Edafología; programas en los que participaban González Bernáldez, como el Programa Biológico Internacional y el Programa de Zonas Áridas; y conferencias, como la “Conferencia Internacional de Expertos sobre Recursos de la Biosfera” celebrada en París el

año 1968, en la que González Bernáldez intervino como Secretario de la Delegación Española. En la que participó también Emilio Fernández-Galiano, decano de la Facultad de Biología de la Universidad de Sevilla, quien a tenor de las intervenciones de González Bernáldez, promovió la creación de una cátedra de Ecología en la Universidad de Sevilla.

Cátedra que obtuvo González Bernáldez a finales de 1970 incorporándose a la Universidad de Sevilla donde continuó la metodología multivariante iniciada en el CSIC, desarrollando muy pronto nuevas líneas de investigación sobre planificación territorial, conservación y percepción del paisaje.

Investigación sobre ecología cuantitativa en Sevilla

González Bernáldez complementó en la Universidad de Sevilla la metodología de análisis multivariante iniciado en el CSIC; incorporando la sectorización del área de estudio para aumentar el grado de ortogonalización del efecto de los factores ambientales sobre la variación de las comunidades gracias a la sectorización de grandes áreas gracias a la prospección remota para reconocer la jerarquización de los factores ambientales y sectorizar el área de estudio para ortogonalizar en lo posible el efecto de los factores más significativos.

Metodología que aplicó en Sierra Morena, donde los factores ambientales más significativos eran fisicoquímicos y que presentaban un acusado grado de jerarquización (González Bernáldez, F., Pou, A., Ramírez Díaz, L., Sancho Royo, F., Levassor, C., Haeger, J.F., 1976); así como en el área de Doñana, donde los factores más relevantes eran biológicos, su jerarquización era menor, al primar las interacciones recíprocas, que resultaban más difíciles de interpretar (García Novo, F., González Bernáldez, F., Díaz Pineda, F., Merino, J., Ramírez-Díaz, L., Sancho, F., Rodenas, M., Allider, C., Lacoste, A. 1977).

Además, desarrolló unas nuevas líneas de investigación ecológica cuantitativa relacionada con la ordenación territorial en el área de Sevilla (Sancho Royo, F., González Bernáldez, F., 1972) y su relación con el urbanismo (González Bernáldez F., 1973), aplicando una metodología preventiva y adaptativa como respuesta a la complejidad de los problemas (González Bernáldez, F.; Martín de Agar, P.; Rodenas Lario, M.; Sancho Royo, F., 1974) para adaptarse en función de los resultados del Plan General de Ordenación Urbana de la comarca de Sevilla (González Bernáldez, F., García Novo, F., Ramírez Díaz, L., Sancho Royo, F., Merino Ortega, J. 1975), tomando conciencia de la necesidad de disponer de bases de datos con información ambiental sobre las condiciones fisicoquímicas del territorio (González Bernáldez, F., 1976),

así como considerar la percepción del paisaje por la población (Rodenas M., Sancho Royo, F., González Bernáldez, F., 1975). Línea esta que continuó desarrollando en la Universidad Autónoma de Madrid (González Bernáldez, F., Parra, F., 1979).

Planificación territorial en COPLACO

El segundo periodo comenzó al incorporarme al Centro de Información y Documentación del Área Metropolitana de Madrid (CIDAM), en el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, como coordinador del Banco de Datos Ambientales para la elaboración del Plan de Protección del Medio Físico de la Subregión de Madrid. Un gran proyecto de planificación de la subregión de Madrid que contó con la colaboración de González Bernáldez.

Crisis ambiental en Europa. El Club de Roma

Por entonces, la crisis ambiental iniciada en los EE.UU. (Carson, R.L., 1960) comenzaba a evidenciarse también por Europa. Causa de que un grupo de intelectuales fundara el Club de Roma para analizar la nueva situación. Procediendo a encargar, al Instituto Tecnológico de Massachusetts, la realización de un análisis sistémico de la crisis (Meadows, D.H et all., 1972) que puso en evidencia la trascendencia del impacto ambiental sobre el aumento exponencial de la población y de la explotación de los ecosistemas sobre factores ambientales jerarquizados directamente perceptibles y sobre factores menos jerarquizados más complejos de analizar al requerir contemplar múltiples relaciones recíprocas entre factores naturales, culturales y tecnológicos que no manifestaban relaciones lineales sino patrones (patterns) más complejos de percibir de forma analítica, si no se precisaba asumir una visión más integrada que posibilitara la combinación de la perspectiva remota y de los ordenadores.

Actuación de COPLACO

Crisis ambiental que en el caso de España se vio acentuada por la proliferación de grandes infraestructuras relacionadas con el desarrollo económico que contribuyó a que economistas, urbanistas, gestores ambientales y ecologistas presionaran a la Dirección Técnica de Planeamiento Metropolitano (DTPM) del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo para que se adoptaran medidas dirigidas a reducir su impacto ambiental. Optando la DTPMT por encargar al Centro de Información y Documentación del Área Metropolitana de Madrid (CIDAMM) la creación de un *Banco de Datos Ambientales* y, a la Comisión de Planeamiento del Área Metropolitana de Madrid (COPLACO), la redacción de un *Plan Especial de Protección del Medio Físico*; con el asesoramiento de González Bernáldez.

Banco de Datos Ambiental.

Con tal motivo, González Bernáldez me propuso incorporarme al proyecto, como coordinador del Banco de Datos Ambientales que suministrara la información ambiental sobre soporte informático necesario para elaborar un Plan Especial de Protección.

Contratándose a un equipo de climatólogos que recopiló y depuró la información de las estaciones climáticas disponibles en la Subregión de Madrid. Información que posteriormente se interpoló y cartografió utilizando el programa SYMAP en función de las condiciones fisiográficas (sectores, orientación, altitud). Información que permitió publicar un atlas climático con ciento ochenta mapas climáticos (Casado, L.G., De Nicolás, J.P., Mosquera, R.T., 1973) con la idea de información a la población y a los técnicos.

Además, se negoció con la Sección de Cartografía de Suelos del Instituto de Edafología y Fisiología Vegetal de CSIC la elaboración de la Cartografía de Suelos de la Subregión de Madrid, que se suministró cartográficamente a los técnicos urbanistas, pero que, al no publicarse, limitó la participación de la población en el proceso de planificación.

Plan Especial de Protección del Medio Físico.

Para la redacción del Plan Especial de Protección del Medio Físico se contó con un importante equipo multidisciplinar y una metodología en cuyo desarrollo intervino González Bernáldez (González Bernáldez y col., 1973)

Metodología caracterizada por delimitar *unidades ambientales* cruzando unidades geomorfológicas y de vegetación; que se agrupaban posteriormente en *unidades de diagnóstico*, con similar respuesta ante diferentes actuaciones. Para las cuales se estableció la ponderación que se requería aplicar cada característica ambiental y actuación para estimar automáticamente el impacto ambiental previsible. Que posibilitó una gestión preventiva y adaptativa al permitir adecuar los valores de ponderación en función de los resultados.

Metodología que permitió evitar múltiples impactos ambientales que afectaban a factores ambientales jerarquizados (temperatura, precipitación, contaminación, erosión de los suelos) relativamente fáciles de percibir y evaluar; pero no los impactos que dependían de factores escasamente jerarquizados como los derivados del trazado de autopistas próximas a municipios rurales o a zonas urbanas de baja densidad de población (Jacobs, J., 1961). Causa de que municipios con fuerte tradición rural, como Galapagar y algunos otros, evolucionaran

a municipios de *segunda residencia* y, posteriormente, a *barrios rurales*. Resultado de un proceso de realimentación positivo entre la mejora de las comunicaciones y la recalificación del suelo rural a urbano. Contándose con el beneplácito de los propietarios rurales, beneficiados por el aumento del precio del suelo; el silencio de las corporaciones, beneficiadas por el incremento de la contribución; y la pasividad de población general y ecologista, por falta de información suficiente sobre los valores ambientales y culturales afectados (González Bernáldez, F., Herrero, C., Pou A., 1982).

Investigación de los pastizales en la Universidad Autónoma de Madrid

El tercer periodo comenzó con el inicio del estudio de los pastizales de la provincia de Madrid, en el recién creado Departamento de Ecología de la Universidad Autónoma de Madrid, dirigido por González Bernáldez, utilizando la metodología multivariante desarrollada en el CSIC y los procedimientos de sectorización incorporados en la Universidad de Sevilla para mejorar el grado de ortogonalización de los factores fisicoquímicos intervinientes sobre la variación de la vegetación en un área tan extensa.

Metodología multivariante que se complementó con la incorporación del índice de información de Shannon, asumiendo al respecto el enfoque biogeográficos promovido por Pielou (1975), caracterizado por diferenciar varios componentes biogeográficos de diversidad específica (α , β , γ), la amplitud de nichos, (Díaz Pineda F., De Nicolás J.P., Peco B., Ruiz M., González Bernaldez F., 1981); pensándose abordar en un trabajo posterior una visión más integrada sobre el índice de información más próximo a la visión asumida al respecto por Margalef asumiendo un nuevo sistema de principios ligados a la filosofía de la ciencia y a la termodinámica (Fig. 1).

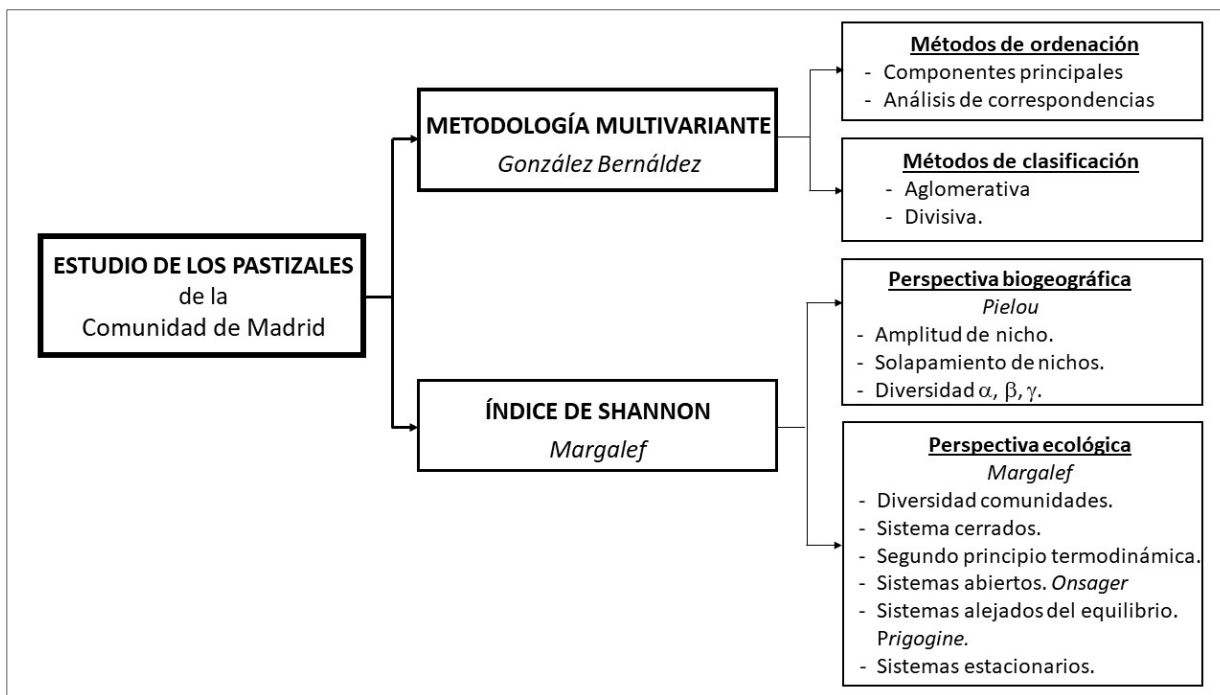


Fig. 1. Metodologías aplicadas en el estudio de los pastos de la provincia de Madrid: *la metodología multivariante* desarrollada por González Bernáldez y uso del *índice de información de Shannon* introducido por Margalef.

Análisis multivariante

Para el análisis multivariante de la vegetación de la Comunidad de Madrid se diferenciaron dos grandes *zonas*: una zona sur, cálida y árida, y una zona norte, más fría y húmeda, que permitía analizar el efecto del clima sobre la variación de la vegetación, gracias a una sectorización previa al muestreo que permitía acentuar el grado de ortogonalización del efecto de los factores analizados. Además, en cada zona se procederá a diferenciar laderas que diferían en el tiempo transcurrido desde su última roturación, que permitían analizar el efecto de la sucesión; así como sectores edáficos dentro de las laderas para evaluar las condiciones edáficas sobre la vegetación.

Pastizales de la zona Sur

Para estudiar la zona cálida y árida, que sobre sustrato arenoso-arcósico formaba paisajes erosionados que era objeto de explotaciones agrícolas, ganaderas y cinegéticas, se seleccionó como localidad representativa la finca Castillo de Viñuelas. Donde se delimitaron cuatro laderas con similar orientación, roturadas hacía 1, 2, 4 y más de 25 años respectivamente, que permitían analizar el efecto de la sucesión sobre la variación de la vegetación. Además, en cada ladera se diferenciaron vaguadas en las que se delimitaron tres

tipos de sectores: sectores superiores, caracterizados por experimentar proceso de erosión; sectores medios, en los que predominaba la erosión del agua y sectores inferiores, caracterizados por la acumulación de humedad y de elementos finos del suelo.

Sectores edáficos que se muestrearon en cada tipo diez *parcelas de muestreo* de 2x3 m. sobre cada una de las cuales se distribuían al azar 20 *cuadrículas de muestreo* de 20x20 cm., en las que se determinaban las especies presentes para determinar la *importancia* de las especies en las parcelas de muestreo, así como las características físicas y químicas del suelo.

Analizándose la matriz de datos obtenida aplicando técnicas multivariantes de ordenación y de clasificación (Sneath, P.H.E., Sokal R.R., 1963). Primero, un análisis de componentes principales que permitió representar la distribución de las *parcelas de muestreo* en el espacio tridimensional definido por los tres primeros componentes principales, que recogían la variación *macro* de la vegetación, atribuible al efecto de la sucesión. Aplicándose después técnicas de clasificación, para describir la variación *meso* de la vegetación, relacionada con la variación de las condiciones edáficas (Díaz Pineda, F., De Nicolás, J.P., Pou, A., F. Galiano, E., 1981). Sin embargo, no se pudieron determinar los factores responsables de la variación *micro* de la vegetación.

Procediéndose para analizar los factores condicionantes de la variación *micro* a realizar un estudio de las relaciones estocásticas entre las poblaciones mediante el teorema de Bayes, que puso en evidencia la presencia de relaciones recíprocas no lineales entre las poblaciones de diferentes especies, no detectadas mediante técnicas multivariantes (De Nicolás, J.P., Quintas M.A., Haeger J.F., Pineda, F.D., González Bernáldez, F., 1980). Metodología que resultaba poco operativa debido al esfuerzo requerido.

Pastizales de la zona Norte

Para el estudio de la zona norte, de clima más frío y húmedo y sobre sustrato granítico formaba paisajes poco erosionados que eran objeto de un aprovechamiento ganadero. En la que se seleccionó como localidad representativa la dehesa de El Congosto, en Galapagar; dedicada a la cría de ganado, que no se había roturado en los últimos cien años. En las que se delimitó una ladera de 40 Ha. con similar orientación que las laderas de la zona sur, en la que, aplicando técnicas de fotointerpretación a diferentes escalas se pudieron diferenciar *sectores edáficos* de diferente tipo que se clasificaron funcionalmente en dos grandes categorías: *sectores superiores*, en los que dominaba la erosión, y *sectores inferiores*, en los que predominaba la acumulación de agua y de elementos finos.

Para cuyo muestreo se delimitaron 10 *parcelas de muestreo* de 2x3 m. en cada categoría funcional, de sectores edáficos, en las que se distribuyeron al azar 20 *cuadrículas elementales de muestreo* de 20x20 cm. para determinar las especies presentes en cada cuadrícula y caracterizar la importancia de los diferentes organismos en las *parcelas de muestreo*, así como las condiciones edáficas físicas y químicas del suelo.

A la matriz de datos resultantes se aplicó un análisis de componentes principales que permitió representar gráficamente la distribución de las *parcelas de muestreo* sobre el espacio tridimensional definido por los tres primeros componentes principales. Procediéndose después a aplicar técnicas de clasificación para analizar la variación *meso* de la vegetación. Encontrándose una estrecha relación con las condiciones edáficas (Ruiz Pérez, M., De Nicolás, J.P., F. Galiano, E., Díaz Pineda, F., González Bernáldez, F., 1979). Sin embargo, no se pudieron determinar los factores determinantes de la variación *micro* de la vegetación; atribuible a depender de múltiples factores bióticos no jerarquizados (horizontales).

Relaciones que se trató de analizar realizando un muestreo “milimétrico” de la vegetación utilizando una cinta métrica, que permitió estimar la *importancia* de las diferentes especies de la comunidad a través de la longitud de la intersección entre las cintas y las diferentes poblaciones; como calcular diferentes índices probabilísticos sobre la relación entre las diferentes especies (Fernández Galiano, E., 1980). Que permitió poner en evidencia las interacciones recíprocas (horizontales) entre diferentes especies, pero que resultaba poco operativa debido al esfuerzo que requería el muestreo.

Utilización del índice de información de Shannon

Debido a las limitaciones del análisis multivariante para el estudio de la estructura *micro* de la vegetación, se pensó en utilizar el índice de información de Shannon aprovechando el respecto el carácter de la estructura de la vegetación de los pastizales, intermedio entre la estructura fluida del plancton y la más rígida de las comunidades leñosas.

Con este fin, se pensó en utilizar los datos recogidos en la finca de El Congosto para la tesis doctoral de Manuel Ruiz Pérez, que ofrecían la ventaja de haber sido analizados aplicando técnicas multivariantes (Ruiz Pérez, M., De Nicolás, J.P., Fernández Galiano, E., Díaz Pineda, F. y González Bernáldez, F., 1979) y estarse realizando en la misma localidad un análisis “micrométrico” de la vegetación herbácea (Fernández Galiano, E., 1980), que ofrecía la posibilidad de comparar estos resultados con los obtenidos al aplicar el índice de Shannon.

Sin embargo, se plantearon dudas sobre cómo utilizar el índice de Shannon para analizar los datos disponibles debido a que el índice de información de Shannon introducido por Margalef para evaluar la diversidad de las comunidades habría diversificado y se utilizaba para evaluar la capacidad de información de un canal, (Shannon, C.E., 1948), para medir la diversidad de las comunidades (Margalef, R., 1957), para clasificar comunidades fitosociológicas (González Bernáldez, F; Montserrat, P; Gil Criado, A., 1968) y para evaluar componentes biogeográficos (Pielou, 1975). Lo cual suscitó una serie de interrogantes para cuya resolución nos reunimos Díaz Pineda, Ruiz Pérez y yo, comentando la posibilidad de aplicar el *teorema de la probabilidad total* sobre el índice de Shannon aplicando a una doble clasificación (especies, condiciones ambientales) mediante la expresión $H(E.P) = H(E) + H(P/E)$, cuyo primer término recogía la diversidad conjunta (especies, parcelas) y el segundo constaba de dos componentes biogeográficos: relacionados con la diversidad específica y con la amplitud de nicho multidimensional (Hutchinson, G.E., 1957) respectivamente. Además, se expuso la posibilidad de calcular la diferencia entre la entropía antes y después de la sectorización que permitía diferenciar zonas, laderas y sectores edáficos y parcelas $H(E.P)$ y $H(E/S)$ para determinar la información resultante mediante la expresión $I = H(E.P) - H(E/S)$, para evaluar los flujos de información ligados a diferentes factores o combinación de factores.

En este contexto, la posterior llegada al departamento del libro de Pielou (1975), en el que analizaba detalladamente la estructura probabilística del índice de información de Shannon y se exponía a la posibilidad de evaluar varios componentes de la diversidad específica (α , β , γ) así como la amplitud y el solapamiento de nichos, que constituía índices conocidos y más fáciles de interpretar que la diversidad ecológica de Margalef, contribuyó a que se optara por elaborar un primer trabajo tomando como referencia la perspectiva biogeográfica de Pielou; dejando para un segundo trabajo el análisis de los datos aplicando la perspectiva más integrada que atribuía Margalef al índice de información de Shannon asumido por Margalef.

Perspectiva biogeográfica de Pielou

En el primer trabajo, se partió del denominado “teorema de la entropía total” para calcular dos diversidades: $H(E.P)$ y $H(E)$, así como la amplitud de nicho mediante la expresión **$A = H(P/E) / \text{Log}_2 \text{n}^\circ. \text{ de parcelas}$** (Pielou, 1975). Cuya variación se analizó a lo largo la sucesión y entre sectores edáficos a lo largo de las laderas y vaguadas. Concluyéndose que ambos componentes de la diversidad específica aumentaban con la sucesión, mientras que la amplitud de nicho (A) y el número de especies especialistas disminuía a lo largo de la sucesión (Díaz Pineda, F.; De Nicolás, J.P.; Ruiz, M., Peco, B. y Bernáldez, F.G., 1981).

Publicación que obtuvo un importante impacto internacional a juzgar las numerosas separatas solicitadas y el hecho de que diferentes autores siguieran el mismo enfoque. Metodología que convendría revisar al haber transcurrido más de treinta años y haberse experimentado grandes avances en el análisis de la estructura *micro* de la realidad. Por lo que se aclaran algunos aspectos como el origen del “teorema de la entropía total”, que no cita Pielou, ni utiliza la misma nomenclatura, a la cual sí hace referencia (Pielou, 1975) al exponer la fórmula utilizada para determinar la amplitud de nicho A.

Perspectiva ecológica de Margalef

Sin embargo, el segundo trabajo que se tenía previsto realizar, utilizando el índice de información de Shannon de la forma más integrada ecológica que lo utilizaba Margalef para analizar la estructura del plancton, desafortunadamente no llegó a realizarse debido a diferentes causas como la dispersión del equipo, al no disponerse sobre la metodología a aplicar más que textos académicos (De Nicolás, J.P., 1980), el incremento exponencial de las necesidades de datos y de los recursos informáticos para este tipo de investigaciones y el reducido conocimiento por los ecólogos de los principios de la mecánica estadística, imprescindible para interpretar la relación entre la estructura *macro*, *meso* y *micro* de las comunidades.

Requerimientos que exigían realizar grandes inversiones solo accesibles a grandes instituciones públicas fuertemente jerarquizadas como las que luchaban contra el cáncer; o empresas privadas como Google, capaces de generar productos rentables a corto plazo con los que financiar investigaciones a largo plazo como el desarrollo de la inteligencia artificial, el reconocimiento de imágenes, el análisis del cambio climático y la gestión de la crisis ambiental que posibilitaron el desarrollo de la inteligencia artificial.

Y contar con equipos humanos formados en el paradigma de la filosofía de la ciencia y de la termodinámica (sistemas abiertos, sistemas alejados del equilibrio, sistemas estacionarios, realidades emergentes) que sirvieran para promover la integración de las ciencias naturales y humanas (Tello, M.M., 2022) como base a una ecología más integrada que toma conciencia de la estrecha conexión del índice de información de Shannon con la termodinámica de Boltzmann y su visión atomista y molecular sobre la realidad, y de las posibilidades interpretativas de la mecánica estadística y la capacidad reguladora de la cibernética (Wiener, N., 1948).

Principios que se habían asumido en diferentes momentos de la historia de la ciencia, como la idea de átomo y la de regulación de la máquina de vapor (Watt, J., 1769), de la economía de mercado (Smith, A., 1776), de la evolución biológica y de la organización de los ecosistemas (Bateson, G., 1972). Que ahora se necesitaba articular de una forma sistemática para configurar una perspectiva más comprensiva de la ecología que incorpore los desarrollos de la ciencia de la complejidad y de la inteligencia artificial, a cuyo desarrollo apuntaban respectivamente las técnicas multivariantes y del índice de información de Shannon.

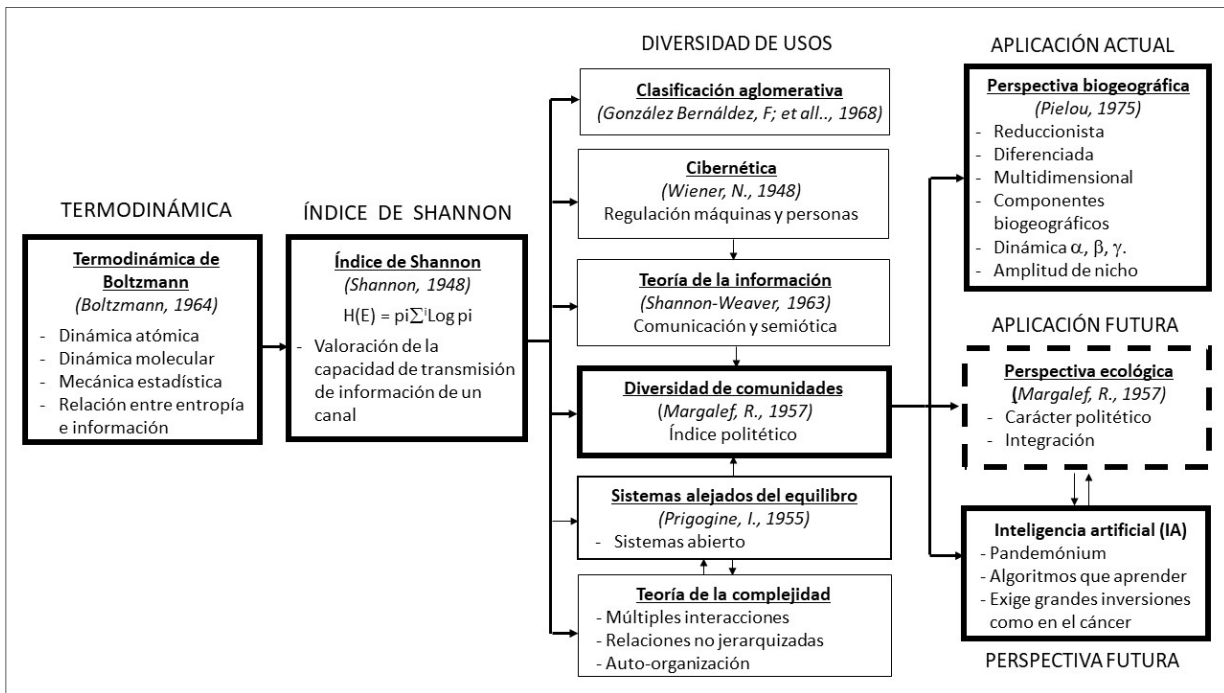


Fig. 2. Recursos termodinámicos y diversificación del índice de información de Shannon: capacidad de un canal de comunicación, teoría de la información, cibernética, sistemas alejados del equilibrio, teoría de la complejidad e inteligencia artificial. Se unen con trazo grueso los ambientes objeto del trabajo. La perspectiva ecológica convendría desarrollarla para la gestión de la crisis ambiental y del cambio climático.

Referencias

- Bateson, G. (1972). *Steps to an Ecology of mind*. Chandler Publishing Company. Trad. cast.: *Pasos hacia una ecología de la mente. Una aproximación revolucionaria a la autocomprensión del hombre*. Lohlé-Lumen (1.998).
- Bertalanffy, von L. (1968). *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. G. Braziller. N.Y.
- Boltzmann, L. (1964). *Lecturas on Gas Theory*. University of California Press, Berkeley.
- Braun-Blanquet, J. (1948). *La Végétation alpine des Pyrénées Orientales, étude de phytosociologie comparée*. Monografías de la Estación de Estudios Pirenaicos y del Instituto Español de Edafología, Ecología y Fisiología Vegetal, 9 (Bot.1) CSIC. Barcelona.
- Braun-Blanquet, J. (1950). *La Végétation des Pyrenees orientales comparée à celle des Alpes*. Monografía del Instituto de Estudios Pirenaicos, 29. Botánica 5. CSIC. Zaragoza.
- Braun-Blanquet, J., (1964). *Planzensoziologie. Grundzüge der vegetations kunde*. Springer Viene. *Tras. cast.: Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales*. Blume. Madrid (1979).
- **Carson, R.L. (1960). *Silent Spring*. Trad. cast. *Primavera Silenciosa*. Grijalbo. Barcelona (1980)
- Casado, L.G., De Nicolás, J.P., Mosquera, M.T. (1980). *Atlas Climático básico de la Subregión de Madrid*. COPLACO 1980.
- De Nicolás, J.P., Martín, A. y Oliver, S., (1972). *Ordenación del "pattern" de variación de la composición mineral de Trifolium campestre y su relación con algunos factores ambientales*. Inv. Pesq., 36: 109-1118
- De Nicolás, J.P., Oliver, S. y Morey M. (1973). *Análisis factorial de la variabilidad climática espacial*. Urania. 227-228: 1-12.
- De Nicolás, J.P. (1976) *Análisis multivariante de la variabilidad nutritiva interpoblacional de Trifolium Campestre Shrb*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
- ** De Nicolás, J.P., Díaz Pineda, F., González Bernáldez, F., (1979). *Interpretation of the evolution of Spanish landscape by means of biological indicators. International workshpo on problems of bioindication to recognize ecological changes occuring in terrestrial ecosystems due to anthropogenic influences*. Halle (Saale, GOR): 111-113
- De Nicolás, J.P., (1980). *Memoria cátedra de Ecología. Concepto métodos fuentes y programa de ecología*. Ministerio de Educación.
- De Nicolás J.P., Quintas M.A., Haeger J.F., Pineda, F.D., González Bernáldez, F. (1980). *Description des Pâturages du Centre de la Península Ibérica au moyen de processus stochastiques. Actes. Symposium Dynamique Végétation. Montpellier: 1-4*

- Díaz Pineda, F., De Nicolás, J.P., Pou, A., F. Galiano, E., (1981). *Ecological succession in oligotrophic pastures of Central Spain*. Vegetatio 44: 165-76.
- Díaz Pineda F., De Nicolás J.P., Peco B., Ruiz M., González Bernaldez F. (1981). Succession, diversité et amplitude de niche dans les pâturages du centre de la Péninsule Ibérique. Vegetatio, 47: 267-277.
- Fernández Galiano, E. (1980). *Detección de pautas de distribución espacial en pastizales*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
- Forrester, J.W., (1961). *Industrial Dynamics*. M.I.T. Press.
- Forrester, J.W. y Collins. (1964). *Urban Dynamics*. M.I.T. Press.
- Forrester, J. (1971). *World Dynamic*. Wriht-Allen Press. Cambridge, Mass.
- García Novo, F.; González Bernáldez, F.; Gil Criado, A., (1967). *Essais d'analyse automatique de la végétation et des facteurs du milieu*. Oe V. Symposium de Flora Europea. Servicio de Publicaciones de la U. de Sevilla: 91-115.
- García Novo, F., González Bernáldez, F., Díaz Pineda, F., Merino, J., Ramirez-Díaz, L., Sancho, F., Rodenas, M., Allider, C., Lacoste, A. (1977). *Doñana. Prospección e inventario de ecosistemas*. Monografía ICONA. Nº 18. Madrid. 250 pp.
- Greigh-Smith, D. (1964). *Quantitative Planck Ecology*. 2ª Ed. Butterwoths, Londres.
- González Bernáldez, F; Montserrat, P; Gil Criado, A., (1968). *Elaboración automática de datos fitosociológico*. Rof. R. Soc. Española H. Nat. (Bio) 66: 151-176.
- González Bernáldez, F., Román Alba, R., Sempere, M.C. (1968). *Analyse factorielle de données climatologiques*. La Méteorologie Française, 2(3): 251-267.
- González Bernáldez, F., Morey, M., Velasco, F. (1969) *Influences of Quercus ilex rotundifolia on the herb layer at the El Pardo fores (Madrid). A multivariate approach to community structure diversity and environmental factors*. Bol R. Soc. Española Hist.Nat. (Biol.), 67: 265:284
- González Bernáldez, F. y De Nicolás, J.P. (1971) *Types de variation chez espèces de Festuca Boissiera*, 19: 193-2000.
- González Bernáldez, F. y col. (1973). *Estudio ecológico de la Subregión de Madrid*. COPLACO. Ministerio de la vivienda de Madrid.
- González Bernáldez F., (1973). *Urbanismo y ordenación del territorio. Aspectos del Urbanismo Sevillano*. Real Academia de Bellas Artes de Santa Isabel de Hungría. Sevilla.: 81-94.
- González Bernáldez, F.; Martín de Agar, P.; Rodenas Lario, M.; Sancho Royo, F., (1974). *Colloque international 'informatique et environnement' arlon – belgique, mai 1974. un systeme dénregistrement et minisation des impacts sur l'environnement: 'irams'*. 9 pp.
- González Bernáldez, F., García Novo, F., Ramírez Díaz, L., Sancho Royo, F., Merino Ortega, J. (1975). *La ecología en el Plan General de Ordenación Urbana de la Comarca de Sevilla*.

- Volumen extraordinario del primer centenario (1871-1971). Real Sociedad Española de Historia Natural, 2: 177-180.
- González Bernáldez, F., (1976). *Bases ecológicas de la ordenación del territorio*. Arbor, 365: 63-79.
- González Bernáldez, F., Pou, A., Ramirez Díaz, L., Sancho Royo, F. Levassor, C., Haeger, J.F., (1976). *Estudios Ecológicos en Sierra Morena*. Monografía ICONA. Nº 8 Madrid. 80 pp.
- González Bernáldez, F., Parra, F., (1979). *Dimensions of landscape preferences from pairwise comparisons. Proceedings. Conf. Our National Landscape*. Incline Village Nevada: 256-262.
- González Bernáldez, F., Herrero, C., Pou A. (1982). *Collado Mediano. Hombre y Naturaleza a través del tiempo*. Diputación Provincia de Madrid.
- Grace, J., Harrison, S., Damschen E., (2011). *Local richness along gradients in the Siskiyou herb flora: R. H. Whittaker revisited*. Environmental Science.
- Humboldt, A. von, (1805). *Geographie des plantes équinoxiales. Tableau physique des Andes et pays voisin*.
- Hutchinson, G.E., (1957). *Conclusion Remarks. Cold Spring Harbor Symponia in Quantitative Biology* 22(0) 415-427.
- Hutchinson, G.E., (1978). *An introduction to population ecology*. Yale University Press.
- Jacobs, J. (1961). *The Death and Life of the Great American Cities*. Random House. New York. *Tra. cast. Muerte y vida de las grandes ciudades*. Capitán Swing. Libros 2015.
- Kuhn, T., (1962). *Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press. Trad. cast.: *La estructura de las revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica (1975).
- Lovelock, J.E. (1979). *Gaia. A New Look at Life on Earth*.
- Lovelock, J.E., (1985). *Gaia. Una nueva visión sobre la vida en la Tierra*. Orbis.
- Marcotegui, J., De Nicolás, J.P., Jordana, R., (1976). *Estructura taxonómica de la variación intraespecífica de *Paranessius apollo**. Muribe, 28: 333-348.
- Margalef, R. (1949). *Una aplicación de las series logarítmicas a la fitosociología*. P. Inst. Biol. Aplicada 6:59 - 72.
- Margalef, R., (1951). *Diversidad de especies en las comunidades naturales*. Inst. Biol. Aplicada. Tomo IX, páginas 5 a 27.
- Margalef, R. (1957). *La teoría de la Información en Ecología*. Mem. Real. Acad. Ciencias Artes Barcelona, 32:373-449.
- Margalef, R., González Bernáldez, F., (1969). *Grupos de especies asociadas en el fitoplancton del mar Caribe (NE de Venezuela)*. Investigación Pesquera, 33(1) : 287-312
- Margalef, R. (1974). *Ecología*. Ediciones Omega. Barcelona.
- Margulis, L., Sagan D. (1996). *¿Qué es la vida?* Tusquets editores.

- Mead, M. (1935). *Sexo y temperamento en tres sociedades primitivas*. Paidós. Sex and Temperament: In 3 Primitive Societies. 1950, New American Library.
- Meadows, D.H et all. (1972). *The limits to Growth*. Nueva York. Trad. cast.: *Los Límites del crecimiento*. Fondo de Cultura Económica (1972).
- Pielou, E.C., (1966). *The measurement of diversity in different types of biological collections*. Journal of Theoretical Biology. 12: 131-144.
- Pielou, E.C., (1969) *An introduction to mathematical ecology*. Wiley. New York.
- Pielou, E.C., (1975) *Ecological diversity* Wiley Interscience Publ. London.
- Pielou, E.C., (1977). *Mathematical Ecology*. Wiley. N.Y.
- Pielou, E.C., (2017). *How to Calculate Species Evenness*. Sciencing.
- Popper, K., (1934). *Logik der Fursehung*. Trad. cast.: *La lógica de la investigación cibernética*. Rei, México, 1991.
- Prigogine, I. (1955). *Thermodynamic of Irreversible Processes*. Thomas Press. Springfield.
- Rodenas M., Sancho Royo, F., González Bernáldez, F., (1975). *Structure of landscape preferences. A study base don large dams viewd in their landscape setting*. Landscape planning, 2: 159-178
- Ruiz Pérez, M., De Nicolás, J.P., F. Galiano, E., Día Pineda, F., González Bernáldez, F. (1979). *Estructura y variabilidad de los pastizales semiáridos en áreas graníticas*. Pastos 9:41-57.
- Ruiz Pérez, M., (1980). *Características de la variación de pastizales en áreas graníticas*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
- Sancho Royo, F., González Bernáldez, F., (1972). *Estructura subyacente de datos urbanísticos de Sevilla*. Ciudad y Territorio, 3: 7-13.
- Shannon, C.E. (1948). *A Mathematical Theory of Communication*. Bell Systema Technical Journal, 27: 379-623.
- Sherwin, G.B., Prat y Fornells, N. (2019). *The Introduction of Entropy and Information Methods to Ecology by Ramón Margalef*. Entropy, 2019. 21,794.
- Slack, N.G. (2010). *G. Evelyn Hutchinson and Invention of Modern Ecology*. Yale University Press.
- Smith, A. (1776) *The wealth of nations*. Trad. cast.: *La riqueza de las Naciones*. Alianza. (2011).
- Sneath, P.H.E., Sokal R.R., (1963). *Principes of Numerical Taxonomy*. Freeman San Francisco.
- Sokal, R.R. and Rohlf. F.J. (1969). *Biometry: Principles and practice of Satisfical in Biological Research*. V.H. Freeman. San Francisco.
- Tello, M.J., (2022). *Orden, desorden y complejidad. Un camino hacia el origen de la vida*. Real Sociedad Española de Física.

- Turing, A.M. (1952). *La base química de la morfogénesis*. Transacciones filosóficas de la Royal Society de Londres, vol. 237, p.37-72.
- Von Newman, J. (1945). *First Draft of a Report on the EDUAC*.
- Wallace, A.L., (1858). On the Tendency of Varieties to Depart Indefinitely From the Original Type. *Proceeding of Linnean Society of London*. 3:53-62
- Watt, J. (1769). *Relato de la invención de la máquina de vapor*. *Philosophical Transactions of the Royal Society*.
- Weaver, W. (1948) *Science and Complejity*. *American Scientist*, 36: 536
- Whittaker, R.H., (1960). *Vegetation of the Siskyou Mountain, Oregon and California*. *Ecological Monographs*, 30: 280-338. <https://orio.org/10.2307/1943563>
- Whittaker, R.H. and W.A. Niering (1965). *Ecology*. 42: 429-452 p.
- Whittaker, R.H., (1972). *Evolution and Mesurament of Species diversity*. *Taxon* 21, 213-251.
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics: or Control and the Comunication in the Animal and de Machine*. MIT Press. 2ª Ed. Matino Publishing. 2013
- Williams, C. B., (1944). *Some applications of the logarithmic series and the index of diversity to ecological problems*. *J. Ecol.*, 32: 1-44.
- Williams, C. B., (1947). A. The logarithmic series and ist application to biological problems. *J. Ecolo.*, 34: 23-272
- Williams, W.T.; Lambert, J.M. and Lance, G.N., (1966). *Multivariate methods in plant ecology*. V. *Similarity analysis and Information analysis*. *J. Ecol.* 54, 427.445.

