

“Hay ocasiones y causas, porques y por qués para todas las cosas”  
William Shakespeare

## 6. INTERPRETACIÓN DE LAS CLASIFICACIONES

**E**l objetivo de los métodos de clasificación es simplificar conjuntos complejos de datos por lo que los resultados que de ellos se obtienen no deben terminar en el dendrograma -como ocurre frecuentemente- sino que deben servir real y objetivamente para que el análisis ecológico proceda con mayor eficiencia. Por ello, los resultados deben ser analizados críticamente y considerar la posibilidad de su posterior refinamiento.

Una vez obtenido el dendrograma a partir de determinadas técnicas es importante analizar su concordancia con la matriz de afinidad original y posteriormente su estructura, pues de este modo podremos evaluar hasta qué punto la organización jerárquica obtenida es adecuada para los datos de la investigación. Tenemos entonces que llegada esta etapa deben responderse dos preguntas claves: ¿Se ajusta globalmente el dendrograma obtenido a la matriz de afinidad? ¿Cuál es la partición más óptima de la jerarquía? A éstas y otras interrogantes daremos respuesta en los epígrafes siguientes.

### Medidas de la bondad del ajuste

Evaluar en qué medida el dendrograma refleja las relaciones originales de afinidad podría denominarse, empleando una expresión de la estadística clásica como la *bondad del ajuste*. Este paso es necesario, tanto si los datos originales se analizan con una sola técnica como con varias, que es lo más recomendable, pues con esto último (que podemos llamar comparación intraclasificatoria), podemos comparar y seleccionar las clasificaciones más adecuadas. Para este fin se han propuesto técnicas que permiten medir el ajuste del dendrograma a los valores de la matriz de afinidad, o lo que es lo mismo medir la distorsión, ya que las relaciones de afinidad son necesariamente distorsionadas al ser llevadas a una representación bidimensional (Crisci y López Armengol, 1983).

Aunque la comparación por examen visual de los árboles es válida, existen métodos cuantitativos basados fundamentalmente en la comparación de los valores de la matriz de afinidad con aquellos que han servido de base para la estructuración del dendrograma. El grado de discrepancia entre ambos valores puede considerarse una medida de la distorsión causada por la imposición de una estructura jerárquica (Krzanowski y Marriott, 1996a). Algunas medidas, resumidas por estos autores y por Krzanowski (1990) son: la suma cuadrática de sus diferencias, la suma cuadrática ponderada, la correlación por rangos y la correlación cofenética, que es una de las más empleadas.

La *correlación cofenética* proviene de la taxonomía numérica (Sokal y Rohlf, 1962) y se basa, como su nombre indica, en calcular el grado de relación a través del coeficiente  $r$  de la correlación

producto-momento que aquí se denomina *coeficiente de correlación cofenético* CCC (“cophenetic correlation coefficient”). A partir de una matriz de afinidad (Fig. 6.1A) se dibuja el dendrograma (Fig. 6.1B), señalando en éste los valores de afinidad en los cuales han tenido lugar las distintas fusiones, según su orden consecutivo de creación. Con ellos, se confecciona una matriz de dimensiones similares a la de afinidad de la cual partimos que será la *matriz cofenética* (Fig. 6.1C), donde las relaciones entre cada entidad vendrán dadas por el valor de afinidad que le corresponda en la jerarquía de la clasificación.

En la matriz de la Fig. 6.1, los valores que relacionan a las entidades AC y DE, que forman grupos particulares es claro que son 0.23 y 0.36, respectivamente. Para ver los valores correspondientes a entidades más alejadas, por ejemplo A y E se asciende por el árbol y se toma el valor que corresponde al nodo superior de unión de dichas entidades, en este caso 0.78. El mismo valor corresponderá a la relación AD, lo cual es típico de las matrices cofenéticas, donde siempre habrá varios valores repetidos.

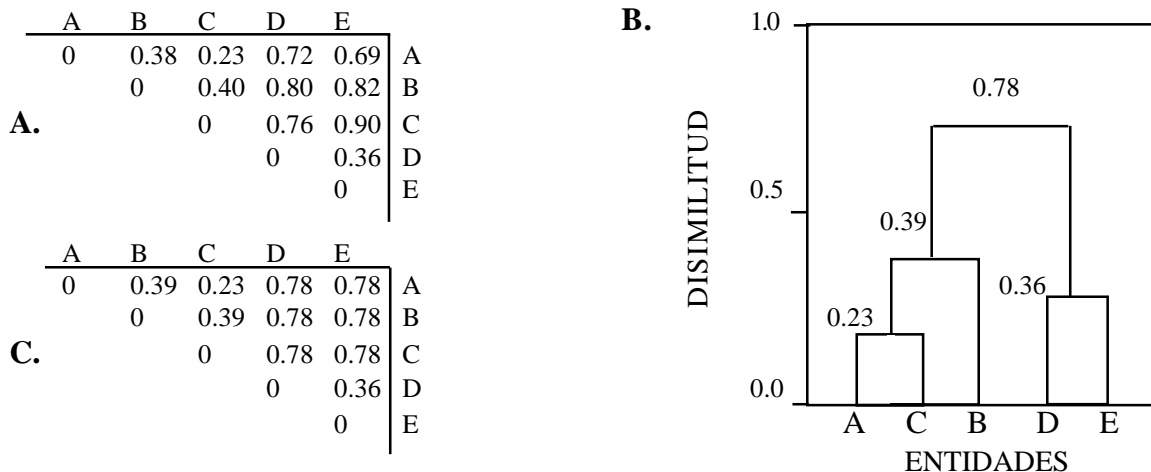


Figura 6.1. Pasos para el cálculo de la bondad de ajuste mediante la correlación cofenética A. Matriz de afinidad original; B. Dendrograma con los valores de disimilitud correspondientes a cada fusión; C. Matriz cofenética.

Empleando la correlación producto momento se relacionan los datos de la matriz de afinidad original con los valores que le corresponden en la matriz cofenética calculándose el coeficiente de correlación  $r$ . Una alta correlación entre matrices será señal de poca distorsión por lo que escogiendo los resultados de la técnica que brinde el mayor valor de  $r$  podemos considerar que las relaciones implícitas en la matriz de afinidad están siendo reflejadas con la mayor fidelidad. Según Sokal y Sneath (1963) valores superiores a 0.8 indican una buena representación de la matriz de afinidad por parte del dendrograma, aunque Rohlf (1970) alertó acerca de que aún valores de 0.90 no garantizaban necesariamente que el dendrograma resumiera adecuadamente las relaciones.

Los métodos de comparación intraclasificatoria se basan generalmente en métodos de correlación y de hecho, si solo nos interesa asumir que las afinidades observadas tienen una significación ordinal puede emplearse simplemente un coeficiente de correlación por rangos en lugar del CCC (Everitt y Dunn, 1991). De cualquier forma debe tenerse claro que un alto valor del coeficiente de correlación

cofenético es solo una medida de poca distorsión en la técnica empleada y no de una buena o mala clasificación (Crisci y López Armengol, 1983). El análisis de la bondad del ajuste o la comparación intraclasificatoria, si comparamos los resultados de varias técnicas, juzga ante todo aspectos metodológicos, para pasar después a la interpretación ecológica.

### **Reglas de decisión**

Un dilema que enfrenta todo el que se encuentra ante los resultados de un árbol de clasificación es la determinación de grupos dentro de la jerarquía. Visto sobre un dendrograma la pregunta sería: ¿qué ramas del árbol pueden ser considerados «grupos» con una afinidad interna razonable? lo que llevado a un lenguaje más común sería: ¿dónde «cortar» el árbol para formar los grupos?

El dilema de una regla de decisión, que en inglés se denomina comúnmente “stopping rule”, es clave ya que en su solución descansa la decisión correcta sobre nuestra estructura grupal. Básicamente pueden cometerse dos errores. El primero ocurre cuando la regla de decisión indica  $n$  grupos y de hecho hay menos, con lo cual se sobreestima el número de conjuntos. El segundo ocurre cuando la regla indica menos grupos con lo cual el número real de éstos se subestima. Aunque la severidad de ambos tipos de error cambia según el contexto del problema, los del segundo tipo pueden considerarse más serios debido a la pérdida de información implícita en la fusión errónea de grupos (Milligan y Cooper, 1985).

En principio la interpretación del dendrograma es un proceso visual simple donde juega un papel importante el conocimiento del sistema ecológico que se estudia. Hasta el carácter de quien interpreta es importante: las personas en extremo convencionales se aferran a su estructura de grupos como a una tabla de salvación. Sin sacar conclusiones *a priori*, aunque las intuyamos, reconoceremos primero los grupos mayores enlazados en los valores más bajos de similitud o correlación; o los más altos de disimilitud o distancia. De ellos derivaremos grupos, subgrupos, conjuntos o subconjuntos hasta definir las asociaciones más adecuadas, sin preocuparnos cuando una entidad constituya un grupo independiente. Es preferible que la técnica empleada aisle entidades con características propias o «extrañas» con respecto al resto a que queden mezcladas alterándonos la homogeneidad interna de su grupo y haciendo pasar inadvertidas sus particularidades.

Una dificultad en este tipo de análisis es que no hay una manera completamente satisfactoria para definir un grupo, aunque siempre tengamos una idea intuitiva de lo que éste significa (Chatfield y Collins, 1992). Precisamente Everitt (1993) considera que el término grupo, conjunto o clase se ha usado esencialmente de una manera intuitiva sin intentar darle una definición formal, lo cual puede no solo ser difícil sino equívoco. Por ejemplo, se ha sugerido como criterio para evaluar el significado de un grupo su valor de uso; si el criterio de grupo brinda una respuesta de valor para el investigador esto es suficiente.

Sin embargo, otros intentos por definir qué es un grupo emplean propiedades como la *cohesión interna* y el *aislamiento externo* lo cual está más cerca de la definición de clasificación que pretende de manera objetiva crear grupos muy homogéneos entre sí y bien diferentes de otros. Esto es lo que

nos dicen Hair *et al.* (1995) cuando explican que los grupos deben poseer una homogeneidad interna muy alta (“within cluster”) y una heterogeneidad externa (“between cluster”) también muy alta.

Un criterio elemental empleado para definir los grupos es dibujar una línea a lo largo del dendrograma, en un nivel dado de afinidad y considerar que todas las ramas que la crucen pueden ser considerados grupos independientes. Este criterio, conocido como *regla fija* debe establecer un nivel arbitrario e invariable de afinidad, asumiendo un cierto «nivel de significación». Bakus (1990) refiere que los ecólogos de latitudes templadas suelen usar un valor de 0.5 mientras que los del trópico, donde la diversidad de especies es mayor han usado 0.25 que da muchos grupos cada uno con pocas especies, aunque esto no constituye una generalidad. A manera de ejemplo, el dendrograma de la Fig. 6.2 muestra una subdivisión empleando como regla fija un valor de 0.5, que da como resultado la creación de ocho grupos, cuatro de los cuales (7, 9, 8 y 11) son entidades independientes.

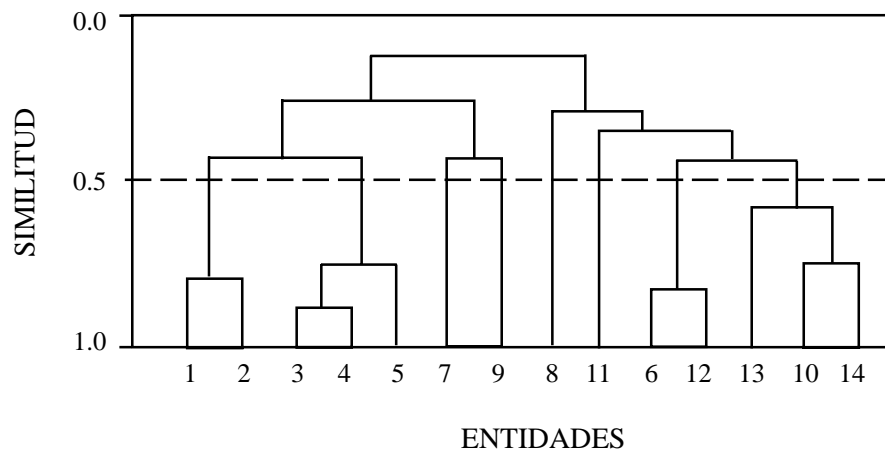


Figura 6.2. “Corte” para formar los grupos según una regla fija, donde se forman ocho grupos.

Un segundo criterio para la definición de grupos es la *regla variable* que no es más que el estudio del dendrograma, en consulta con la matriz original de datos (que en ocasiones se olvida que es en definitiva el punto de partida) para determinar grupos lógicos. Con este criterio dos grupos pueden ser considerados juntos a un nivel de afinidad mayor o menor que un tercero. El dendrograma de la Fig. 6.3 es el mismo de la Fig. 6.2 pero la división se ha realizado mediante una regla variable, delimitándose ahora seis agrupaciones, consideradas a distintos niveles de la jerarquía, donde solo dos (8 y 11) son entidades independientes.

El exámen del dendrograma para establecer una regla visual puede resultar más fácil si se plotean los valores de afinidad -en el ejemplo similitud- contra el número de fusiones en orden creciente. Si el número total de entidades a agrupar es  $n$ , en este caso  $n=14$ , el número de fusiones será  $n-1$ , o sea 13. Según Everitt y Dunn (1991) los cambios bruscos entre niveles de fusión adyacentes podrían ser indicativos de una solución de determinado número de grupos que estará determinado por el número que haya debajo del “corte”; punto donde presumiblemente la distancia entre las unidades del grupo se minimiza y la distancia entre grupos se hace máxima (Griffith y Amrhein, 1991). Ello resume esencialmente el método de la distancia entre grupos de Sharma (1996).

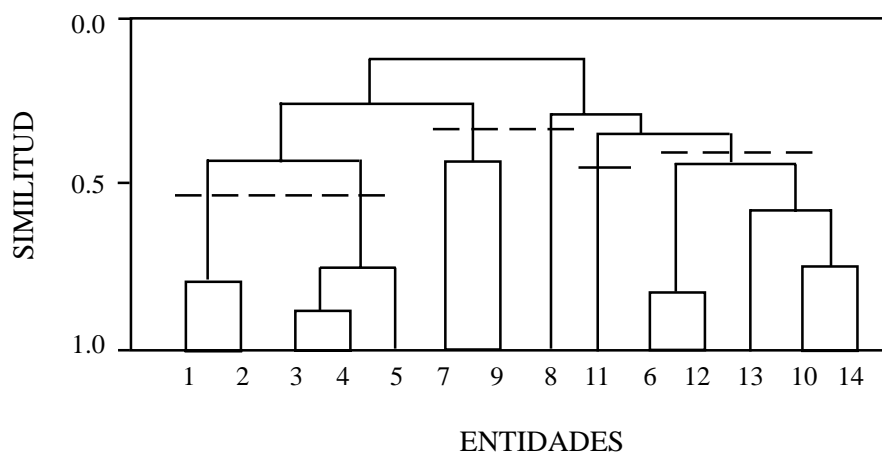


Figura 6.3. “Corte” para formar los grupos según una regla variable, donde se forman seis grupos.

Este ploteo (Fig. 6.4) para los datos hipotéticos del dendrograma de la Figura 6.3 refleja un salto de un valor de similitud de 0.6 a 0.3, a nivel de las fusiones 7 a 9, lo cual sugiere que el número de grupos a decidir debería buscarse a partir de este nivel de similitud que en el árbol de clasificación se corresponde con una solución entre seis y siete grupos.

Aunque se considera que la aplicación de una regla fija implica una menor subjetividad interpretativa de las clasificaciones esto es relativo, pues cuando el nivel de afinidad fijado cambia, pueden cambiar también las agrupaciones. Además, según Boesch (1977), la regla variable tiene dos ventajas básicas. En primer lugar algunas estrategias aglomerativas poseen una estrecha relación entre sus propiedades sobre la distorsión del espacio y el tamaño de los grupos, por tanto no hay justificación para una regla fija cuando la afinidad entre grupos y entidades depende precisamente del tamaño del grupo.

El segundo aspecto concierne a la naturaleza de los datos ecológicos y es particularmente importante en el análisis inverso. La mayoría de las matrices de datos incluyen especies abundantes y especies raras; se necesita por tanto una mayor afinidad para considerar los grupos de las primeras, que para las segundas, cuya probabilidad de ocurrencia es siempre baja.

Un elemento a considerar para definir si los conjuntos corresponden a diferencias reales entre los datos es el análisis de la escala de las agrupaciones. En el caso de un índice de similitud, por ejemplo, estaría justificada una estructura de grupos que variando entre 0 y 1 reflejara conjuntos unidos en valores contrastantes de afinidad en un intervalo amplio.

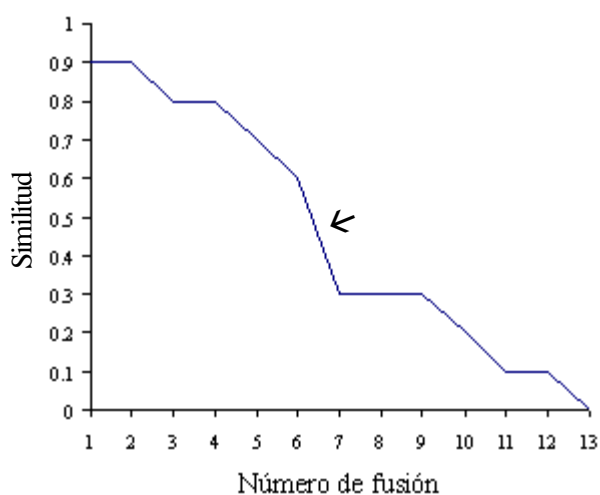


Figura 6.4. Variación de los valores de similitud en los niveles sucesivos de fusión en el dendrograma de la Fig. 6.3. La flecha indica el punto de cambio.

No sería lo mismo, si la escala global de variación de la afinidad entre los grupos integrantes del árbol estuviera entre 0.9 y 1, pues ello indicaría solamente que los datos son prácticamente iguales; o entre 0 y 0.1, que sería un reflejo de datos tan heterogéneos que ninguna estructura de grupos, aunque bien delimitados en el dendrograma, tendría una justificación lógica. El uso de un algoritmo de clasificación inevitablemente da como resultado una clasificación, independientemente de si las clases (de especies o estaciones) son conjuntos ecológicos reales o meramente fortuitos (Pielou, 1977). Esto es válido para cualquier otro tipo de índice, según su escala de variación, aunque reconocemos que en las distancias, al variar entre 0 e  $\alpha$ , este criterio es más difícil.

La estructura de grupos obtenida sugerirá, sin dudas, la mejor opción. Cuando los internodos del dendrograma son claramente de diferentes longitudes delimitando así grupos discretos bien diferenciados, esto debe reflejar la existencia de grupos naturales que pueden ser aislados sin arbitrariedad. Si esto no ocurre será necesario un análisis más cuidadoso para formarlos considerando que en tal caso podríamos estar haciendo una clasificación no natural, denominada *disección* (Pielou, 1984) que se practica cuando tenemos una población homogénea donde no hay agrupaciones naturales y aún así por razones prácticas deseamos dividirla en subgrupos. El número de subgrupos es arbitrario, como lo es el modo de obtenerlos (Chatfield y Collins, 1992) ya que los grupos se eligen por conveniencia sin buscar una solución óptima (Krzanowski y Marriott, 1996a). La selección de una regla de decisión es ante todo una cuestión de interpretación ecológica y en tal sentido la regla variable se ajusta más a la libertad de análisis que debe tener el investigador en la interpretación de sus resultados donde deben jugar un papel fundamental el sentido común, el juicio práctico y la fundamentación teórica del problema (Hair *et al.*, 1995).

Sin embargo, tanto la regla fija como la variable caen dentro de lo que se han denominado métodos “informales” para establecer el número de grupos, que aunque pueden ser suficientes cuando las diferencias entre conjuntos son contrastantes, llevan implícitas la posible influencia de lo que *a priori* se espera de los datos (Everitt, 1993). Existen, por tanto, aproximaciones más formales al problema de la determinación de los grupos que pretenden brindar una regla de decisión automática para eliminar los problemas de la subjetividad humana, de las cuales Sharma (1996) resume algunos puntos de vista.

Pero, sin dudas, el trabajo más importante al respecto, que aún continua siendo un clásico, es el de Milligan y Cooper (1985) que analizan treinta procedimientos provenientes de diferentes disciplinas, escogiendo métodos no restringidos a un tipo de dato en particular, no dependientes del método de agrupamiento y bien desarrollados matemáticamente, con lo cual podemos considerar a su trabajo un buen resumen de los mejores procedimientos registrados hace una década. Los autores concluyen que si bien éstos métodos pueden ser efectivos para determinar el número de grupos en los datos, los resultados varían de uno a otro en cuanto a efectividad y precisión, dependiendo de factores como el número de grupos y su grado de definición.

A través de Arabie y Hubert (1996) podemos conocer las recientes opiniones del propio G. Milligan al solicitársele un resumen del estado actual de las investigaciones en este campo: “Mi actual consejo es emplear dos o tres métodos de mi revisión de 1985; si se hallan resultados consistentes ya hay

apoyo sustancial para seleccionar los grupos; si hay un acuerdo parcial se debe optar por el mayor número de grupos y continuar el trabajo para confirmar cuáles deberían unirse; si no hay consistencia cualquier solución debe ser interpretable dentro del contexto del área de investigación y si no, exhorto a los investigadores a considerar la hipótesis de que no hay grupos en los datos”.

Uno de los métodos mencionados por Everitt (1993) es el de Mojena (1977), ampliamente conocido y que por su sencillez puede servir de ejemplo de como proceden estas técnicas, muchas de las cuales son muy similares en sus procedimientos. A partir de los datos de las fusiones sucesivas de la matriz de afinidad se selecciona el número de grupos donde primero se satisfaga la desigualdad:

$$\alpha_{j+1} > \alpha + k S_{\alpha},$$

donde  $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}$  son los niveles de fusión correspondientes a las etapas  $n, n-1, \dots, 1$  grupos, respectivamente;  $\alpha$  es la media,  $S_{\alpha}$  la desviación estándar y  $k$  una constante que según Mojena (1977) debe variar entre 2.75 y 3.50, aunque Milligan y Cooper (1985) hallaron que un valor de 1.25 era más adecuado.

Como se observa, este método se basa en la comparación de los valores parciales de afinidad respecto a la afinidad promedio. Otras aproximaciones como la que Sharma (1996) denominada RMSSTD del grupo (“root-mean-square total sample standard deviation”) tienen igual principio pero comparan la desviación estándar o la varianza de los grupos en diferentes niveles respecto a estos parámetros para todos los datos buscando que la variación dentro de los grupos sea la menor posible. Altos valores de los estadígrafos de variabilidad indicarían la posible pérdida de homogeneidad del grupo.

Griffith y Amrhein (1991) argumentan con razón que si bien el aspecto numérico impone cierto grado de objetividad a la solución de grupos, existe un amplio componente subjetivo en la evaluación de los resultados de cualquier conjunto de datos relacionado con la selección de las variables, las medidas de afinidad y el algoritmo de clasificación, además de que muchas soluciones son dependientes de los datos y hasta del tipo de muestra.

### **Reasignación**

Al analizar los resultados de la clasificación es frecuente que se detecte que algunas entidades están «fuera de grupo». Quiere esto decir que durante el proceso aglomerativo una entidad ha sido ubicada en un conjunto y sin embargo, de ser ubicada en otro el grupo resultante sería más homogéneo. Tal situación es a veces frustrante para el investigador que espera ver en el dendrograma sus ideas preconcebidas sobre la distribución de los datos, sin embargo no debe ser así. Si analizamos con detenimiento la secuencia de pasos de la clasificación, es claro que son varios los aspectos que pueden influir en la clasificación final.

En las técnicas jerárquicas que proceden por fusiones sucesivas las uniones son irrevocables de modo que cuando el algoritmo aglomerativo ha unido dos individuos no pueden ser posteriormente separados (Everitt, 1993). Por ello Kaufman y Rousseeuw (1990) comentan que los métodos jerárquicos sufren del defecto

de que nunca pueden reparar lo que han hecho en etapas previas. Por ello, ante entidades mal clasificadas se debe volver atrás para reconsiderar la calidad y naturaleza de los datos, las transformaciones efectuadas, los índices empleados (recordemos que estos últimos difieren en sus propiedades matemáticas) y por supuesto las propiedades de los propios métodos de agrupamiento. En el proceso aglomerativo una entidad puede ser captada para un grupo por parecerse solo a un miembro del mismo, quedando «atrapada» en el mismo por una fusión temprana. En tales casos puede pensarse sin temor, en su reasignación.

Los mayores inconvenientes en la interpretación surgen con los llamados grupos de entropía (“entropy groups”) que constituyen grupos de objetos o individuos que no se ajustan a ninguna agrupación (Hair *et al.*, 1995) y son representativos generalmente de datos aberrantes o extremos no detectados en el análisis previo de los datos. En tales casos debemos decidir si constituye un componente estructural válido de la muestra o si debe ser eliminado por su poca representatividad con lo cual el proceso clasificatorio debe reiniciarse sobre nuevas bases.

Claro está que eliminar o cambiar entidades de un grupo a otro puede atentar contra la objetividad del análisis. En este sentido dos criterios son importantes: el matemático, que nos permitirá definir qué particularidad aritmética del proceso ha hecho que la entidad dada halla sido ubicada en tal grupo; y el ecológico que con una perspectiva conceptual justificará porqué dicha entidad no corresponde esencialmente al grupo asignado. Si ambos criterios son bien manejados, la reasignación mediante inspección visual empleando la matriz de afinidad y ajustando los grupos a criterios conocidos sobre la influencia de los factores externos, puede ser practicada sin dudas. Una herramienta sencilla para la reasignación es el análisis nodal, que será tratado más adelante, dada su importancia no solo para reasignar sino también para interpretar.

Boesch (1977) comenta diferentes vías empleadas por varios autores para la reasignación de entidades pero reconoce que es imprescindible el desarrollo de nuevos y más objetivos métodos para este fin. Entre los mencionados está el análisis discriminante que consideramos uno de los más promisorios dado que permite asignar a cada entidad un valor probabilístico de admisión en el grupo propuesto así como excluir las entidades cuya probabilidad sea baja. En tal sentido, el análisis discriminante actúa como verificador de la homogeneidad de cada grupo y como reasignador de entidades, sobre la base de un criterio estadístico.

### **Comparación interclasificatoria**

Cuando hablábamos de los datos cuantitativos, explicábamos que distintos tipos de parámetros ecológicos provenientes de un mismo muestreo pueden brindar clasificaciones diferentes. Bajo determinados propósitos podría ser de interés comparar los resultados entre clasificaciones. El grado de correspondencia entre clasificaciones diferentes de un mismo conjunto de organismos es conocida en taxonomía numérica como congruencia taxonómica, concepto que examina los resultados logrados con distintos caracteres (por ejemplo químicos y morfológicos). En ecología ello equivaldría a analizar en qué se parecen dos matrices de afinidad o dos dendrogramas obtenidos utilizando los datos de densidad y biomasa, por ejemplo y podríamos denominarlo congruencia ecológica.

Conceptualmente esta forma de evaluación de las clasificaciones en taxonomía parte de la premisa teórica de que diferentes caracteres pueden estar controlados por un mismo conjunto de genes y por tanto es de interés examinar si brindan una estructura clasificatoria similar. En ecología, los distintos parámetros comunitarios que sirven de punto de partida a la clasificación generalmente reflejan diferencialmente la influencia de determinados factores bióticos y abióticos y no están necesariamente correlacionados en la magnitud de sus valores, si bien todos responden a una situación ecológica global. Sin embargo, las diferentes clasificaciones pueden brindar información complementaria para evaluar la estabilidad de los resultados (Ignatiadis *et al.*, 1992).

La evaluación de la congruencia ecológica podría arrojar luz sobre la significación de distintos parámetros en la distribución de la comunidad pero su mayor aplicación podría estar en la comparación de clasificaciones entre variables bióticas y abióticas. Este tipo de evaluación se realiza tanto en las matrices de afinidad como en los dendrogramas, para lo cual sirve su comparación visual, métodos de correlación como los ya explicados; o algunos índices que se basan en relaciones entre el número de objetos que se agrupan juntos en las dos clasificaciones comparadas y el número total (Everitt, 1993).

De cualquier forma, al considerar las diferencias entre dendrogramas basados en diferentes medidas de afinidad, la comparación no se puede basar en diferencias menores pues los patrones de relaciones del árbol son solo una representación aproximada de los valores de la matriz de afinidad en la cual se basa y pequeñas variaciones son suficientes para alterar las uniones (Boyce, 1969). Digby y Kempton (1991) proponen la comparación de las matrices de datos reordenadas según los resultados de las clasificaciones. La comparación interclasificatoria puede hacerse más compleja si variamos las medidas de afinidad y las técnicas de agrupamiento buscando comparaciones más representativas pero si se cuenta con las facilidades de cálculo es preferible emplear métodos de ordenamiento.

### **Evaluación de las diferencias entre los grupos**

El objetivo de los métodos de clasificación es brindar una generalización hipotética sobre la estructura de los datos multivariados. Por ello, más que técnicas para el examen de diferencias de hipótesis - más cercanas a la estadística- son esencialmente métodos matemáticos que se usan cuando no tenemos ninguna hipótesis *a priori* y estamos en la fase exploratoria de nuestra investigación (Statistica, 2000). No obstante, puede existir interés de establecer estadísticamente, la realidad de los agrupamientos, y Boesch (1977) comenta algunas aproximaciones.

Por su procedencia de la estadística clásica los coeficientes de correlación al ser empleados como medidas de afinidad, han devenido también en tests de comparación aunque ya discutimos lo inapropiado que esto puede resultar. También, una vez construidos los grupos o creada una hipótesis de agrupación, las posibles diferencias estadísticas entre los valores originales que componen cada conjunto pueden ser evaluados con tests de significación, paramétricos o no paramétricos, mediante la adecuada transformación de los datos, si es necesario. Van Tongeren (1987) recomienda la U de Mann-Whitney como método de distribución libre. Para éste y otros métodos no paramétricos el lector puede consultar a Siegel (1985), que constituye un clásico del tema.

Al margen de cualquier prueba estadística pueden calcularse simplemente los estadígrafos clásicos con fines descriptivos. Así, los grupos pueden ser comparados en sus valores medios, el nivel de solapamiento de sus valores máximos y mínimos o de sus intervalos de confianza, si se calculan la varianza y la desviación estándar, que asimismo nos darán un índice del grado de homogeneidad de nuestros grupos al ser estimadores de la dispersión.

Everitt y Dunn (1991) comentan algunas aproximaciones gráficas que sirven para evaluar la cohesión interna de los grupos, propiedad muy deseable dentro de la clasificación. En esencia estos métodos gráficos se basan en analizar los datos originales, crudos o aplicando algún estadígrafo, dentro de los grupos propuestos. Una prueba estadística valiosa para la evaluación de diferencias entre grupos es el análisis discriminante, cuya utilidad para la reasignación ya discutimos.

En el presente no están desarrollados métodos estadísticos dirigidos específicamente a examinar las diferencias entre grupos, por lo que en primera instancia este juicio corresponde al investigador. Un análisis previo de la matriz de datos (ver Tablas 3.3 y 3.4 en el Capítulo 3) ya podría indicar si su estructura merece ser sometida a un análisis de clasificación, de la misma forma que la escala de variación de la afinidad puede dar un criterio de diferencias entre grupos, como comentamos al hablar de las reglas de decisión.

### **Relación de las clasificaciones con factores externos**

En los estudios ecológicos el interés de formar grupos a partir de la matriz original de datos no es un hecho formal sino que responde siempre a ciertas consideraciones acerca de cómo distintos factores ambientales están haciendo variar la estructura de las comunidades, bien sea en sentido espacial o temporal. Las vías para relacionar los resultados de la clasificación con factores externos (entiéndase variables bióticas o abióticas) están limitadas solamente por la imaginación del investigador (Boesch, 1977).

Criterios sencillos como la mapeación de los grupos para analizarlos visual o estadísticamente respecto a los factores ambientales, los gráficos conjuntos del dendrograma y los valores de las variables correspondientes a cada grupo o la ubicación bajo el árbol de un esquema que resuma el gradiente de variación del factor determinante de la clasificación, devienen en herramientas interpretativas sencillas que además tienen un alto valor para la expresión gráfica de resultados, como ejemplificaremos en nuestro último capítulo.

Una variante útil, lo es también relacionar paralelamente la clasificación de los datos de la comunidad y la de aquellos factores bióticos o abióticos asociados al estudio, para comparar posteriormente la estructura de ambos árboles. Clarke y Ainsworth (1993) proponen calcular la disimilitud de Bray-Curtis con los datos de la estructura de la comunidad y la distancia euclidiana con las variables ambientales, y posteriormente calcular la correlación por rangos entre ambas matrices sometiendo estos resultados al ordenamiento por escalado multidimensional. Para este fin, el interesado puede acudir a varios textos que resumen métodos de presentación de resultados (Digby y Kempton, 1991; Everitt, 1993; Hair *et al.*, 1995).

### Analisis nodal

La matriz original de datos es portadora de una doble información que puede ser revelada realizando el análisis normal e inverso, los cuales brindan aisladamente, información sobre la estructura de grupos de estaciones y especies, respectivamente. Sin embargo, un importante salto en la interpretación de la información se logra cuando relacionamos ambas a través del análisis nodal (ver Boesch, 1977), cuya ejecución ejemplificaremos en la Fig. 6.5.

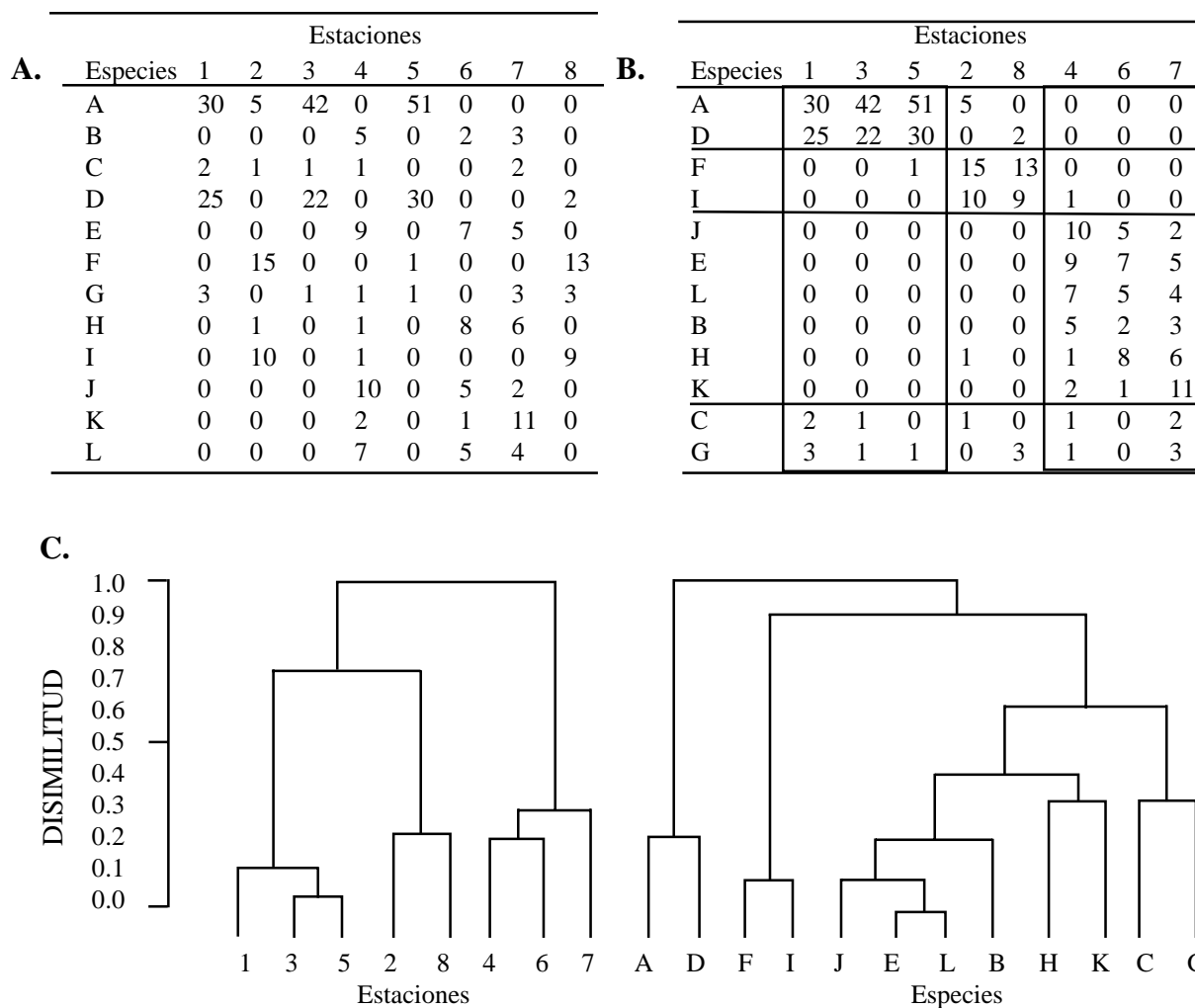


Figura 6.5. **A.** Matriz original de datos. **B.** Matriz de datos reordenada sobre la base de los grupos obtenidos en las clasificaciones. **C.** Dendrogramas de las clasificaciones normal (estaciones) e inversa (especies).

Procedemos entonces a reordenar la matriz original de datos (Fig. 6.5A) sobre la base de las nuevas agrupaciones obtenidas (Fig. 6.5.C), delimitando con líneas horizontales y verticales a través de la tabla, la extensión de los grupos. Este paso definirá los nodos que no son más que pequeñas matrices

dentro de la matriz total donde coinciden exactamente los datos correspondientes a un grupo de especies con un grupo de estaciones. En el ejemplo de la Fig. 6.5B se han delimitado doce nodos. El primero, por ejemplo, relaciona el grupo de las especies A y D con el grupo de las estaciones 1, 3 y 5 donde es claro que la unión responde a una alta abundancia de estas dos especies. El segundo a la derecha, relaciona el mismo grupo de especies con el grupo de estaciones 2 y 8, donde la abundancia de éstas es menor, y el tercero con las estaciones 4, 6 y 7, donde este grupo de especies está ausente.

Con un propósito gráfico la matriz original así subdividida puede ser llevada a un rectángulo con las dimensiones adecuadas y las divisiones correspondientes que representen las relaciones grupos de especies-grupos de estaciones. Como las dimensiones de cada nodo se ajustan al número de entidades de cada grupo de estaciones y especies, ya brinda de entrada una información sobre la riqueza de especies en los conjuntos de estaciones. Dentro de cada nodo, cuya información cuantitativa y cualitativa se conoce, pueden calcularse diferentes índices que expresen el comportamiento de los grupos de especies en los grupos de estaciones. Tal es el caso de la *constancia nodal*, definida como:

$$C_{ij} = A_{ij}/N_i N_j,$$

donde  $A_{ij}$  es el número de ocurrencias de los miembros del grupo  $i$  de especies en el grupo  $j$  de estaciones, y  $N_i$  y  $N_j$  son respectivamente el número de entidades de cada grupo. En otras palabras, la constancia no es más que el número de ocurrencias reales dentro del nodo, dividido entre todas las posibles ocurrencias si el nodo hubiera estado «lleno». Este índice cualitativo varía entre 0, cuando ninguna de las especies del grupo considerado está en el grupo de estaciones que se analiza; y 1 cuando todas las especies están representadas. Multiplicando este valor por 100 la constancia puede ser expresada en porcentajes.

Veamos ahora un ejemplo del cálculo de la constancia pero antes aclaremos que para ello es útil representar en los nodos la composición cualitativa de la tabla (con cruces), pues este índice opera con la información cualitativa (Fig. 6.6). Por ejemplo, calculemos las constancias para los tres nodos superiores, que tienen en común el valor de  $N_j = 2$ , ya que en los tres, el grupo de especies está compuesto por la A y la D, y varían en los valores de número de ocurrencias y número de estaciones de cada grupo:

Nodo izquierdo	Nodo central	Nodo derecho
$A_{ij} = 6$	$A_{ij} = 2$	$A_{ij} = 0$
$N_j = 3$	$N_j = 2$	$N_j = 3$
$C_{ij} = 6/3 \times 2$	$C_{ij} = 2/2 \times 2$	$C_{ij} = 0/2 \times 3$
$C_{ij} = 1$	$C_{ij} = 0.5$	$C_{ij} = 0$

Especies	Estaciones								
	1	3	5	2	8	4	6	7	
A	X	X	X	X					
D	X	X	X		X				
F			X	X	X				
I				X	X	X			
J						X	X	X	
E						X	X	X	
L						X	X	X	
B						X	X	X	
H				X		X	X	X	
K						X	X	X	
C	X	X		X		X		X	
G	X	X	X		X	X		X	

Figura 6.6. Representación de la presencia-ausencia de las especies en la matriz de datos reordenada.

El cálculo de todas las constancias nos daría el gráfico de constancia nodal de la Fig. 6.7 donde se han representado gráficamente los valores del índice calculado dentro de los nodos con una leyenda que explica sus intervalos de variación. Generalmente se establece un gradiente de colores donde los valores más bajos tienen los tonos más claros y los más altos los más oscuros. Al valor de 1, o 100 si la constancia se expresa en porcentajes, se le asignaría el color negro.

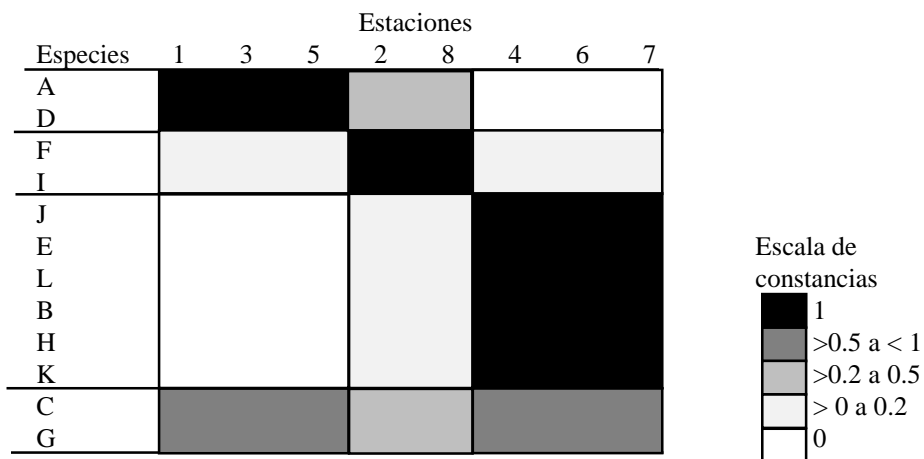


Figura 6.7. Representación gráfica de las constancias calculados a partir de la información de la Fig. 6.6.

Si consideramos ahora no solo el comportamiento del grupo de especies en su grupo de estaciones sino que lo analizamos a lo largo de todos los grupos de estaciones calcularíamos entonces la *fidelidad* que da una medida del grado en el cual las especies “seleccionan” o están limitadas a determinadas estaciones. La fidelidad se obtiene dividiendo la constancia para un nodo entre la constancia para todos los conjuntos de estaciones. o sea:

$$F_{ij} = \frac{A_{ij}}{N_i} \frac{N_j}{\sum A_{ij} / N_i \sum EN_j}$$
$$F_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum N_j} \frac{N_j}{\sum A_{ij}}$$

El análisis nodal puede ser un último eslabón del proceso clasificatorio que permite extraer el máximo de información de la matriz original de datos y complementar además la interpretación aislada de las clasificaciones normal e inversa. Recordemos su importancia para la reasignación ya que al encerrar de manera global la información de toda la tabla, y de manera aislada la subdivisión de los valores originales por grupos, permite un análisis más objetivo acerca de la distribución de las entidades.