Introducción al Análisis Espacial de Datos en Ecología y Ciencias Ambientales: Métodos y Aplicaciones

FERNANDO T. MAESTRE
ADRIÁN ESCUDERO
ANDREU BONET
(editores)

ECESPA

A E E T

Servicio de Publicaciones

Dykinson, S.L.

CEMACAM Font Roja-Alcoi
CENTRO EDUCATIVO DEL MEDIO AMBIENTE
Alcoi - Alicante

CAM Caja Mediterráneo
OBRAS SOCIALES

Todos los derechos reservados. Ni la totalidad ni parte de este libro, incluido el diseño de la cubierta, puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico. Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, *www.cedro.org*) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

© Copyright by
Universidad Rey Juan Carlos
Servicio de publicaciones
Los autores
Madrid, 2008

Editorial DYKINSON, S.L.
Meléndez Valdés, 61 - 28015 Madrid
Teléfono (+34) 91544 28 46 - (+34) 91544 28 69
e-mail: info@dykinson.com
http://www.dykinson.es http://www.dykinson.com

ISBN: 978-84-9849-308-5
Depósito Legal:

Preimpresión:

Besing Servicios Gráficos, S.L.
besing@terra.es

4

Análisis espacial mediante índices de distancia (SADIE)

FERNANDO T. MAESTRE

Área de Biodiversidad y Conservación, Departamento de Biología y Geología, Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología, Universidad Rey Juan Carlos, C/ Tulipán s/n, 28933 Móstoles, España. E-mail: *fernando.maestre@urjc.es*

JOSÉ L. QUERO

Grupo de Investigación Ecología Terrestre, Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada. Avda. Fuentenueva s/n 18071, Granada, España. E-mail: *jlquero@ugr.es*

RESUMEN

SADIE es una herramienta para el análisis de datos espacialmente explícitos en una o dos dimensiones (ej. transectos y superficies) basada en índices de distancia. Aunque ha sido específicamente diseñada para el análisis de conteos (p. ej. número de insectos por planta), SADIE puede utilizarse además con datos binarios y variables ordinales y continuas previamente categorizadas. Entre las principales virtudes de SADIE se encuentran su simplicidad de uso –existe software gratuito e intuitivo para realizar todos los análisis–, su sencilla base matemática, la utilización de tests estadísticos para evaluar la significación de los patrones espaciales observados y la posibilidad de representar visualmente los resultados obtenidos con su aplicación, lo que facilita enormente su interpretación. Otras características de interés de SADIE son el hecho de que tiene en cuenta la localización espacial de los datos, éstos no necesitan seguir ninguna distribución determinada y los resultados obtenidos están condicionados únicamente por la heterogeneidad presente en los datos. Utilizando una serie de índices de distancia, SADIE permite caracterizar el patrón espacial de una variable dada dentro de la zona de estudio (distinguiendo fundamentalmente tres tipos de patrón espacial: agregado, regular o aleatorio) y estimar la contribución de cada punto de muestreo al patrón espacial global. SADIE tam-

bién permite evaluar estadísticamente los patrones de asociación/disociación espacial de dos variables en la zona de estudio, siempre que los datos de ambas hayan sido tomados en las mismas coordenadas, y generar índices de asociación/disociación local para cada punto de muestreo que pueden ser representados gráficamente mediante mapas.

En el presente capítulo se describen los fundamentos matemáticos de SADIE y los distintos índices que produce este método para cuantificar el patrón espacial de variables individuales y de pares de variables, y se ejemplifica su uso con datos reales procedentes de varios estudios realizados en ecosistemas semiáridos ibéricos durante la última década. Asimismo, se proporcionan distintos consejos prácticos y recomendamentes para utilizar SADIE correctamente, así como las limitaciones de esta técnica, y se ilustra cómo puede emplearse en un contexto multivariable. Por último se realiza una revisión sobre los distintos programas disponibles para utilizar SADIE, así como una sucinta descripción de las principales páginas web sobre esta metodología.

4.1. INTRODUCCIÓN

Los datos en forma de conteos (p. ej. número de insectos por planta, de individuos de una planta por cuadrado de muestreo o de semillas por muestra de suelo) constituyen una de las principales fuentes de información que se obtienen en numerosos estudios ecológicos. Las características numéricas que suelen presentar, como su elevado número de ceros y su distribución de Poisson, hacen que la utilización de técnicas que requieran estacionaridad en la varianza o una distribución normal de los datos, como la geoestadística, no sea muy apropiada para su análisis. En las últimas dos décadas, el Dr. Joe Perry y su equipo de colaboradores, de la Estación Experimental de Rothamsted (Reino Unido, Fig. 4.1), han desarrollado un interesante método para el análisis espacial de conteos denominado SADIE (Perry y Hewitt 1991, Perry *et al.* 1996, Perry 1995a, 1998, Perry *et al.* 1999), curioso acrónimo proveniente del inglés "Spatial Analysis by Distance Indices".

Pese a que SADIE fue inicialmente concebido para el análisis espacial en entomología, siendo los insectos el principal objeto de análisis utilizando esta técnica (p. ej. Perry 1995a, Winder *et al.* 1999, Holland *et al.* 1999, Ferguson *et al.* 2000, Korie *et al.* 2000, Winder *et al.* 2001, Thomas *et al.* 2001, Cocu *et al.* 2005, Blackshaw y Vernon 2006), en los últimos años ha llegado a ser un método bastante popular entre ecólogos pertenecientes a otras disciplinas científicas

Figura 4.1. *El autor de SADIE, Joe Perry (derecha), junto a Fernando Maestre (centro) en la estación Experimental de Rothamsted. Foto tomada en septiembre de 2003 por Sophie Perry.*

(Tabla 4.1). Así, se ha empleado con éxito en el análisis espacial de propiedades edáficas (Maestre y Cortina 2002, Yankelevich *et al.* 2006), musgos y líquenes edáficos (Maestre 2003a, 2003b; Maestre *et al.* 2005b), hongos patógenos de plantas (Turechek y Madden 1999, 2000), virus vegetales (Perry 1998), plantas vasculares (Perry *et al.* 1995b, Maestre *et al.* 2003a, 2003b), lombrices (Rossi 2003) y nematodos (Perry 1998, Perry *et al.* 1996). Asimismo, también ha sido utilizado para el análisis espacial de procesos como la mortalidad de plántulas de especies forestales (Maestre *et al.* 2003c), las interacciones planta-planta (Zúñiga *et al*., 2005), las interacciones depredador presa (Bohan *et al*., 2000, Winder *et al.* 2001), las relaciones espacio-temporales entre el patrón espacial y la abundancia de las poblaciones de una especie de mariposa (Conrad *et al.* 2006) y los efectos de distintos tratamientos experimentales en la estructura genética de poblaciones de plantas (Kleijn y Steinger 2002).

El número de artículos científicos en los que se utiliza SADIE ha ido incrementándose de forma paulatina durante la última década (Fig. 4.2). La versatilidad y sencillez de uso pueden ser dos características clave que expliquen la expansión de esta herramienta de análisis espacial en distintas disci-

Tabla 4.1. *Ejemplos de artículos incluidos en la base de datos Science Citation Index en los que se que ha usado SADIE como herramienta para abordar el estudio de patrones espaciales de organismos y procesos en distintas áreas de conocimiento.*

Área de conocimiento*	Problema estudiado	Fuente
Biología vegetal	Epidemiología temporal y espacial de un hongo	Benson et al. 2006
Zoología	Distribución espacial de dos moluscos terrestres	Bohan et al. 2000
Agricultura	Impacto de un insecticida en la distribución espacial de artrópodos	Holland et al. 2000
Ciencias Forestales	Dinámica espacial de hongos descomponedores de la madera en un bosque boreal	Komonen 2005
Micología	Patrón espacial de líquenes edáficos en ecosistemas semiáridos	Maestre 2003b
Entomología	Asociación espacial de lombrices con el ambiente	Park & Tollefson 2006
Agronomía	Asociación espacial de hongos patógenos en cultivos	Turecheck & Madden 2000
Oceanografía	Patrón espacial del plancton	Skebo et al. 2006
Ecología	Dinámica espacio-temporal de la interacción depredador-presa	Winder et al. 2001
Edafología	Estudio sucesional de una comunidad edáfica	Yankelevich et al. 2006

* Categorías establecidas para las revistas científicas incluidas en el "Science Citation Index" (*http://portal.isiknowledge.com/portal.cgi?SID=Z4iNInab9PHC35FlG6i*)

plinas científicas. Entre las principales virtudes de SADIE se encuentran su simplicidad de uso, su sencilla base matemática y la utilización de tests estadísticos para evaluar la significación de los patrones espaciales observados, así como la extensiva utilización de información visual complementaria que facilita la interpretación de los resultados obtenidos con su aplicación. Otras características de interés de SADIE frente a otras aproximaciones existentes son el hecho de que tiene en cuenta la localización espacial de los datos (Perry 1998), éstos no necesitan seguir ninguna distribución determinada (Bell

1998) y los resultados obtenidos están condicionados únicamente por la heterogeneidad presente en los datos (Bell 1998).

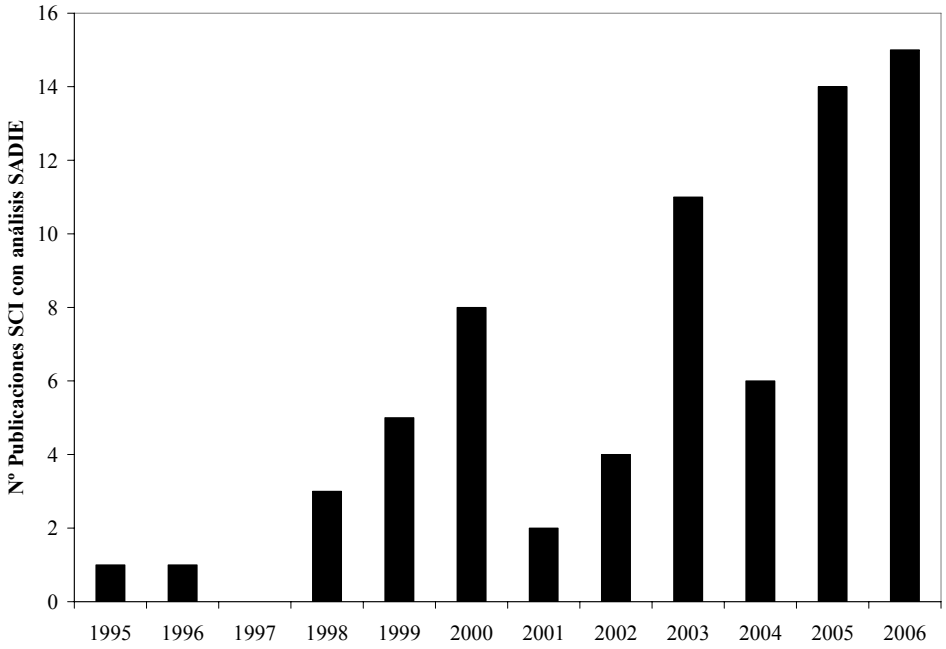


Figura 4.2. *Distribución por año del número de artículos en revistas científicas internacionales incluidas en el "Science Citation Index" (SCI) que han utilizado la metodología SADIE desde 1995 (70 artículos en total). Fecha de Búsqueda: 07/12/06; términos de busqueda: "spatial analysis by distance indices" or "SADIE".*

En su desarrollo actual (Perry *et al.* 1999, Winder *et al.* 2001, Perry y Dixon 2002), SADIE permite analizar el patrón espacial de variables individuales y de pares de variables tomadas en las mismas coordenadas, que bien puede reflejar el análisis de una misma variable a lo largo del tiempo (p. ej. Conrad *et al.* 2006) o el análisis de dos variables de los que se disponen datos para las mismas coordenadas (p. ej. Maestre y Cortina 2002). En este capítulo se introducen las principales características de SADIE, se describen los distintos pasos a dar para analizar patrones espaciales utilizando esta técnica, se discuten algunos aspectos prácticos de interés para su uso y se ejemplifica éste utilizando datos reales tomados de estudios realizados en ecosistemas mediteráneos. Por último, se introduce el software necesario para utilizar esta técnica y se revisan las principales fuentes de información sobre SADIE disponibles en internet.

4.2. ANÁLISIS DEL PATRÓN ESPACIAL DE VARIABLES INDIVIDUALES

A grandes rasgos, una variable determinada puede tener fundamentalmente tres tipos de patrón espacial: agregado, regular o aleatorio (véase la Fig. 1.2; nótese que un patrón en gradiente puede considerarse como una forma particular de agregación). Utilizando una serie de índices de distancia, y apoyándose de forma importante en representaciones gráficas, SADIE permite caracterizar el patrón espacial de una variable dada dentro de la zona de estudio, así como estimar la contribución de cada punto de muestreo al patrón espacial global. En este apartado se presenta de una forma sucinta la base matemática subyacente al cálculo de los principales índices, un aspecto que es importante conocer para poder interpretar de forma adecuada los resultados producidos por SADIE, así como para evaluar las ventajas e inconvenientes de esta técnica.

4.2.1. Caracterización del patrón espacial en la zona de estudio: El índice I_a

SADIE caracteriza el patrón espacial de la variable objeto de estudio (p. ej. individuos de un insecto o de una planta) estimando el mínimo esfuerzo que sería necesario para obtener una distribución regular donde todas las unidades de muestreo tienen el mismo valor (Perry 1998). En la práctica, este esfuerzo equivale a la distancia a la regularidad, *D*. Generalmente, cuanto mayor es *D*, mayor agregación espacial hay en los datos. Para ilustrar la obtención de *D* se presenta un ejemplo a continuación. En este ejemplo se analiza con SADIE el patrón espacial de una especie en una malla de 3 × 3 m (Fig. 4.3A). Existen 36 individuos y nueve unidades de muestreo (o celdas) dispuestas en forma de malla regular, por lo que para conseguir una distribución completamente regular cada celda debería tener cuatro individuos, es decir, la media de la variable objeto de estudio. Lo primero que hay que hacer es identificar las celdas que tienen unas abundancias superiores e inferiores a este valor, representadas en la Figura 4.3B como las que tienen individuos en blanco y un número negativo respectivamente. SADIE utiliza un algoritmo de transporte (Kennington y Helgason 1980) para encontrar la manera óptima de igualar el número de individuos en todas las celdas minimizando la distancia total que éstos tie-

nen que recorrer. Este algoritmo se basa en la existencia de flujos de individuos y fracciones de individuos desde unidades muestrales "donantes", que son aquellas con valores (de la variable objeto de estudio) superiores a la media, hacia unidades muestrales "receptoras", con valores inferiores a la media. El resultado final es que todos los puntos de muestreo tienen el mismo número de individuos (Fig. 4.3C).

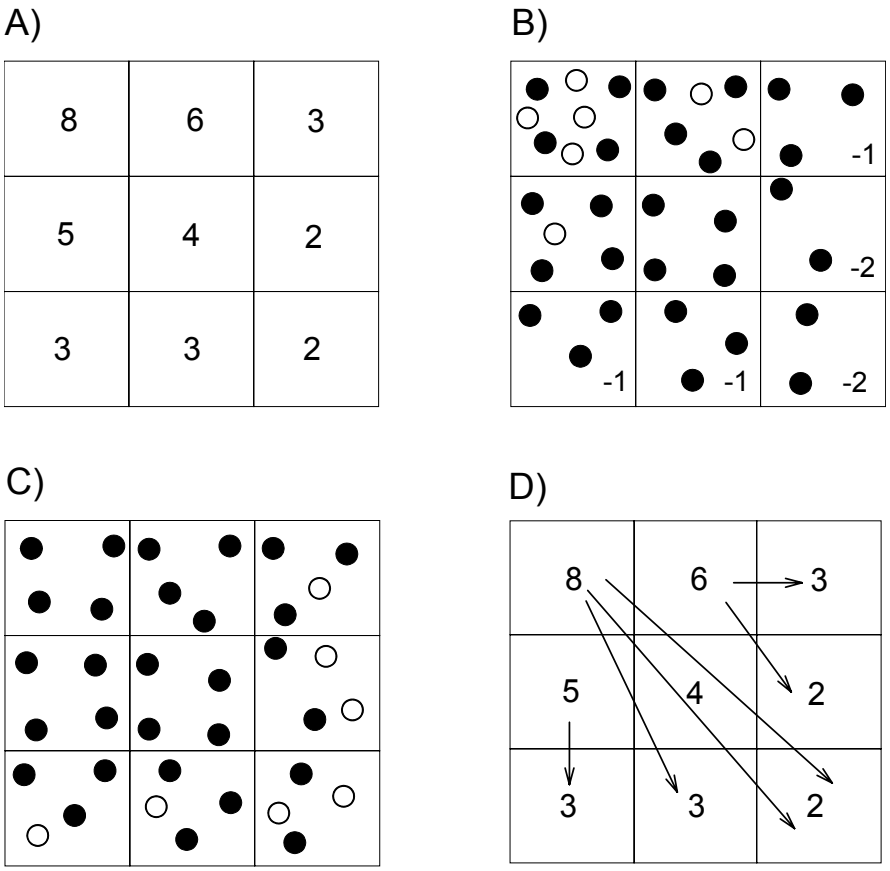


Figura 4.3. *Representación del número de individuos presente en cada unidad de muestreo (A) y de las celdas que tienen más o menos individuos que la media (B). Utilizando un algoritmo de transporte, SADIE redistribuye los individuos desde las celdas que tienen un número de invididuos mayor que la media (4 en este ejemplo) hacia las que tienen un número menor, de forma que al final todas las celdas tienen el mismo número de individuos (C). Las unidades que se han desplazado se representan como un círculos blanco. Los flujos desde las celdas con más individuos que la media se encuentran representados por las flechas en el panel D.*

En la Figura 4.3D se muestra un gráfico denominado "inicial y final", que proporciona una aproximación intuitiva al patrón espacial presente en los datos. Los flujos (flechas en la figura) se producen desde las zonas donde la densidad de individuos es relativamente elevada (gráfico de la izquierda, esquina superior izquierda) hacia el resto de áreas donde ésta es relativamente pequeña. Si se toma como unidad unitaria la distancia entre el centro de dos celdas consecutivas puede calcularse la distancia total que se han desplazado los individuos en la zona de estudio, denominada distancia a la regularidad (D), que representa el mínimo esfuerzo requerido para cambiar el patrón espacial observado hacia un patrón regular donde todas las celdas tienen el mismo valor. En este ejemplo, y asumiento que la distancia entre celdas vecinas es uno, $D = 13{,}54$. Este valor representa la mínima distancia requerida para cambiar la disposición original de los datos hacia una disposición completamente regular donde todas las unidades de muestreo tienen el mismo número de individuos.

Para calcular la significación estadística del valor observado de D y, por consiguiente, si la distribución espacial observada difiere de la aleatoriedad, SADIE realiza un test de permutaciones (véase Legendre y Legendre [1998], páginas 26-28 para una introducción general sobre este tipo de tests, así como Manly [1997] para un tratamiento en profundidad de los mismos). En esta prueba estadística, los datos son distribuidos al azar entre los puntos de muestreo un determinado número de veces, usualmente varios cientos o miles, calculándose D con cada uno de estos cambios y obteniendo así su distribución de frecuencias (Fig. 4.4). La división del valor observado de D por el valor medio obtenido a partir de las permutaciones produce un índice de agregación (traducción libre de su denominación en inglés, "index of aggregation") o I_a, que es utilizado para describir el patrón espacial de los datos (Perry 1998, Perry *et al.* 1999). Usualmente, los datos muestran una distribución agregada si $I_a > 1$, aleatoria si $I_a = 1$ y regular si $I_a < 1$ (Perry *et al.* 1999). Para establecer la significación estadística del patrón espacial observado, se calcula la proporción de valores de D obtenidos en las permutaciones que son iguales o mayores que el valor observado (P_a, Legendre y Legendre 1998). En el ejemplo que se representa en la Figura 4.4, I_a tiene un valor de 1,91 y una $P_a < 0{,}001$, indicando la presencia de un patrón espacial agregado altamente significativo.

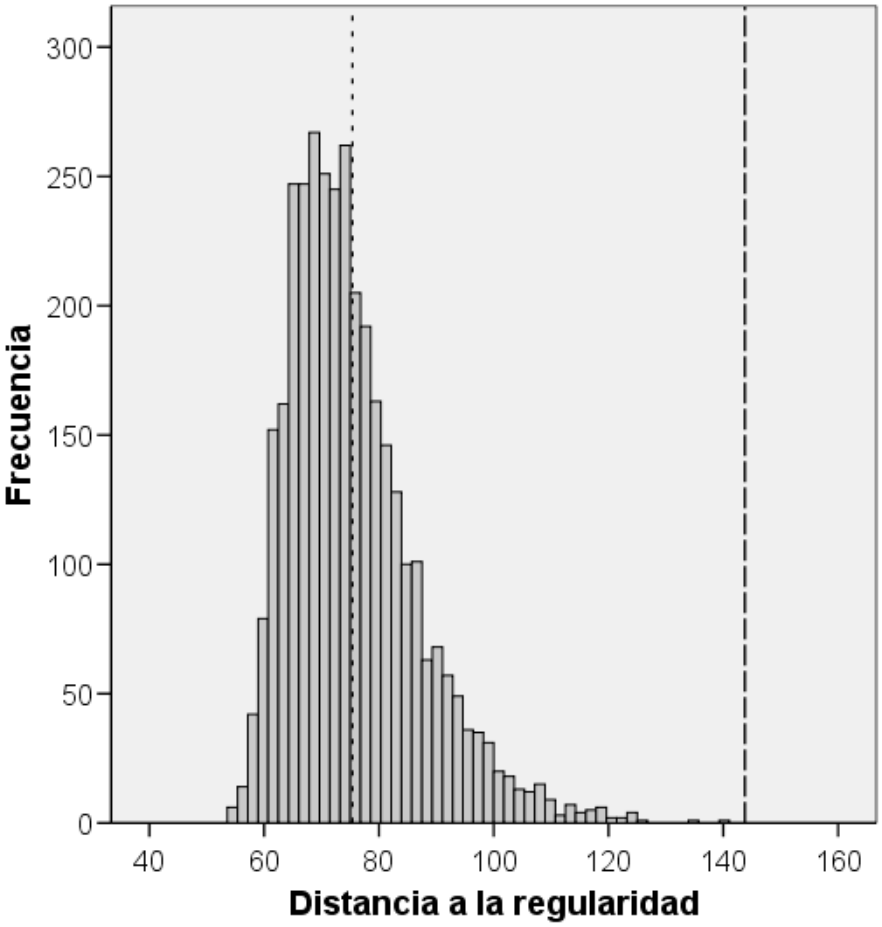


Figura 4.4. *Distribución de frecuencias de los valores de la distancia a la regularidad obtenidos durante las permutaciones del análisis de la distribución espacial de un líquen edáfico (*Diploschistes diacapsis*) en una parcela de 50 × 50 cm situada en una zona gipsícola de la Comunidad de Madrid. El valor observado de* D *es de 143,76 (línea vertical de la derecha), mientras que la media de las permutaciones es de 75,39 (línea vertical de la izquierda).*

4.2.2. Contribución de las unidades de muestreo al patrón espacial global: El índice *v*

El índice de agregación, I_a, proporciona una medida general del patrón espacial para un conjunto de datos e indica la naturaleza de dicho patrón, así como su significación estadística. No obstante, I_a no recoge todas las características del patrón espacial de la variable objeto de estudio. Así, no proporcio-

na evidencia de si un punto de muestreo concreto que tiene un valor de cobertura elevado o bajo, formando parte, respectivamente, de una mancha o "patch" (zona con valores de la variable superiores a la media) o de un claro o "gap" (zona con valores de la variable inferiores a la media), o si se distribuye al azar (Perry *et al.* 1999). SADIE permite obtener dicha información mediante otro índice, el índice de agrupación –traducción libre de "index of clustering" (Perry *et al.* 1999)– o v, que cuantifica el grado en el que cada unidad de muestreo contribuye al patrón espacial global de los datos, permitiendo a su vez delimitar espacialmente la presencia de manchas y claros.

Para ilustrar el cálculo de v se va a utilizar como ejemplo la distribución espacial de individuos de una especie de insecto en una malla regular de 5 × 5 m (Fig. 4.5A). La media de los datos reflejados en esta figura es 4,92. El gráfico "inicial y final" de estos datos muestra las unidades con valores por encima y por debajo de 4,92 en letra normal y cursiva, respectivamente (Fig. 4.5B). La impresión general que produce este patrón espacial es la existencia de una tendencia de la zona NE a la SW de la cuadrícula. La unidad de muestreo señalada con un círculo, de coordenadas 10, 15 (x, y), se va a denominar a continuación como unidad "A" (Fig. 4.5C). La media para el conjunto de datos es de 4,92, por lo que la magnitud del flujo total que sale de "A" es 10 - 4,92 = 5,08. El algoritmo de transporte encuentra la distancia mínima a la regularidad y divide este flujo en cuatro unidades (Fig. 4.5C): 1,56 hacia la unidad "B", con coordenadas 0, 10 (x, y), 1,92 hacia la unidad "C", con coordenadas 0,5 (x, y), 0,68 hacia la unidad "D", con coordenadas 0, 0 (x, y) y 0,92 hacia la unidad "E" situada en 5, 10 (x, y). La magnitud del flujo que va desde "A" a "B" se denomina υ_{AB}. De forma análoga, la distancia entre ambas unidades de "A" a "B" se designa como d_{AB} (Fig. 4.5C).

La distancia media de flujo desde "A", ponderada por la magnitud de los flujos individuales, se utiliza como base para calcular un índice de agregación para la unidad "A", Y_A. Si se considera una unidad A donante que tiene un flujo de unidades hacia n unidades receptoras, la distancia media de flujo, Y_A, se calcula como (nomenclatura y formulación conforme a Perry *et al.* 1999):

$$Y_A = \frac{\sum_n d_{AZ}\upsilon_{AZ}}{\sum_n \upsilon_{AZ}} \qquad (4.1)$$

donde υ_{AZ} es el flujo hacia la unidad receptora Z y d_{AZ} es la distancia de este flujo, $[(x_A\text{-}x_Z)^2 + (y_A\text{-}y_Z)^2]^{1/2}$, siendo x e y las coordenadas bidimensio-

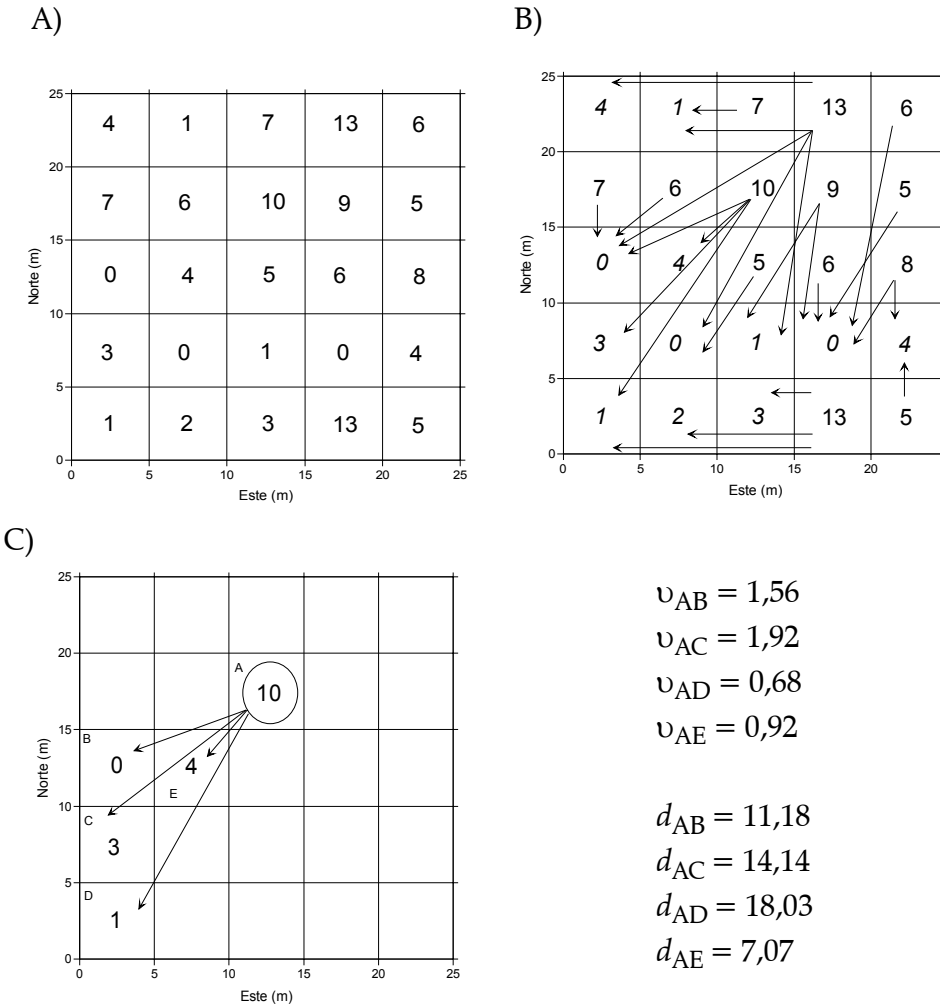


Figura 4.5. *Distribución original de los datos (A), gráfico "inicial y final" (B) y reparto de los flujos desde la unidad situada en las coordenadas 10, 15 (C) en el ejemplo empleado. La magnitud de los flujos en el panel B difiere, pero por claridad no se tienen en cuenta en la figura. La magnitud (υ) y distancia (d) de los flujos individuales representados en el panel C se indica a la derecha del mismo. Véase el texto para una explicación detallada del ejemplo.*

nales. Así pues, existe un valor de Y para cada una de las unidades donantes. Y_A es un buen indicador de la agregación porque tiende a ser más elevado para una unidad que forma parte de una mancha que para una que tiene un valor de la variable a estudiar elevado pero que está rodeada por unidades vecinas con valores bajos.

En el ejemplo de la Figura 4.5 A, $Y_A = (d_{AB}\upsilon_{AB} + d_{AC}\upsilon_{AC} + d_{AD}\upsilon_{AD} + d_{AE}\upsilon_{AE})/(\upsilon_{AB} + \upsilon_{AC} + \upsilon_{AD} + \upsilon_{AE}) = 63{,}34/5{,}08 = 12{,}47$. Así pues, existe un valor de Y para cada una de las unidades donantes (abundancia superior a la media, señaladas en texto normal en la Figura 4.5B) y receptoras (abundancia inferior a la media, señaladas en cursiva en la Figura 4.5B), pero para distinguirlas entre sí éstos últimos tienen signo negativo. El valor numérico de Y es un buen indicador de la agregación porque tiende a ser más elevado para una unidad que forma parte de una mancha (zona de abundancia superior a la media) que para una que tiene un valor elevado pero que está rodeada por otras con valores bajos. Así, en la Figura 4.6, las unidades localizadas en los puntos de coordenadas 15, 20 y en 15, 0 (x, y) tienen el mismo número de individuos, pero Y es mayor en la primera. De manera análoga, para una unidad receptora se esperaría encontrar un valor de Y más negativo si ésta forma parte de un claro (zona de abundancia inferior a la media) que si presenta un valor bajo pero está rodeada por unidades que tienen valores altos. Así, las unidades localiza-

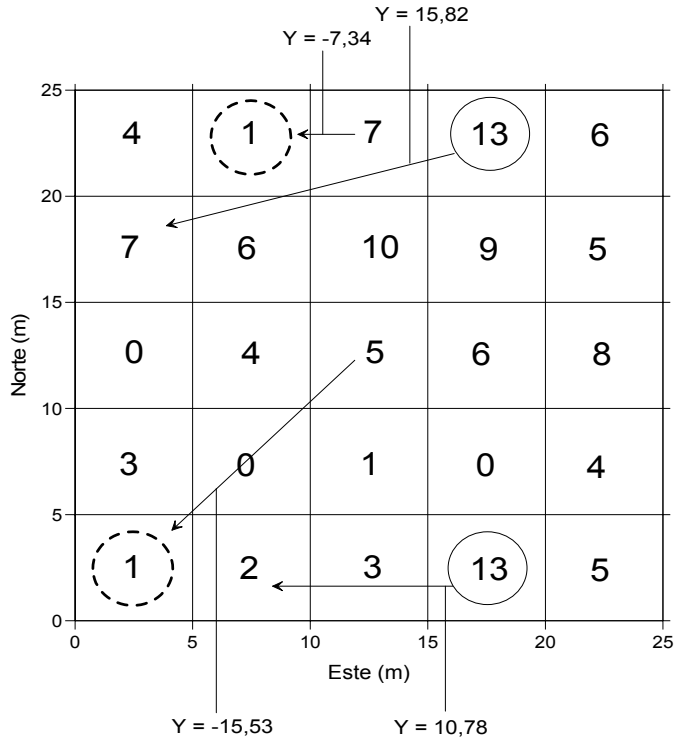


Figura 4.6. *Representación de los flujos desde/hacia unidades que forman parte de una mancha y de un claro respectivamente. Véase el texto para los detalles.*

das en 0, 0 y en 5, 20 (x, y) tienen el mismo número de individuos, pero la primera forma parte de un claro y su valor de Y es más negativo.

Conviene destacar que Y_A depende de la escala a la que las distancias son medidas, del valor de la variable y de su localización respecto a otras unidades. Para tener en cuenta estas características, SADIE utiliza un índice de agregación adimensional, v, obtenido como:

$$v = \frac{Y_A - {}_oY}{{}_AY - {}_cY} \tag{4.2}$$

donde Y_A es la distancia media de flujo descrita en la ecuación 4.1, ${}_cY$ representa la media de los valores de Y_A obtenidos al asignar el valor de A a otras unidades durante las permutaciones, ${}_AY$ es la media de los valores absolutos de Y_A obtenidos para cada uno de los valores numéricos que fueron asignados a la localización espacial de A durante las permutaciones e ${}_oY$ es la media de los valores de ${}_AY$ para cada una de las unidades de muestreo. Para las unidades receptoras, v se calcula de igual forma, con la convención de que es negativo en signo.

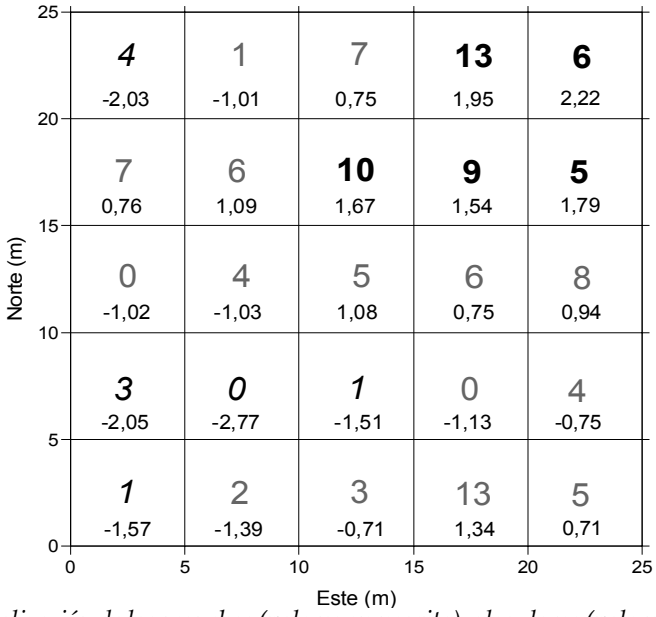


Figura 4.7. *Localización de las manchas (valores en negrita) y los claros (valores en cursiva) en el ejemplo presentado en la Figura 4.5. El número presente en la parte inferior de cada celda es el índice de agrupación,* v. *Los valores que no forman parte de ni de una mancha ni de un claro van en gris. Véase el texto para una descripción detallada de la obtención de* v.

En el ejemplo que venimos siguiendo (Fig. 4.5A), ${}_{c}Y = 7{,}46$, siendo considerablemente inferior al valor de Y_A (12,47). En el caso de ${}_{A}Y$, en lugar de seguir el valor de "A" a lo largo de las permutaciones, se evalúan los valores que van siendo asignados a la localización espacial de "A" durante las permutaciones. Así, el valor de ${}_{A}Y$ se calcula como la media de los valores absolutos de Y_A obtenidos a partir de los valores numéricos asignados a "A" durante las permutaciones. Nótese que en este caso se habla de valores absolutos porque pueden asignarse valores inferiores a la media y, por consiguiente, el valor de Y_A puede tener signo negativo. Siguiendo el ejemplo, ${}_{A}Y = 7{,}20$, nuevamente inferior a Y_A. ${}_{o}Y$ se obtiene a partir de la media de ${}_{A}Y$ para cada una de las unidades de muestreo. En este ejemplo, ${}_{o}Y = 7{,}19$, por lo que el valor de v para "A" fue de (12,47 × 7,19)/(7,46 × 7,22) = 1,67, lo que indica que esta unidad se encuentra dentro de una mancha.

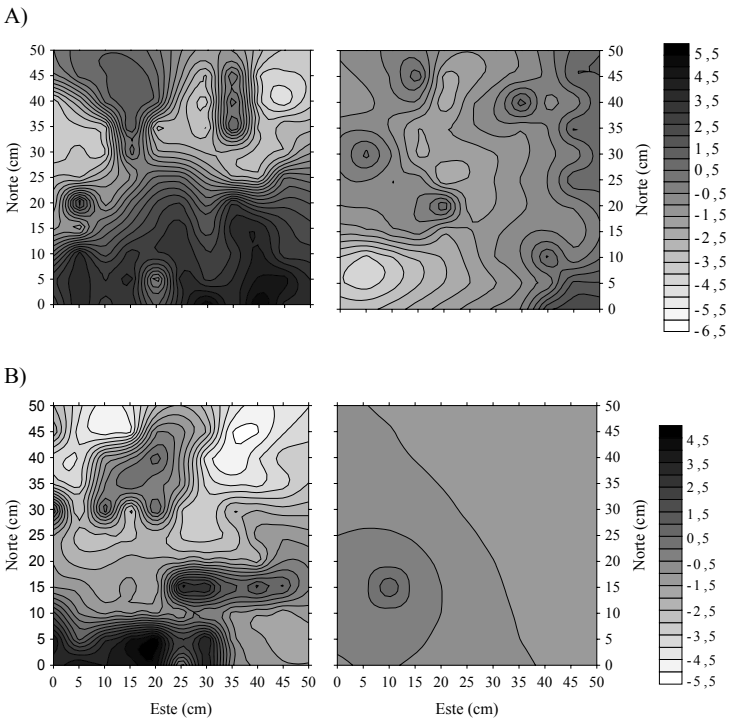


Figura 4.8. *Mapas del índice de agrupación (v) de líquenes foliáceos (A) y musgos (B) obtenidos bajo macollas de* Stipa tenacissima *(izquierda) y en zonas desnudas sin vegetación vascular (derecha) en un espartal de Sax (Alicante). En el esparto, el eje norte refleja la distancia desde el borde de* S. tenacissima. *La leyenda no tiene unidades. Adaptada de Maestre (2003a).*

Para evaluar estadísticamente el grado de significación del conjunto de manchas y claros (Fig. 4.7), se realiza un test de permutaciones donde sus valores medios, V_i y V_j respectivamente, son comparados con los obtenidos durante las permutaciones, tal como ocurre con I_a. En este ejemplo, V_i = 1,28. Dado que sólo el 4,99 % de las permutaciones tuvieron un valor igual o mayor al observado, $P < 0{,}05$. Por lo que respecta a los claros, $V_j = -1{,}40$. En este caso sólo el 2,15 % de las permutaciones tuvo un valor igual o menor al observado, por lo que $P < 0{,}025$. Una interesante propiedad del índice de agrupación, v, es que es una variable continua, lo que permite representar visualmente la localización y tamaño de las manchas y los claros (Fig. 4.8).

4.3. ANÁLISIS DE LA COVARIACIÓN ESPACIAL ENTRE PARES DE VARIABLES

4.3.1. Análisis de asociación global

Junto al análisis espacial de variables individuales, SADIE permite evaluar los patrones de covariación espacial de dos variables en la zona de estudio, siempre que los datos de ambas hayan sido tomados en las mismas coordenadas. Toda medida de asociación espacial entre dos variables debería cumplir dos requisitos principales (Perry y Dixon 2002): (i) estar basada en una comparación clara de las propiedades espaciales de cada variable, de modo que aquellas características del patrón espacial que coinciden en ambas reflejarían la asociación entre ellas, mientras que en caso contrario indicarían su disociación espacial y (ii) tener en cuenta el patrón espacial de cada una de las variables a comparar. La utilización del coeficiente de correlación con los valores de v para las dos especies satisface ambas propiedades. Aquellos puntos de muestreo donde los índices v de ambas muestren una mancha o un claro contribuirán de manera importante y positiva a la correlación (asociación), mientras que donde una de las especies muestre una mancha y la otra un claro, la contribución será negativa (disociación). Las unidades de muestreo donde los valores de v sean pequeños no contribuirán de manera decisiva a la medida de asociación o disociación. La correlación de los valores de v también cumple (ii), ya que en su formación se ha tenido en cuenta el patrón espacial de cada una de las especies.

Pese a su idoneidad, el uso del coeficiente de correlación con los valores de v plantea problemas relacionados con dos atributos de esta variable:

(i) la falta de normalidad y (ii) el elevado grado de autocorrelación espacial que suelen presentar sus valores (Fig. 4.9). Para solucionar el primero de ellos, SADIE estima la significación de las correlaciones entre valores de v mediante un test de permutaciones. Para ello, y tal como se ha descrito anteriormente para D, se compara el valor obtenido con la distribución formada al permutar los datos entre las unidades de muestreo y recalcular dicho coeficiente un determinado número de veces (usualmente unas 10.000 veces). Así, si se considera un test de dos colas y un nivel de significación de 0,05, las dos especies estarán significativamente disociadas si la correlación observada es menor que el valor 250 de esta serie ordenada, ocurriendo lo contrario si la correlación es igual o más grande que el valor 9751. Por otro lado, la falta de independencia promovida por la presencia de autocorrelación espacial plantea numerosos problemas a la hora de establecer la significación de un test estadístico, tal como se ha discutido en el apartado 1.3, por lo que cuando se analiza la asociación o disociación entre dos variables mediante SADIE deben realizarse correcciones para tener en cuenta la autocorrelación de los valores de v.

Lo deseable para tener en cuenta el efecto de la autocorrelación espacial es que las principales características de la estructura espacial de los datos se mantuviera durante sus permutaciones. No obstante, en su desarrollo actual SADIE no permite hacerlo, por lo que es necesario hacer ajustes para evaluar la significación estadística de los coeficientes de correlación. Una de las aproximaciones más comúnmente utilizadas para ello consiste en estimar la reducción en el tamaño muestral causada por la autocorrelación, con el fin de obtener así un tamaño de muestra efectivo, M, que permite ajustar los grados de libertad del test estadístico y, por consiguiente, su significación (Dutilleul 1993a). Debe enfatizarse que este método sólo ajusta la significación del coeficiente de correlación, y no el valor mismo de dicho coeficiente, que sigue siendo válido. Para realizar este ajuste los datos deben ser estacionarios dentro de la zona de estudio, por lo que las posibles tendencias que puedan presentar los valores de v en la zona de estudio deben eliminarse antes de proceder a la estimación de M, lo que se consigue mediante un análisis de tendencias ("trend surface analysis", Legendre y Legendre 1998).

Así pues, los pasos a seguir para evaluar la asociación o disociación de los patrones espaciales de dos variables mediante SADIE son los siguientes (Perry y Dixon 2002):

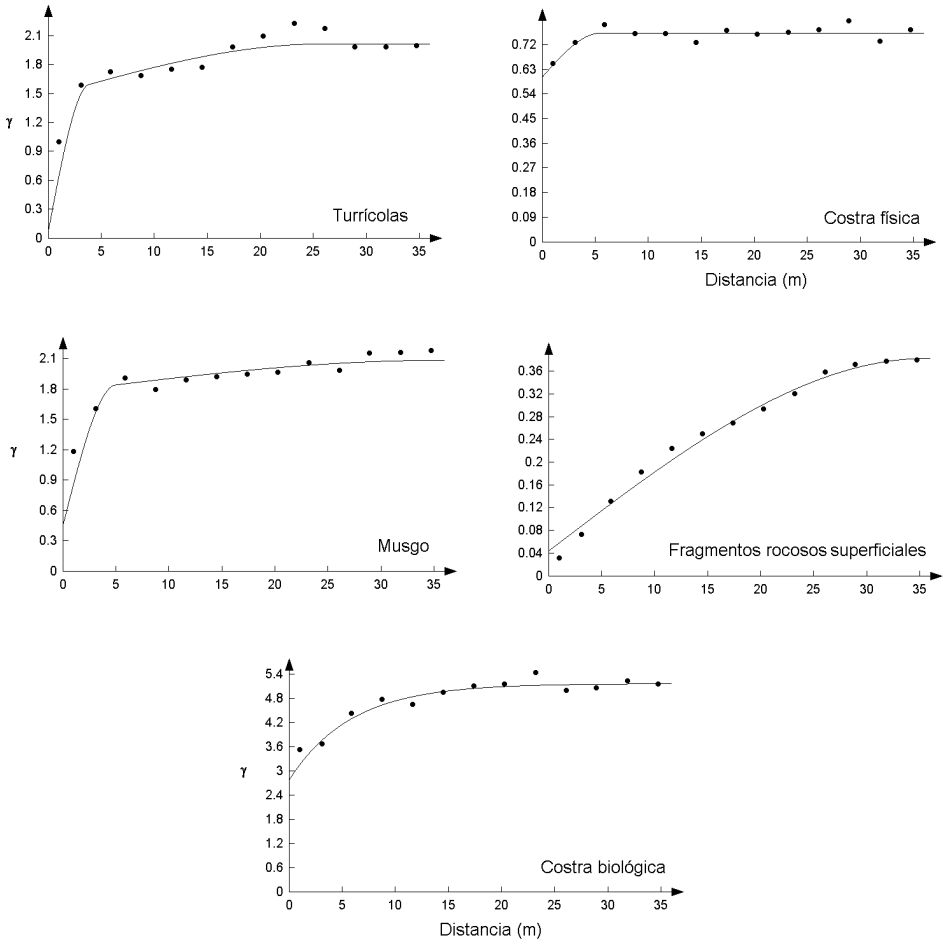


Figura 4.9. *Semivariogramas experimentales (puntos) y modelos ajustados (línea continua) para los valores del índice de agrupación* (v) *de distintas propiedades edáficas en un espartal de Aigües de Busot (Alicante). El número de pares de observaciones utilizado para calcular cada punto del semivariograma osciló entre 106 y 6808. La dependencia espacial osciló entre el 20 y el 96 % del total de la varianza. Para una explicación detallada de cómo interpretar los semivariogramas puede consultarse el Capítulo 6. Adaptada de Maestre y Cortina (2002).*

(i) Estimación del coeficiente de correlación a partir de los valores de v y realización del test de permutaciones. A partir de la distribución de los valores permutados se calcula el intervalo de confianza y la significación del coeficiente de correlación para un valor de α determinado (usualmente suele ser de 0,05).

(ii) Análisis de tendencias, consistente en una regresión entre los valores de v y los nueve monomios resultantes de una combinación cúbica de las coordenadas geográficas de los datos (x, y). Previamente a este análisis se deben centrar los valores de las coordenadas en sus respectivas medias con el fin de evitar problemas de colinealidad (Legendre y Legendre 1998).

(iii) Los residuos de esta regresión, que no contienen la tendencia espacial, se someten al procedimiento de Dutilleul (1993a) para estimar M. Dado que el software SADIE permite realizar este paso de forma automática, no se explicará aquí como funciona este método, remitiéndose a los lectores interesados a consultar el artículo original.

(iv) El intervalo de confianza obtenido en el test de permutaciones, y su significación, se ajusta multiplicándolo por $[(n\text{-}3)/(M\text{-}3)]^{1/2}$, donde n es el número de puntos de muestreo.

Debe tenerse en cuenta que los procedimientos descritos en este apartado no corrigen los efectos de la realización de tests estadísticos múltiples. Por ejemplo, si estamos analizando los patrones de covariación espacial en una comunidad formada por 5 especies y utilizamos SADIE para ello, al final habremos realizado un total de 10 tests estadísticos. Cuando se realizan varios tests estadísticos simultáneamente, la probabilidad de que un error de tipo I ocurra es mayor que el valor nominal del nivel de significación elegido (Legendre y Legendre 1998), aumentando conforme lo hace el número de tests que se realizan. Si los tests son independientes, puede calcularse este error como $1 – (1 - \alpha)^c$, donde α es el nivel de significación estadística (usualmente 0,05) y c es el número de tests (Quinn y Keough 2002). Existen numerosas aproximaciones para controlar esta fuente de error, así como argumentos a favor y en contra para hacerlo (para más información y discusiones consultar Quinn y Keough 2002, Gotelli y Ellison 2004, García 2004). No es objeto de este apartado la discusión de este tema, y únicamente se menciona aquí para que los usuarios de SADIE lo tengan en cuenta. Nuestra opinión es que, especialmente cuando se comparan muchas variables de forma simultánea, es conveniente controlar su efecto en la significación estadística de los tests utilizando métodos no conservadores, como aquellos basados en el control de la proporción de errores de tipo I entre

las hipótesis que se rechazan (FDR, del inglés "false discovery rate"; Benjamini y Hochberg 1995).

4.3.2. Análisis de asociación local

Al igual que ocurría con I_a y v, el análisis descrito en el apartado anterior nos permite describir el grado global de asociación/disociación espacial de dos variables en nuestra zona de estudio (o de una variable en dos muestreos sucesivos). No obstante, no identifica aquellas zonas concretas del espacio donde las asociaciones o disociaciones ocurren con mayor intensidad, ni estima la importancia de cada punto de muestreo para el patrón de asociación/disociación global. SADIE permite también hacer un análisis local de la asociación espacial entre dos variables objeto de estudio, estimando para ello la contribución de cada unidad de muestreo al coeficiente de correlación entre las dos variables (Perry y Dixon 2002). En la práctica, si los índices v de la variable A se denominan v_A y tienen una media q_A, y los de la variable B v_B, con media q_B, una medida de la asociación para una unidad de muestreo i (χ_i) se obtiene con la siguiente ecuación (Perry y Dixon 2002):

$$\chi_i = \frac{n(v_{iA} - q_A)(v_{iB} - q_B)}{\sqrt{\Sigma_i (v_{iA} - q_A)^2 (v_{iB} - q_B)^2}} \tag{4.3}$$

donde n es el número de unidades muestreadas. Valores positivos de χ_i indican la presencia de coincidencias en las manchas y claros de ambas especies en la unidad de muestreo i, mientras que valores negativos revelan la presencia de una mancha en una especie y un claro en la otra. Es interesante destacar el hecho de que la media de todos los valores χ_i equivale al coeficiente de correlación entre los valores de v para ambas especies (Winder *et al.* 2001, Perry y Dixon 2002).

Los valores de χ son continuos y están autocorrelacionados, por lo que se pueden representar en un mapa en dos dimensiones con el fin de visualizar las zonas donde se produce asociación o disociación dentro de la superficie estudiada (Fig. 4.10). Un intervalo de confianza para esta medida bajo la hipótesis nula de no asociación puede obtenerse a partir del test de permutaciones utilizado para evaluar la correlación de los valores de v para las dos especies. Para ello se multiplica el intervalo de confianza obtenido en dicho análisis por la raíz cuadrada de n (Perry y Dixon 2002).

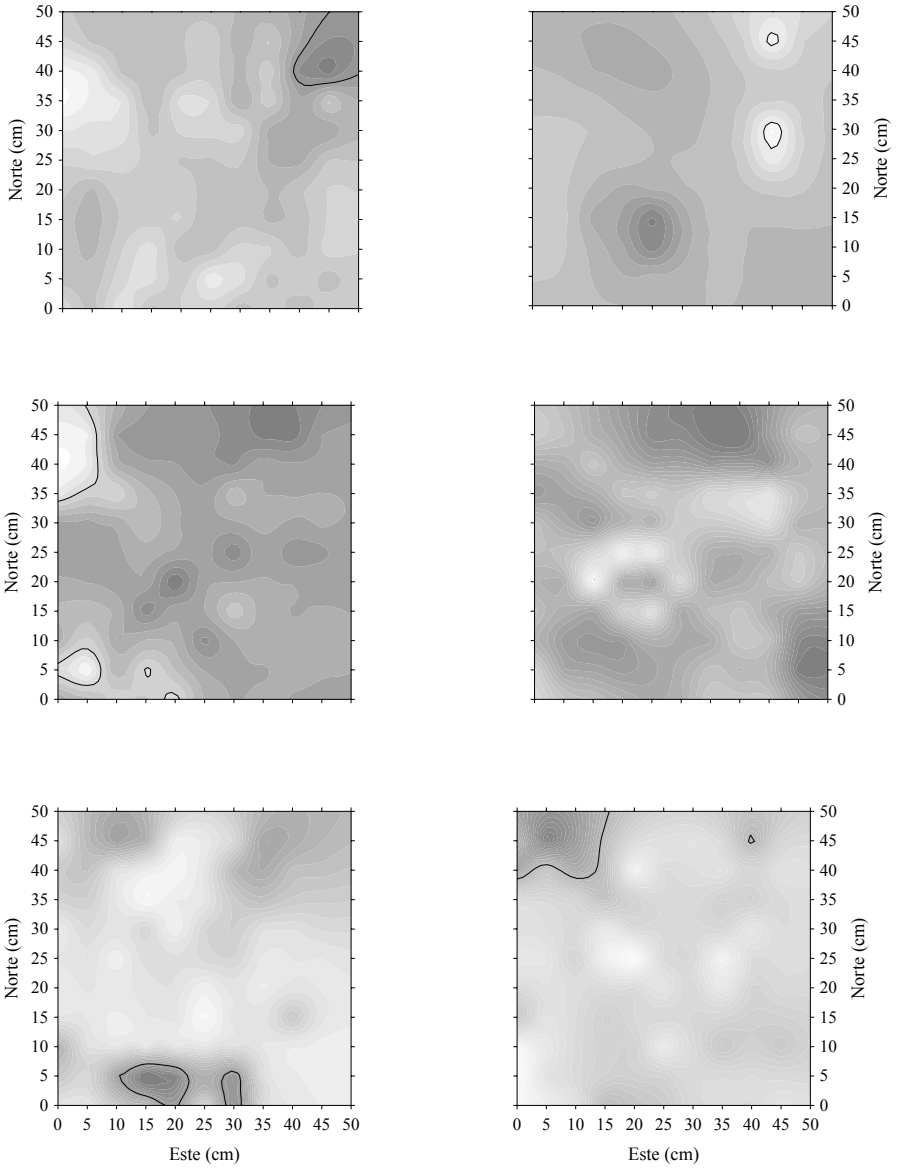


Figura 4.10. *Mapas de asociación local entre los líquenes foliáceos y los musgos bajo macollas de* Stipa tenacissima *(izquierda) y en zonas desnudas sin vegetación vascular (derecha) en un espartal de Sax (Alicante). En el esparto, el eje norte refleja la distancia desde el borde de* S. tenacissima. *Las zonas de color blanco y gris indican una asociación espacial negativa y positiva respectivamente. Las zonas de asociación significativa (*P < *0,05) están rodeadas en negro. Adaptada de Maestre (2003a).*

4.4. ANÁLISIS ADICIONALES CON SADIE

4.4.1. Análisis paramétricos frente a no paramétricos

Por definición, SADIE es una herramienta no paramétrica, ya que no requiere que los datos sigan una distribución o modelo estadístico determinado para que sean analizados utilizando esta herramienta. Sin embargo, SADIE puede verse limitado para discriminar el patrón espacial de los datos cuando éstos presenten una distribución altamente sesgada. Tomemos por ejemplo un conjunto de datos que presentan un único valor por encima de la media: 0, 0, 1, 2, 4, 9, 16, 63 y 904 (media = 111, varianza = 89641,19). De acuerdo con el algoritmo de transporte, SADIE calcularía el patrón espacial a partir de una única unidad "donante" (de valor 904), la cual sería definida como una "mancha". El resto de unidades serían consideradas como un "claro", sin posibilidad de discriminación del patrón espacial entre ellas. Para paliar esta limitación, SADIE puede utilizar un análisis no paramétrico, donde los valores originales de un conjunto de datos son reemplazados por sus rangos. En sentido estricto, el método empleado es exactamente el mismo que con otro tipo de datos, a excepción del reemplazamineto previo al análisis. De esta manera, se consigue disminuir las grandes diferencias de los valores originales manteniendo la distribución original de los datos. En el ejemplo descrito en este párrafo, si transformamos los valores originales en rangos tenemos la siguiente distribución: 1, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 (media = 5, varianza = 8). En este caso hay 4 unidades "donantes" y 4 unidades "receptoras". En definitiva, lo que se pretende con esta transformación es evitar la magnitud exagerada de la unidad "donante" original con respecto a los demás valores de las otras muestras, para poder asi discriminar el patrón espacial dentro de estas últimas, de magnitudes similares.

4.4.2. Evaluación del grado de agrupación de las manchas frente a los claros

En ocasiones, podemos plantearnos si en nuestra área de muestreo predominan un mayor número de "manchas" o "claros". Una manera rápida y sencilla de contestar esta cuestión es comparar el valor medio de los índices de agrupación que delimitan manchas, V_i, con el valor medio de los índices de agrupación que delimitan claros, V_j. Sin embargo, comparando los valores de v_i y v_j que resultan de cada una de las permutaciones

con los valores de V_i y V_j observados puede comprobarse de forma estadística si en nuestra área de muestreo predominan un mayor número de "manchas" o "claros".

Para ello se realiza un análisis de componentes principales con la media de los valores de v_i y v_j resultante de las permutaciones (esta información se puede encontrar en uno de los ficheros de salida de resultados del software SADIE, "rbno9.dat", descrito en el apartado 4.7.1). A estas dos variables, se le añaden como casos los valores V_i y V_j observados. Una vez realizado el análisis, extraemos los componentes principales de los casos correpondientes al segundo eje y, realizando una distribución de frecuencias, comparamos con el valor observado mediante un tests de dos colas. Ilustremos esto con un ejemplo. Para ello se van a utilizar una serie de registros de la humedad del suelo en primavera en un área de muestro de 15 × 30 m correspondiente a un bosque autóctono en el Parque Nacional de Sierra Nevada (Quero 2006; estos datos pueden encontrarse en el CD adjunto, carpeta "Capítulo 4", archivo "snevada.xls"). El fichero de salida "rbno9.dat" nos da unos valores observados V_i y V_j de 3,90 y -3,94, respectivamente, que incluimos como casos en el analisis de componentes principales. Los componentes principales de los casos correspondientes al segundo eje se ordenan en una distribución de frecuencias para así detectar que la posición que ocupa el valor observado es la 169 (338 al ser un test de dos colas) dentro de las 5.968 posibles. De este modo podríamos concluir que no existen diferencias significativas en el número de manchas y claros (p = 338/5.968 = 0,06).

4.4.3. Utilización de SADIE con matrices de datos

Como se ha puesto de manifiesto en los apartados 4.2 y 4.3, SADIE no permite analizar el patrón espacial de matrices de datos. No obstante, ello no evita que SADIE pueda utilizarse en un contexto multivariante. No hay que olvidar que los índices I_a, v y χ son variables continuas y, como tales, pueden ser sometidos a análisis posteriores. A grandes rasgos, existen dos alternativas para la utilización de SADIE en un contexto multivariable:

i) Analizar los patrones de asociación (global o local) variable a variable y establecer una matriz de correlaciones con los índices v de cada variable o χ de cada par de variables. Este análisis se utiliza cuando existe un

interés en comparar directamente el grado de asociación/disociación entre los patrones espaciales de distintas variables entre sí, siendo la principal aplicación de SADIE en un contexto multivariante hasta la fecha (p. ej. Ferguson *et al.* 2000, Winder *et al.* 2001, Thomas *et al.* 2001, Maestre y Cortina 2002, Maestre *et al.* 2003b, Cocu *et al.* 2005, Blackshaw y Vernon 2006). En el apartado 4.5.2 se presentará con detalle un ejemplo de este tipo de análisis. Como ya se ha discutido en el apartado 4.3.1, la realización de varios tests estadísticos simultáneos requiere la corrección de la significación estadística para evitar cometer errores de tipo I. Si entre los objetivos del estudio se encuentra la evaluación de la significación estadística de los patrones de asociación/disociacion, éste es uno de los principales inconvenientes de utilizar esta aproximación, especialmente si se comparan muchas variables entre sí.

ii) Aplicar alguna técnica multivariable a los índices SADIE (I_a, v y χ). Esta aproximación resulta de interés cuando se quiere evaluar los cambios en el patrón espacial de una determinada variable en el tiempo o cuando se quieren comparar los patrones espaciales de muchas variables de forma simultánea. La gran variedad de técnicas de análisis multivariable existentes, y en particular el desarrollo de técnicas de regresión múltiple multivariable (McArdle and Anderson 2001) y de ANOVAS multivariables que permiten utilizar cualquier tipo de distancia entre matrices (Anderson 2001), abren nuevas puertas a la utilización de SADIE en un contexto multivariable. Hasta la fecha pocos estudios han abordado esta aproximación a la hora de analizar espacialmente matrices de datos. En un estudio que se presentará con más detalle en el apartado 4.5.3, Maestre *et al.* (2003c) utilizaron un análisis de componentes principales del índice v para evaluar los cambios temporales en el patrón espacial de una repoblación de *Pistacia lentiscus* durante los tres primeros años tras la plantación. Por su parte, Conrad *et al.* (2006) evaluaron los cambios en el patrón espacial que acompañaron al declive de la población de la polilla *Arctia caja* en el Reino Unido entre 1968 and 1999. Para ello utilizaron un análisis de coordenadas principales sobre una matriz de similitud obtenida a partir de los valores del índice χ resultantes de comparar el patrón espacial de esta especie entre todos los años de la serie temporal evaluada. Los resultados de estos estudios muestran el enorme potencial de la utilización conjunta de análisis multivariables y SADIE para el análisis de la dinámica espacio-temporal de especies y procesos ecológicos, por

lo que es de esperar que en el futuro aparezcan nuevos estudios utilizando esta aproximación.

4.5. CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS Y PRÁCTICAS A LA HORA DE UTILIZAR SADIE

Dado que es un método inicialmente desarrollado para el análisis de conteos, SADIE está limitado al análisis de datos en una escala ordinal o binaria (0/1). Así pues, su aplicación en el estudio de variables continuas requiere que éstas sean categorizadas previamente (Perry et al. 1999). Si bien SADIE se ha aplicado de forma satisfactoria con este tipo de variables (p. ej. Maestre y Cortina 2002), hay que tener en cuenta que toda categorización supone una pérdida de información. A efectos prácticos, a la hora de utilizar SADIE con variables continuas recomendamos realizar análisis de un mismo conjunto de datos sometido a distintas categorizaciones (p. ej. transformando cada valor en el entero más cercano, multiplicando la variable por diez, cien, mil…, categorizar en deciles o percentiles, etc.). Si los resultados de estos análisis son, a grandes rasgos, similares, podemos interpretar los datos con cierta confianza. Si ello no ocurre, la interpretación de los resultados de los análisis debe hacerse con precaución.

SADIE no es un método pluriescalar, ya que requiere la elección *a priori* de los distintos componentes que definen la escala de estudio (véase el capítulo 2 para una discusión en profundidad de las implicaciones de la escala en ecología): tamaño de la unidad muestral, separación entre las unidades muestrales y tamaño del área de estudio. En ocasiones, como cuando se quiere evaluar el número de insectos por planta en un campo de cultivo, dicha elección no supone un problema. En otras, como cuando se quiere evaluar los patrones de covariación entre las especies de un matorral, la elección requiere cierto conocimiento previo sobre las especies a estudiar. Hay que tener en cuenta que el tamaño de la unidad muestral debería ser más grande que el de un individuo de la especie de interés y del mismo tamaño, o preferiblemente menor, que las estructuras que resultan de un proceso unitario a detectar como, por ejemplo, una mancha o agrupación de organismos (Legendre y Legendre 1998, Dungan *et al.* 2002). Asimismo, el intervalo de muestreo, o distancia entre

puntos de muestreo consecutivos, debería ser menor que la distancia media entre dichas estructuras (Legendre y Legendre 1998). Si la unidad de muestreo es muy grande se detectarán asociaciones positivas debido a que especies con los mismos requerimientos de hábitat aparecerán en las mismas unidades de muestreo, no correspondiendo estas asociaciones a interacciones de tipo facilitativo. Por el contrario, si ésta es muy pequeña, la presencia de pocos individuos puede limitar la detección de asociaciones significativas entre las especies (Jonsson y Moen 1998). La elección *a priori* del tamaño mínimo de la unidad de muestreo y de la superficie total a analizar es inevitable en muchos casos. Para reducir la subjetividad de este proceso es necesario tener un conocimiento claro sobre la escala a la que operan los procesos a detectar, lo que pone de manifiesto la importancia de los estudios preliminares, así como del conocimiento del tamaño y características ecológicas de las especies que componen la comunidad objeto de estudio. En apartado 4.6.2 se ilustra con un ejemplo el efecto que uno de los componentes de la escala, el tamaño de la unidad muestral, tiene en la interpretación del análisis espacial de un mismo conjunto de datos utilizando SADIE.

Otra consideración a tener en cuenta a la hora de utilizar SADIE fue descubierta por Xu y Madden (2003, 2005). Estos autores generaron datos artificiales para evaluar si la cantidad y posición de manchas y claros en el área de estudio podían afectar a los resultados, así como para estudiar las relaciones entre los índices SADIE. Mediante este ejercicio, estos autores demostraron que el valor estos índices, en especial I_a, dependía de la posición espacial de las manchas y claros y, en menor medida, del valor de los conteos. Cuando el número de éstos era muy bajo, una mancha o claro determinado puede modificar el resultado de los índices SADIE según se encuentre en el centro o en una esquina del área de estudio. Sin embargo, este fenómeno se disolvía cuando existe un cierto número de manchas y claros en el área de estudio. También demonstraron que los índices I_a, V_i y V_j están matemáticamente relacionados, siendo su similitud mayor conforme aumenta la cantidad de puntos de muestreo. Una consecuencia directa de estos resultados es que la comparación de los índices SADIE entre estudios debe hacerse con cierta precaución. Estos autores reclaman que un estadístico simple, como I_a, no puede capturar todas las características del patrón espacial, que es necesario desarrollar un nuevo índice estandarizado que evite los efectos del número y localización de manchas y claros

y que es conveniente utilizar distintas técnicas de análisis espacial. Este último aspecto ha sido enfatizado por otros autores (p. ej. Goodall y West 1979; Dale 1999), y es algo en lo que estamos de acuerdo debido a que no existe el método perfecto que capture todos aquellos aspectos de interés que se derivan del análisis de la estructura espacial de una determinada variable.

Por último, nos gustaría discutir dos aspectos prácticos relativos al uso de SADIE: i) el número de permutaciones a utilizar y ii) el número de datos a analizar. El primero de ellos tenía mucha importancia hace unos años, cuando los ordenadores personales no eran tan rápidos como los disponibles hoy en día. En su versión actual, el software para realizar los análisis de patrones individuales mediante SADIE (se discutirá en el apartado 4.7) permite utilizar un máximo de 5.967 permutaciones. Si bien a partir de 2.000 permutaciones suelen obtenerse resultados fiables, nuestro consejo es utilizar siempre el máximo número posible. Por otro lado, el número de datos a analizar, de acuerdo con las posibilidades del software disponible actualmente, no debe sobrepasar los 500. Análisis que superen este tamaño muestral, pueden realizarse dividiendo el área de estudio tantas veces como sea necesario hasta alcanzar 500 casos en cada porción del área inicial. Existe una versión beta del software SADIE (Joe Perry, comunicación personal) que permite utilizar esta técnica con tamaños muestrales por encima de los 500 casos. Sin embargo, a día de hoy dicha aplicación todavía no se encuentra disponible públicamente.

4.6. EJEMPLOS PRÁCTICOS

Se presentan a continuación una serie de ejemplos para ilustrar los principales análisis que pueden realizarse utilizando SADIE (Tabla 4.2). Todos los análisis que se presentan a continuación se realizaron con el software descrito en el apartado 4.7.1. Para la obtención de los índices I_a, V_i y V_j se utilizaron en todos los casos un total de 2.340 permutaciones, mientras que para evaluar la significacion estadística de los análisis de correlación se utilizaron 10.000 permutaciones. Los mapas del índice de agrupación y de asociación local se crearon con el software Surfer para Windows 8.0 (Golden Software, Boulder, Colorado, USA). Para el resto de análisis estadísticos se utilizó el programa SPSS para Windows 9.0 (SPSS Inc., Chica-

go, Illinois, USA). Por limitaciones de espacio, la discusión de los resultados se limitará a aquellos aspectos que faciliten su interpretación y que ilustren la importancia de los patrones espaciales observados para la estructura, funcionamiento y restauración de los ecosistemas evaluados. Aquellos lectores interesados en una discusión en profundidad de los ejemplos pueden consultar los artículos originales en los que publicaron los ejemplos que se presentan a continuación.

Tabla 4.2. *Resumen de las diferentes posibilidades de análisis con SADIE, los índices generados, así como ejemplos que se pueden encontrar en el texto del presente capítulo.*

Análisis	Índice SADIE que se utiliza	Ejemplos en el texto
Patrón espacial de una variable a nivel global	Índice de agregación (I_a)	Apartado 4.6.1
Detección de agregados locales de una variable	Índices de agrupación (V_i y V_j)	Apartado 4.6.1
Covariación espacial de dos variables a nivel global	Coeficiente de correlación de V (basado en test de permutaciones)	Apartado 4.6.2
Detección de manchas de asociación / disociación local	Índice de asociación para una unidad de muestreo (χ_i)	Apartado 4.6.2

4.6.1. Análisis de la distribución espacial de musgos y líquenes en una estepa semiárida

Para ilustrar el análisis espacial de variables individuales y el análisis de covariación global y local mediante SADIE se va a describir el estudio realizado por Maestre (2003a), donde se evaluó el efecto del microambiente proporcionado por el esparto (*Stipa tenacissima* L.) en la distribución espacial de dos componentes de la costra biológica (conjunto de organismos formado por bacterias, cianobacterias, algas, musgos y líquenes, que habita los primeros mm de la superficie del suelo en zonas áridas y semiáridos de todo el mundo): los líquenes foliáceos y los musgos. El principal objetivo de estudio era determinar si el microambiente proporcionado por *S. tenacissima* promueve la aparición de cambios en el patrón individual de estos componentes de la costra biológica por separado y en su covariación espacial. Los datos originales utilizados para este

ejemplo se encuentran en el CD adjunto (carpeta "Capítulo 4", archivos "colominasst.xls", "colominasb.xls", "lacuevast.xls", "lacuevab.xls", "latorrest.xls" y "latorreb.xls").

4.6.1.1. Zona de estudio y adquisición de datos

El estudio se llevó a cabo en tres parcelas experimentales localizadas en las cercanías de Sax, en la provincia de Alicante (Colominas, 38º 35'N 0º 48'O, altitud 640 m; La Cueva, 38º 35'N 0º 48'O, altitud 625 m; La Torre, 38º 34'N 0º 48'O, altitud 619 m). Las tres parcelas se encuentran en zonas de orientación sudoeste y tienen una pendiente inferior a 8º. El clima es termomediterráneo semiárido, con precipitación y temperaturas medias anuales de 315,4 mm y 16,5 ºC, respectivamente (período 1986-1995). La vegetación consiste en una estepa de la asociación *Lapiedro-Martinezii Stipetum tenacissimae* y está dominada por *S. tenacissima*, pero incluye también especies arbustivas y arbóreas mediterráneas como *Rosmarinus officinalis* L., *Globularia alypum* L., *Anthyllis cytisoides* L. y *Pinus halepensis* Miller.

Se utilizó la clasificación morfológica de Eldridge y Rosentreter (1999) para identificar a los distintos componentes de la costra biológica. Entre las categorías establecidas por estos autores, los musgos (dominados por *Weissia* sp.) y los líquenes foliacéos –fundamentalmente *Cladonia convoluta* (Lam.) P. Cout.– fueron las más abundantes en la zona de estudio. Para evaluar el efecto de *S. tenacissima* en la distribución de los musgos y líquenes foliáceos se utilizaron dos microambientes: esparto y claro. El microambiente esparto se encuentra situado en la cara norte de las macollas de *S. tenacissima* (a menos de 15 cm del borde de la macolla), mientras que el claro se localiza en las zonas desnudas sin vegetación situadas entre macollas. Durante la primavera de 2000, se establecieron aleatoriamente seis cuadrados de muestreo de 50×50 cm (0,25 m^2) por microambiente y parcela. Cada cuadrado se dividió en 100 subcuadrados de 5×5 cm, donde se estimó la cobertura de los mugos y los líquenes foliáceos siguiendo la escala de Braun-Blanquet: 0 = 0 %, 1 = 1-5 %, 2 = 6-25 %, 3 = 26-50 %, 4 = 51-75 % y 5 = 76-100 %.

4.6.1.2. Análisis estadísticos

Para caracterizar el patrón espacial de los componentes de la costra biológica por separado se utilizó SADIE, tal como se ha descrito en el apartado 4.2. El análisis espacial se realizó por separado para los musgos y líquenes en cada cuadrado de muestreo de 50 × 50 cm, utilizando como datos los valores de cobertura (0-5) obtenidos en los subcuadrados de 5 × 5 cm. El porcentaje de cuadrados de muestreo de 50 × 50 cm que mostró un patrón espacial no aleatorio en los dos microambientes fue analizado mediante modelos log-lineales jerarquizados (Agresti 1990). En estos análisis, los datos fueron comparados en una tabla de tres vías (significación, microambiente y parcela), utilizando un modelo no saturado (Agresti 1990). Para ver el efecto del microambiente en los patrones espaciales de musgos y líquenes, los índices I_a, V_i y V_j se analizaron utilizando un ANOVA de dos factores: microambiente (fijo) y parcela (aleatorio). Con el fin de corregir desviaciones respecto a la homogeneidad de varianzas, estos índices fueron transformados mediante la función logaritmo (utilizando el valor absoluto en el caso de V_j). Los análisis de covariación global y local se realizaron siguiendo la metodología descrita en el apartado 4.3. El porcentaje de cuadrados de muestreo de 50 × 50 cm que presentaron asociaciones/disociaciones significativas en cada microambiente fue analizado mediante modelos log-lineales jerarquizados (Agresti 1990).

4.6.1.3. Resultados

Los líquenes foliáceos mostraron por lo general un patrón espacial no aleatorio, ya que el 100 % y el 67-83 % de los cuadrados muestreados en los microambientes esparto y claro, respectivamente, presentaron valores de I_a significativamente diferentes que uno. Su patrón espacial estuvo afectado por el microambiente, ya que el número de cuadrados muestreados donde el valor de I_a fue estadísticamente diferente de uno fue superior en el esparto (Análisis log-lineal; $G^2_{\text{Microambiente} \times Ia\,1} = 7{,}83$; gl = 1; P = 0,005). Los índices I_a, V_i y V_j (valores absolutos en este último caso) obtenidos para este componente de la costra biológica fueron siempre superiores a 1,3, indicando la presencia de un patrón de distribución agregado (Tabla 4.3). Todos ellos mostraron valores significativamente superiores (excepto en V_j, que fueron inferiores) en el microambiente esparto respecto al claro (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. *Resumen del análisis SADIE para los componentes de la costra biológica evaluados. Los datos representan la media ±el error estándar (n = 6).* I_a *= índice de agregación,* V_j *= media del índice de agrupación para los claros y* V_i *= media del índice de agrupación para las manchas.*

Parcela	Componente	Microambiente	I_a	V_i	V_j
Colomina	Líquenes foliáceos	Esparto	2,81 ± 0,15	2,55 ± 0,55	-2,66 ± 0,14
		Claro	1,55 ± 0,11	1,48 ± 0,08	-1,55 ± 0,11
	Musgo	Esparto	1,74 ± 0,26	1,67 ± 0,22	-1,65 ± 0,21
		Claro	1,55 ± 0,25	1,35 ± 0,20	-1,49 ± 0,23
La Cueva	Líquenes foliáceos	Esparto	2,94 ± 0,29	2,65 ± 0,33	-2,71 ± 0,26
		Claro	1,42 ± 0,12	1,43 ± 0,13	-1,39 ± 0,11
	Musgo	Esparto	1,50 ± 0,17	1,42 ± 0,14	-1,57 ± 0,17
		Claro	1,43 ± 0,21	1,40 ± 0,21	-1,40 ± 0,22
La Torre	Líquenes foliáceos	Esparto	2,53 ± 0,32	2,40 ± 0,34	-2,35 ± 0,31
		Claro	1,55 ± 0,16	1,56 ± 0,16	-1,54 ± 0,16
	Musgo	Esparto	2,52 ± 0,30	2,32 ± 0,27	-2,40 ± 0,29
		Claro	1,63 ± 0,22	1,60 ± 0,22	-1,52 ± 0,21

En el caso de los musgos, el número de cuadrados muestreados con un patrón espacial no aleatorio fluctuó entre 67-83 % en el microambiente esparto y 50-67 % en el claro, aunque estas diferencias no fueron significativas (Análisis log-lineal, $G^2_{\text{Microambiente} \times Ia\,1} = 2{,}21$; gl = 1; P = 0,137). Los valores medios obtenidos para I_a y v_i fueron en general inferiores a los obtenidos para los líquenes foliáceos (Tabla 4.3). A pesar de que se aprecia una mayor agregación en el microambiente esparto, no se encontraron diferencias significativas entre microambientes para ninguno de los índices SADIE en los musgos (Tabla 4.4).

Los mapas de v mostraron la distribución de las manchas y los claros dentro de los cuadrados muestreados (Fig. 4.8). De su observación pueden apreciarse dos características principales en la distribución espacial de los líquenes foliáceos: un mayor nivel de agregación en el microam-

Tabla 4.4. *Resultados de un ANOVA de dos factores donde se evalúa el efecto del microambiente y la parcela en los valores de los índices SADIE (transformados mediante una función logaritmo).* I_a = *índice de agregación,* V_j = *media del índice de agrupación para los claros y* V_i = *media del índice de agrupación para las manchas.*

Componente	Índices SADIE	Resultados del ANOVA								
		Microambiente (M)			Parcela (P)			M x P		
		F	gl	P	F	gl	P	F	gl	P
Líquenes foliáceos	I_a	76,13	1, 2	0,013	0,37	2, 2	0,730	0,761	2, 30	0,476
	V_i	91,57	1, 2	0,011	0,17	2, 2	0,854	0,398	2, 30	0,675
	V_j	55,72	1, 2	0,017	0,53	2, 2	0,654	0,843	2, 30	0,440
Musgos.	I_a	3,43	1, 2	0,205	2,66	2, 2	0,273	0,96	2, 30	0,395
	V_i	4,83	1, 2	0,159	3,71	2, 2	0,212	0,84	2, 30	0,442
	V_j	4,78	1, 2	0,160	2,00	2, 2	0,333	0,93	2, 30	0,407

biente esparto respecto al claro y una disminución de ésta en el primero conforme aumenta la distancia al borde de *S. tenacissima*. En el microambiente claro, esta tendencia hacia la agregación en los alrededores de *S. tenacissima* no fue tan clara. Los musgos presentaron un comportamiento similar, aunque la mayor variabilidad entre cuadradados propició la falta de diferencias significativas entre microambientes. El número de cuadrados donde el patrón espacial de ambas especies mostró una relación significativa no mostró diferencias entre microambientes (Análisis log-lineal, $G^2_{\text{Microambiente x Correlación significativa}} = 0{,}11$; gl = 1; P = 0.735). Esta similitud se reflejó claramente en los mapas de asociación local (Fig. 4.10).

4.6.1.4. Discusión

Los líquenes foliáceos mostraron un mayor grado de agregación en el microambiente esparto, donde formaron manchas continuas que se volvieron más dispersas conforme aumentó la distancia al borde de *S. tenacissima*. En el microambiente claro, las extensiones ocupadas por este componente de la costra biológica fueron más pequeñas y dispersas, quedando claramente reflejadas las diferencias entre microambientes en los valores de I_a. Los resultados obtenidos sugieren que *S. tenacissima* es capaz de facilitar el desarrollo de los líquenes foliáceos (*sensu* Callaway 1995) y coinciden con descripciones generales de este componente de la costra biológica

en zonas semiáridas (Belnap *et al.* 2001). A pesar de que *C. convoluta*, el principal constituyente de este grupo morfológico en la zona de estudio, es capaz de retener el contenido en clorofila y su maquinaria fotosintética durante los períodos de desecación (Tuba *et al.* 1996), este proceso convierte al fotosistema II en un estado no funcional (Sass *et al.* 1996). Además, esta especie presenta una acusada pérdida de rigidez en las paredes celulares cuando su contenido relativo en agua disminuye por debajo del 60 % (Proctor *et al.* 1998). Estos cambios fisiológicos limitan notablemente su actividad fotosintética y crecimiento, por lo que la mejora en las condiciones microclimáticas promovida por el desarrollo de *S. tenacissima* parece ser el principal mecanismo implicado en la facilitación encontrada.

La falta de diferencias significativas en el patrón espacial de los musgos entre microambientes fue inesperada, ya que la mejora de las condiciones microclimáticas promovida por *S. tenacissima* (Maestre *et al.* 2001) debería propiciar un mayor desarrollo de los musgos –limitado en zonas semiáridas por la escasez de precipitaciones y la baja humedad ambiental– en los alrededores de esta especie. No obstante, se aprecia una cierta tendencia a encontrar una mayor agregación de los musgos en los alrededores de *S. tenacissima*. Las observaciones recogidas en este estudio concuerdan con las de Maestre y Cortina (2002), que no detectan una asociación positiva y significativa entre el patrón espacial de *S. tenacissima* y los musgos en una parcela de 50 × 50 m localizada a 60 km de la zona de estudio. No obstante, contrastan con estudios llevados a cabo a escala de individuo, que detectan una mayor cobertura de musgos en el microambiente esparto respecto al claro (Martínez-Sánchez *et al.* 1994, Maestre *et al.* 2002).

Las diferencias encontradas entre microambientes en la distribución de los líquenes foliáceos y, en menor medida, la tendencia que presentan los musgos a desarrollarse principalmente en las cercanías de las macollas de *S. tenacissima*, pueden tener notables influencias en los flujos hidrológicos de los espartales donde estas especies son abundantes. Si bien el papel de los líquenes en la generación de escorrentía y en la infiltración no está del todo claro, y parece depender fuertemente de las condiciones ambientales específicas de cada lugar (Belnap *et al.* 2001), el incremento en la rugosidad de la superficie edáfica promovido por el desarrollo de este componente de la costra biológica puede aumentar la tasa de infiltración y actuar como una trampa para las semillas de especies vasculares (Zaady *et al.* 1997). Por su parte, los musgos son capaces de absorber grandes cantidades de agua después de los eventos llu-

viosos y de aumentar la infiltración (Maestre *et al.* 2002), así como de retener esta humedad en superficie durante períodos de tiempo considerables (Belnap *et al.* 2001). Así pues, es posible que el mayor desarrollo de estos componentes de la costra biológica en las cercanías de *S. tenacissima* pueda incrementar la infiltración y la captura de semillas, contribuyendo así a crear un microambiente propicio para el desarrollo de las plantas vasculares.

4.6.2. Análisis de la vegetación perenne en una estepa semiárida

Este ejemplo proviene del estudio realizado por Maestre *et al.* (2003a, 2003b), que tenía como objetivo analizar los patrones espaciales de la vegetación perenne en un espartal semiárido a distintas escalas espaciales. En el mismo se ilustrará la utilización de matrices de correlaciones con los índices *v* para evaluar matrices de datos (cobertura de distintas especies que co-existen en una comunidad en este caso), así como los efectos del tamaño de la unidad de muestreo en los resultados de SADIE. Los datos originales utlilizados en este ejemplo se encuentran en el CD adjunto (carpeta "Capítulo 4", archivo "aguas.xls").

4.6.2.1. Zona de estudio y adquisición de datos

El estudio se llevó a cabo en una parcela experimental de 50 × 50 m localizada cerca de Aigües de Busot, en la provincia de Alicante (38º 31´ N, 0º 21´ W; 460 m de altitud, 12º de pendiente con orientación SE). El clima es termomediterráneo semiárido, con valores de precipitación y temperatura media anual de 388 mm y 16 ºC, respectivamente (período 1960-1990). La vegetación consiste en un espartal perteneciente a la asociación *Lapiedro Martinezii-Stipetum tenacissimae* Rivas Martínez y Alcaraz y tiene una cobertura del 45 %. *Stipa tenacissima* se encuentra acompañada en estos lugares por distintas especies arbustivas y herbáceas, entre las que se encuentran *Brachypodium retusum* Pers. (Beauv.) *Rhamnus lycioides* L. subsp. *lycioides*, *Globularia alypum*, *Anthyllis cytisoides* y *Coronilla minima* L. subsp. *lotoides*.

Se utilizó como información básica un mapa digital de la vegetación obtenido durante la primavera de 1999 (se encuentra en el CD adjunto, carpeta "Capítulo 1", archivo "Figura 1.7.bmp"). La parcela de 50 × 50 m se dividió en cuadradados encajados de 5 y 1 m de lado. Dentro de cada cuadrado de 1 × 1 m se cartografiaron los doseles de todas las especies perennes presentes. Con el fin

de evitar un excesivo número de clases, los caméfitos fueron agrupados en una sola clase. Los mapas tomados en el campo se digitalizaron utilizando el software Adobe Photoshop 5.0 (Adobe Systems Inc., San José, USA), importándose posteriormente a un sistema de información geográfica (SIG), el programa Idrisi para Windows 2.0 (Eastman 1997). Del total de especies presentes en la parcela se utilizaron en este artículo *S. tenacissima*, *G. alypum*, *B. retusum*, *A. cytisoides* y los caméfitos, que en conjunto constituyen más del 90 % del total de cobertura vegetal. Para evaluar el efecto que el tamaño de la unidad de muestreo tiene en los resultados del análisis, se subdividió el mapa original mediante el SIG en cuadrados de 5×5, $2{,}5 \times 2{,}5$ y $1{,}25 \times 1{,}25$ m, dando lugar a una malla regular con 100, 400 y 1600 puntos de muestreo respectivamente. Para cada unidad de muestreo se calculó con el SIG la cobertura de las distintas especies, dividiendo la superficie ocupada por cada una de ellas por la superficie total del cuadrado.

4.6.2.2. Análisis estadísticos

El patrón espacial de cada una de las especies se analizó por separado para las tres mallas de muestreo tal como se ha descrito en el apartado 4.2. Para evaluar los patrones de covariación mediante SADIE se realizó una matriz de correlaciones con los valores de v para cada malla de muestreo, siguiendo los procedimientos indicados en el apartado 4.3. El nivel de significación de las correlaciones se ajustó utilizando la corrección de Bonferroni (Quinn y Keough 2002). Previamente al análisis SADIE, los datos de cobertura fueron categorizados en 10 categorías (deciles) utilizando el programa SPSS 9.0 para Windows.

4.6.2.3. Resultados

SADIE detectó la presencia de patrones espaciales no aleatorios para la cobertura de la mayor parte de especies (Tabla 4.5). El patrón espacial de *S. tenacissima*, *G. alypum* y *A. cytisoides* fue agregado para todas las mallas de muestreo, tal como indican los valores de I_a. En el caso de *B. retusum* y los caméfitos, este patrón fue aleatorio en la malla de mayor tamaño de celda, siendo agregado en el resto. Los valores de V_j y V_i obtenidos para todas las especies indicaron la presencia de manchas y claros en la zona estudiada. En general, se observó un incremento en el nivel de agregación con el aumento de la resolución. Los mapas de v revelaron la presencia de complejos patrones espaciales para las distintas especies (Fig. 4.11). *Stipa tenacissima*

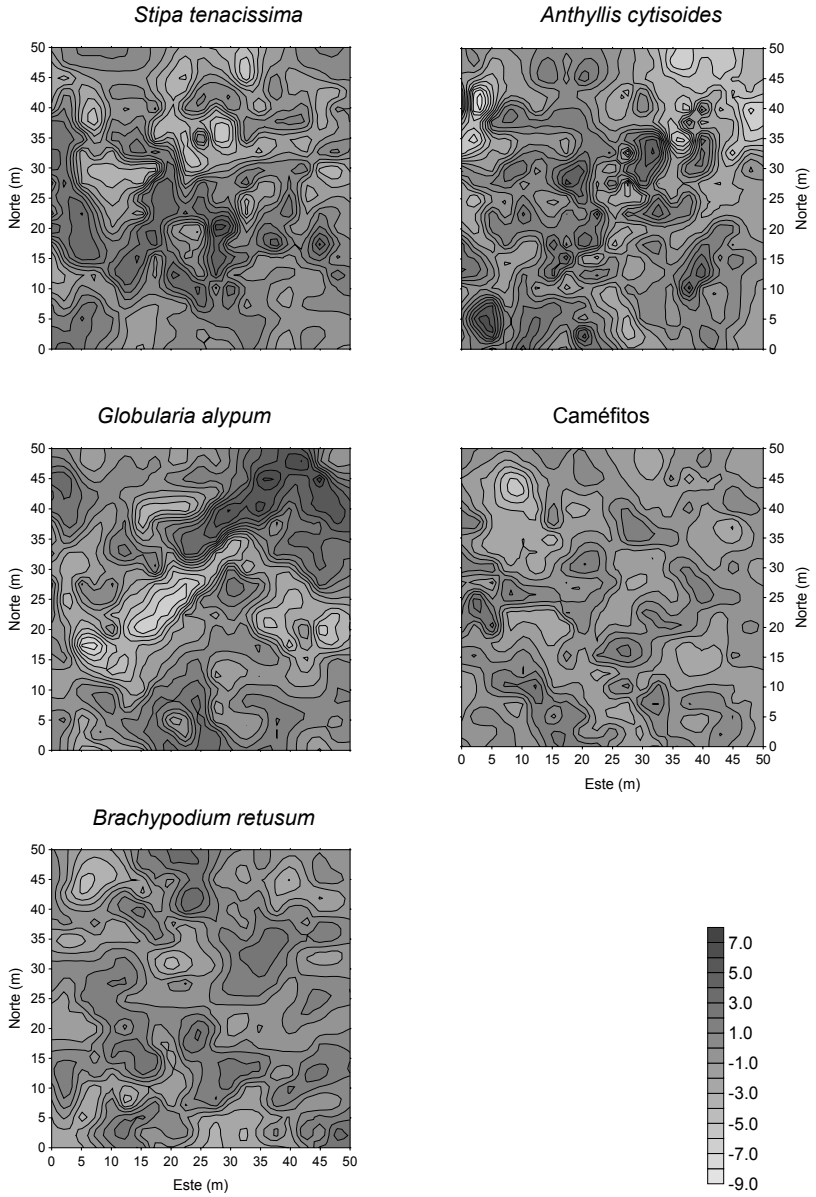


Figura 4.11. *Mapas del índice de agrupación* (v) *para distintas especies de plantas vasculares presentes en un espartal de Aigües de Busot (Alicante). las distintas especies evaluadas utilizando la malla de muestreo de 2,5 ×2,5 m. La leyenda no tiene unidades. Para un mapa detallado de la vegetación en la zona de estudio véase Maestre (2002). Una versión en color de esta figura se encuentra en el CD adjunto (carpeta "Capítulo 4", archivo "Figura 4.11.doc").*

presentó una distribución fuertemente agregada, con una zona principal de manchas en el centro de la parcela. *Globularia alypum* mostró una zona de manchas en la esquina superior derecha de la parcela, con un claro en la zona central coincidente con la principal zona de agregación de *S. tenacissima*. *Brachypodium retusum* y los caméfitos presentaron una distribución de manchas y claros homogéneamente repartida por la parcela. El patrón espacial de *A. cytisoides* mostró cierta similitud con el de *S. tenacissima*, aunque las manchas se situaban preferentemente en la dirección SW-NE. Los mapas obtenidos con las distintas mallas de muestreo mostraron la misma distribución general de manchas y claros, aunque se observa un aumento en la definición y el grado de agregación al incrementar la resolución.

Tabla 4.5. *Resumen del análisis SADIE de las principales especies perennes en un espartal de 50 ×50 m situado en Alicante. El nivel de significación obtenido en el test de permutaciones se muestra entre paréntesis.* I_a = *índice de agregación,* V_i = *media del índice de agrupación para las manchas y* V_j = *media del índice de agrupación para los claros. Los valores significativos (P < 0.05 ó P > 0.95) se indican en negrita.*

Especie	Malla	I_a	V_i	V_j
Stipa tenacissima	5 × 5 m	1,53 (**0,002**)	1,47 (**0,009**)	-1,46 (**0,010**)
	2,5 × 2,5 m	2,15 (**<0,001**)	2,04 (**<0,001**)	-1,93 (**<0,001**)
	1,25 × 1,25 m	2,93 (**<0,001**)	2,89 (**<0,001**)	-2,98 (**<0,001**)
Globularia alypum	5 × 5 m	1,59 (**0,004**)	1,45 (**0,007**)	-1,45 (**0,009**)
	2,5 × 2,5 m	2,42 (**<0,001**)	2,18 (**<0,001**)	-2,28 (**<0,001**)
	1,25 × 1,25 m	3,60 (**0,001**)	3,64 (**<0,001**)	-3,67 (**<0,001**)
Brachypodium retusum	5 × 5 m	1,20 (0,102)	1,17 (0,119)	-1,12 (0,169)
	2,5 × 2,5 m	1,57 (**0,001**)	1,45 (**0,008**)	-1,51 (**0,003**)
	1,25 × 1,25 m	2,33 (**<0,001**)	2,15 (**<0,001**)	-2,21 (**<0,001**)
Anthyllis cytisoides	5 × 5 m	2,26 (**<0,001**)	2,21 (**<0,001**)	-2,30 (**<0,001**)
	2,5 × 2,5 m	2,26 (**<0,001**)	2,14 (**<0,001**)	-2,28 (**<0,001**)
	1,25 × 1,25 m	2,82 (**<0,001**)	2,77 (**<0,001**)	-2,80 (**<0,001**)
Caméfitos	5 × 5 m	1,10 (0,227)	1,10 (0,205)	-1,07 (0,268)
	2,5 × 2,5 m	1,45 (**0,003**)	1,43 (**0,012**)	-1,45 (**0,009**)
	1,25 × 1,25 m	1,74 (**0,001**)	1,76 (**0,001**)	-1,76 (**0,001**)

Por lo que respecta a los análisis de covariación, las correlaciones obtenidas exhibieron ligeros cambios con el tamaño del cuadrado de muestreo, aunque en la mayor parte de los casos el signo de la interacción se mantuvo (Tabla 4.6). El rasgo más destacable del conjunto de correlaciones es la presencia de una clara disociación entre la distribución espacial de *G. alypum* y la del resto de especies, siendo significativas las relaciones con *A. cytisoides* y

S. tenacissima en todas las mallas. En la malla de 5 × 5 m se encontró una asociación positiva entre los patrones espaciales de *S. tenacissima* y *A. cytisoides*, que no fue evidente en las mallas de 2,5 × 2,5 m y 1,25 × 1,25 m. Por el contrario, tan sólo en esta última malla, de mayor resolución, se detectó una relación positiva entre los patrones de *A. cytisoides* y *B. retusum*.

Tabla 4.6. *Matriz de correlaciones entre los valores del índice de agrupación (v) de las principales especies perennes en un espartal de 50 ×50 m situado en Alicante. S. t.* = Stipa tenacissima, *G. a.* = Globularia alypum, *B. r.* = Brachypodium retusum, *A. c.* = Anthyllis cytisoides, *C. s.* = caméfitos.

Malla de muestreo	Especie				
5 x 5 m		S. t.	G. a.	B. r.	A. c.
$n = 100$	S. t.				
	G. a.	-0,435*			
	B. r.	-0,072	-0,216		
	A. c.	0,445*	-0,456*	0,066	
	C. s.	0,191	-0,144	-0,013	0,232
2.5 x 2.5 m					
$n = 400$	S. t.				
	G. a.	-0,235*			
	B. r.	-0,160	-0,142		
	A. c.	-0,004	-0,320*	0,105	
	C. s.	0,071	-0,055	0,022	0,070
1.25 x 1.25 m					
$n = 1600$	S. t.				
	G. a.	-0,204*			
	B. r.	-0,226*	-0,089		
	A. c.	0,015	-0,248*	0,143*	
	C. s.	0,083	-0,020	0,116	0,039

* Relación significativa tras la corrección de Bonferroni ($P < 0.005$).

4.6.2.4. Discusión

El análisis de la vegetación perenne en la zona de estudio mediante SADIE refleja su estructura en mosaico, tal como se ha descrito en numerosas zonas áridas y semiáridas de todo el planeta (Valentin *et al.* 1999). SADIE identificó la agrupación significativa de la cobertura de todas las especies a pequeña escala, que se manifiesta especialmente en las mallas de mayor re-

solución. Asimismo, esta técnica permitió distinguir entre los patrones espaciales de *S. tenacissima*, *A. cytisoides* y *G. alypum*, que presentaron otros niveles de agregación apreciables a menor resolución, y *B. retusum* y caméfitos, que muestran una distribución aleatoria, no estructurada, cuando se emplean unidades de muestreo de 5 × 5 m.

Los resultados obtenidos con las matrices de correlaciones señalan la existencia de una clara disociación entre la distribución espacial de *G. alypum* y la del resto de especies, lo que sugiere la presencia de una relación de interferencia entre ellas. Las hojas de *G. alypum* son ricas en flavonoides, glucósidos y ácidos fenólicos (Rivera y Obón 1991), por lo que es posible que los patrones observados estén mediados por interacciones alelopáticas. Asimismo, dichas matrices revelaron la existencia de una asociación entre los patrones espaciales de *B. retusum* y *A. cytisoides*, que pudo deberse a una interacción facilitativa entre ambas. Es interesante apuntar que el 46 % del total de manchas de *A. cytisoides* estuvieron en contacto con *B. retusum* y, de éstas, el 91 % se encontraban completamente confinadas por esta herbácea. Asimismo, el diámetro de estas últimas fue más pequeño que el de aquellas que únicamente estaban en contacto con esta herbácea (datos no mostrados). Si bien estos datos no permiten establecer conclusiones firmes al respecto, sugieren que *B. retusum* puede estar facilitando el establecimiento de plántulas de *A. cytisoides* en el espartal evaluado. El suelo existente debajo de *B. retusum* presenta más materia orgánica, mayor estabilidad de agregados y actividad microbiana que el de las zonas desnudas (Roldán *et al.* 1994; Cerdà 1998). Esta mejora en las condiciones edáficas, junto a la disminución de la radiación, puede favorecer el establecimiento de plántulas de *A. cytisoides* debajo de individuos de *B. retusum*.

La falta de afinidad a distancias cortas entre los patrones de *S. tenacissima* y del resto de especies y la aparente disociación entre los patrones de *S. tenacissima* y *B. retusum*, pueden estar en parte determinados por la naturaleza de los datos y el tipo de muestreo. En condiciones naturales es frecuente cierto solapamiento en la vertical de los doseles de especies diferentes. Por ejemplo, es frecuente encontrar individuos de *B. retusum* creciendo bajo el "paraguas" de las macollas de *S. tenacissima*. Estos hechos no se consideraron en la adquisición de datos para generar la cartografía de la vegetación. También es posible que la escala a la que se producen las interacciones positivas propiciadas por el desarrollo de las islas de fertilidad alrededor de *S. tenacissima* sea más pequeña que la mayor resolución empleada en este estudio. Así, García-Fayos y Gasque (2002), observaron una asociación positiva y significativa entre dis-

tintas especies arbustivas y las pequeñas terrazas que se forman en la parte superior de *S. tenacissima* en espartales del sudeste peninsular.

La idoneidad de las mallas de muestreo utilizadas debe considerarse en función de las diferencias en el tamaño que presentan las distintas especies que componen el espartal estudiado. En el caso de *S. tenacissima* y *B. retusum*, existieron cuadrados de muestreo en la malla de 1,25 × 1,25 m con una cobertura del 100 %, si bien su frecuencia fue inferior al 0.5 % del total en ambas especies. La utilización de esta malla no es adecuada para describir la covariación de *S. tenacissima* o *B. retusum* con otras especies, indicando los datos que la malla de 5 × 5 m es la más apropiada para el análisis de la distribución espacial de estas especies. No obstante, para *G. alypum* y *A. cytisoides* esta malla no permitió detectar las agregaciones a pequeña escala encontradas en estas especies, lo que aconseja utilizar una resolución mayor. Por su parte, la distribución aleatoria observada en los caméfitos en la malla de 5 × 5 m puede ser explicada por el pequeño tamaño de estos arbustos en comparación con el de las unidades muestrales. El diámetro de las manchas para esta categoría fue de 31.1 ± 12 cm (media ± desviación estándar, n = 143) y más del 82 % de las mismas tuvo un diámetro inferior a 40 cm.

4.6.3. Dinámica espacio-temporal de la supervivencia de una repoblación semiárida

Este ejemplo proviene de un estudio realizado por Maestre *et al.* (2003c) en el marco de un proyecto de restauración de una zona degradada del sur de Alicante, y con él se ejemplifica la utilización de SADIE en combinación con técnicas de análisis multivariantes. Los objetivos de este trabajo fueron: (i) analizar el patrón espacial de la supervivencia de una repoblación de *Pistacia lentiscus* L. a escala de parcela y (ii) evaluar la dinámica temporal de este patrón durante los primeros años tras la plantación. Los datos originales utilizados en este ejemplo se encuentran en el CD adjunto (carpeta "Capítulo 4", archivo "pistacia.xls").

4.6.3.1. Zona de estudio y adquisición de datos

Este estudio se llevó a cabo en una parcela experimental de 100 × 28 m localizada cerca de Crevillente, en la provincia de Alicante. El clima es termomediterráneo semiárido, con una precipitación media anual de 277 mm y una

temperatura media anual de 20.1 ºC (período 1960-1990; Pérez Cueva 1994). La parcela presenta una pendiente del 32 % (Fig. 1) y una orientación de 260 º SW. La vegetación natural es escasa y presenta una cobertura inferior al 30 %, estando compuesta principalmente por caméfitos como *Fagonia cretica* L., *Sideritis leucantha* Cav. subsp. *leucantha* y *Thymus vulgaris* L. subsp. *vulgaris*.

En diciembre de 1997 se plantaron aleatoriamente y mediante ahoyado mecánico de 40 × 40 × 40 cm 205 individuos de una variedad local de *P. lentiscus*, dando una densidad de 732 plantones·ha^{-1}. La localización espacial de los plantones se realizó durante la primavera de 2000, utilizando para ello una estación total (modelo TC1101, Leica, Heerbrugg, Suiza). Para caracterizar la respuesta de los plantones se evaluó su supervivencia durante los tres años posteriores a la plantación, evaluándola cuatro veces durante el primer año (abril, julio, septiembre y noviembre de 1998), dos veces en el segundo (abril y noviembre de 1999) y tres veces en el tercero (abril, septiembre y diciembre de 2000). Durante este tiempo no se procedió en ningún momento a regar o fertilizar los plantones de manera artificial, transcurriendo la experiencia en condiciones naturales.

4.6.3.2. Análisis estadísticos

El patrón espacial de la supervivencia se caracterizó para cada uno de los muestreos utilizando SADIE tal como se ha descrito en el apartado 4.2. Los cambios en el tiempo del patrón espacial de la supervivencia se evaluaron con un análisis de componentes principales (ACP) de los valores de v correspondientes a los diferentes muestreos. Los valores de v para todos ellos mostraron desviaciones significativas de la normalidad (test de Kolmogorov-Smirnoff, $P < 0.001$) y cierto grado de autocorrelación. No obstante, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) con rotación Varimax sin transformar los datos, ya que tanto las desviaciones de la distribución normal como la autocorrelación no afectan en gran medida a este análisis (Webster 2001).

4.6.3.3. Resultados

La precipitación durante el periodo de estudio varió entre 142 y 181 mm, un 52-65 % de la precipitación media anual. Estos años de escasa precipitación no son inusuales en la zona de estudio, donde el 56 % de los años

presentan precipitaciones inferiores a la media anual (Pérez Cueva 1994). La supervivencia tres años después de la plantación fue del 36 %. La evolución de la supervivencia mostró la presencia de un período de mortalidad principal durante el primer verano (1998), y dos períodos donde se produjo una mortalidad menor en la primavera de 1998 y el verano de 2000.

El análisis SADIE indicó la presencia de un patrón aleatorio en la mortalidad en los muestreos de abril y julio de 1998 (Fig. 4.12). Después del primer verano en el campo el patrón espacial es significativamente agregado, como lo muestran los valores de I_a. Los valores significativos de V_i y V_j indican la formación de manchas (zonas de elevada supervivencia) y claros (zonas de baja supervivencia). Hay una tendencia general hacia un incremento de todos los índices SADIE con el tiempo, indicando un aumento del grado de agregación de los datos. Los mapas de v muestran la distribución de las manchas y los claros dentro de la zona de estudio para los distintos muestreos (Fig. 4.13). Antes del primer verano en el campo, el patrón espacial es aleatorio, y sólo dos manchas principales que cruzan la parcela de norte a sur en la parte derecha de la parcela pueden apreciarse claramente. En septiembre de 1998 hay un primer cambio en esta distribución, y varias manchas comienzan a ser aparentes en esta parte derecha, a la vez que un claro principal se hace visible en el centro de la parcela. Este patrón permanece prácticamente sin cambios hasta diciembre de 2000, y sólo un incremento de tamaño en la mancha principal y un aumento en el grado de agregación de las manchas presentes en la parte derecha de la parcela son apreciables.

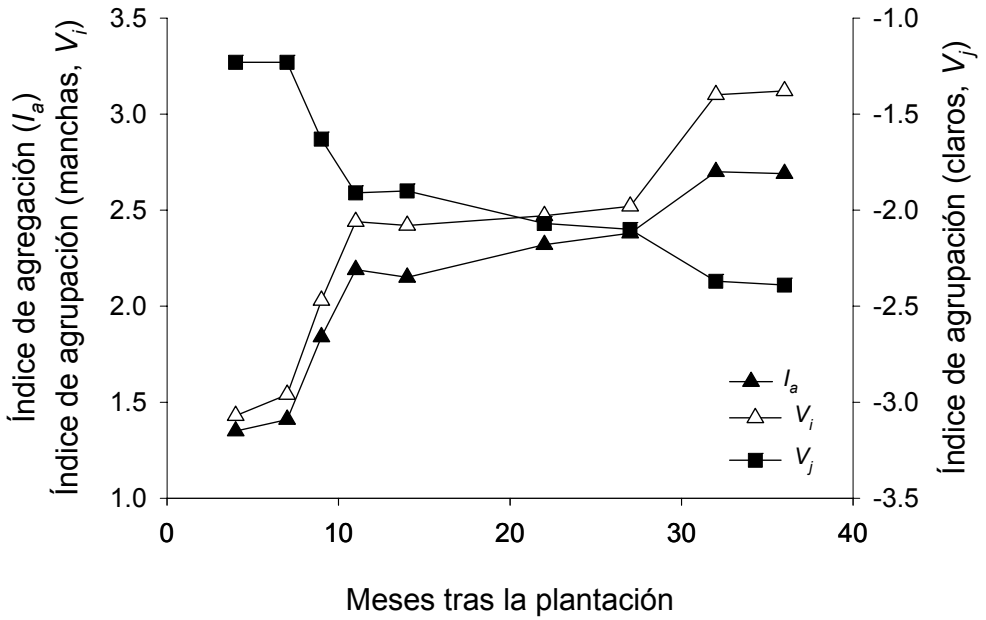


Fig. 4.12. *Resultados del análisis SADIE de la supervivencia de una repoblación de* Pistacia lentiscus *durante los tres primeros años tras la plantación* (n = *205).* I_a = *índice de agregación,* V_i = *media del índice de agrupación para las manchas y* V_j = *media del índice de agrupación para los claros. El nivel de significación de todos los índices a partir de los 10 meses tras la plantación fue menor de 0.05. Adaptada de Maestre et al. (2003c).*

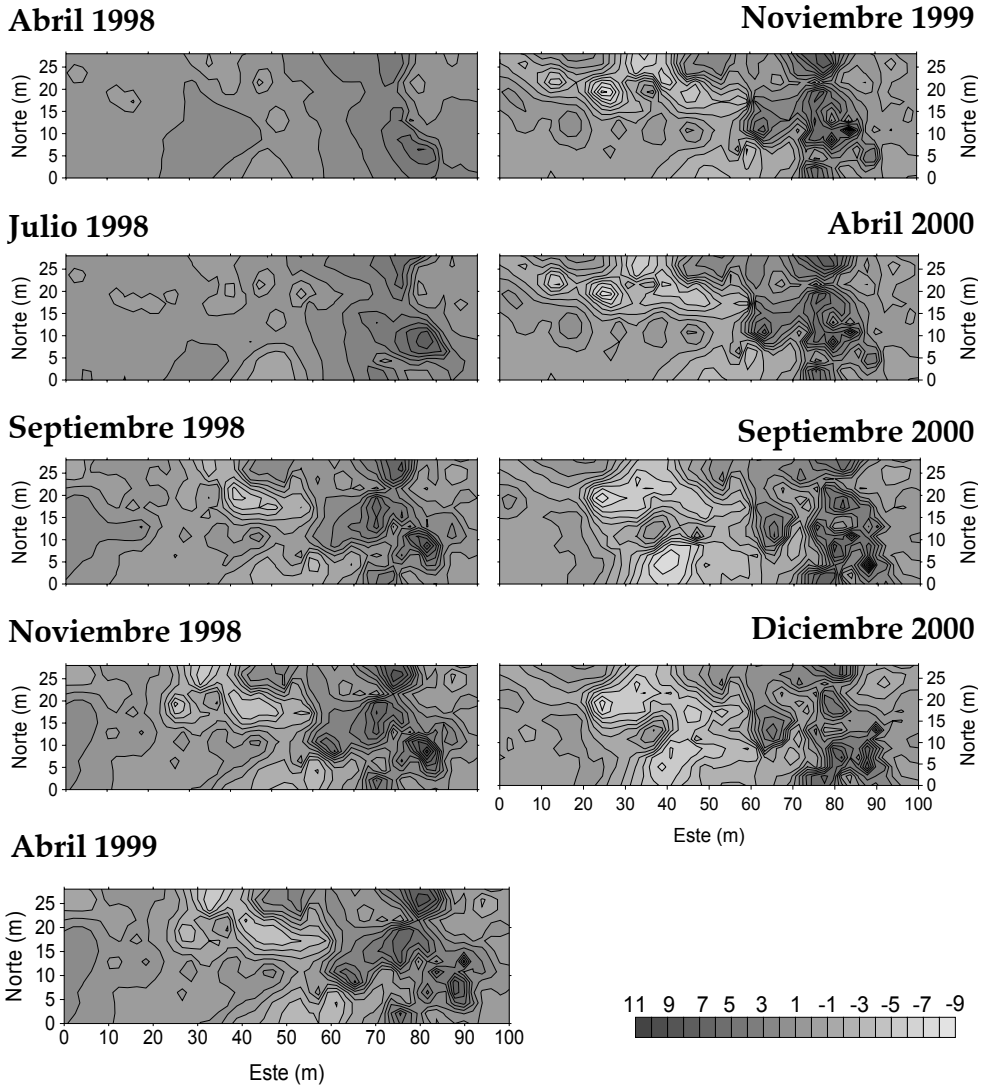


Figura 4.13. *Mapas del índice de agregación* (v) *para la supervivencia de* Pistacia lentiscus *durante los tres años posteriores a la plantación. La distribución de las manchas (zonas de elevada supervivencia) y los claros (zonas de baja supervivencia) se muestra en violeta y amarillo respectivamente. Los valores de la escala no tienen unidades. Adaptada de Maestre et al. (2003c). Una versión en color de esta figura se encuentra en el CD adjunto (carpeta "Capítulo 4", archivo "Figura 4.13.jpg").*

Los tres primeros ejes del ACP explicaron un 88 % de la varianza en los datos, y claramente discriminaron tres grandes grupos de muestreos (Fig. 4.14). Estos cambios están relacionados con los principales incrementos del grado de agregación de la supervivencia, como ocurre entre junio y septiembre de 1998 y entre abril y septiembre de 2000.

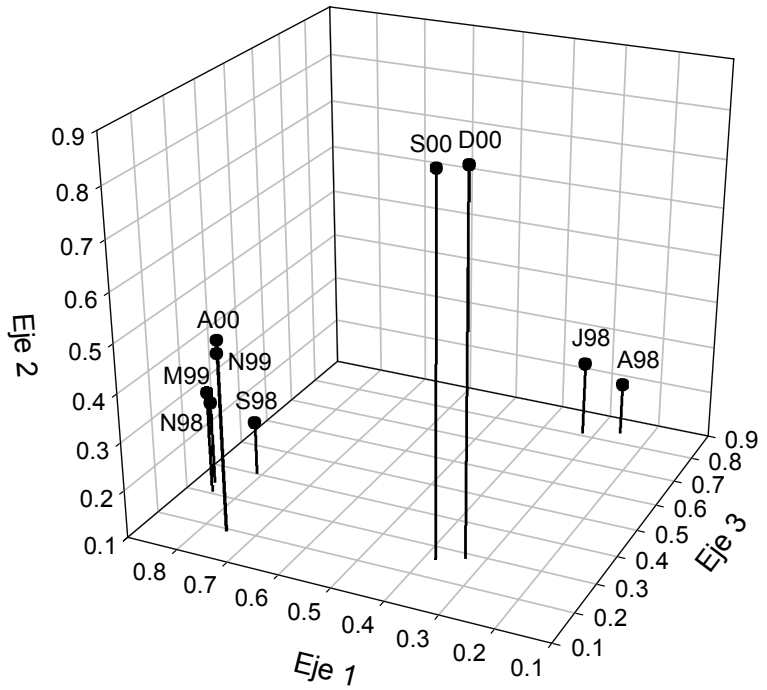


Figura 4.14. *Análisis de componentes principales con rotación Varimax del índice de agregación* (v) *para los distintos periodos de muestreo (n = 205). A98 = abril 1998, J98 = julio 1998, S98 = septiembre 1998, N98 = noviembre 1998, A99 = abril 1999, N99 = noviembre 1999, A00 = abril 2000, y S00 = septiembre 2000. Adaptada de Maestre et al. (2003c).*

4.6.3.4. Discusión

Los resultados muestran la presencia de un claro patrón espacial en la supervivencia de los plantones de *P. lentiscus* durante los primeros años tras la plantación. Este patrón espacial comienza a ser definido durante los primeros meses tras la plantación, llegando a establecerse claramente después de la mortalidad ocurrida durante el primer verano en el campo.

En zonas áridas y semiáridas, la disponibilidad de agua es el principal factor que va a condicionar el establecimiento de los plantones introducidos durante las actividades de restauración (Whisenant 1999). En estas áreas, se ha sugerido que la supervivencia de estas plantas está directamente relacionada con la duración de la sequía estival (Alloza y Vallejo 1999). Los resultados obtenidos en este trabajo apoyan esta hipótesis, ya que los principales episodios de mortalidad tuvieron lugar durante los veranos de 1998 y 2000, dos períodos donde sólo se recogieron 27 y 18 mm de lluvia entre junio y septiembre, respectivamente. El verano de 1999 vino caracterizado por una baja mortalidad, que puede explicarse por las mejores condiciones climáticas registradas, con una precipitación recibida de 40 mm y temperaturas más bajas durante el mismo período.

La combinación del análisis SADIE con el ACP permitió explorar la dinámica temporal del patrón espacial de la supervivencia durante los primeros años tras la plantación. Esta evolución estuvo marcada por dos características principales; el incremento en el grado de agregación con el tiempo y un fuerte grado de consistencia entre los diferentes muestreos. Esta coherencia sugiere que los primeros meses tras la plantación son fundamentales para delimitar las principales áreas de supervivencia, a pesar de que pequeños cambios ocurrieron después de los principales episodios de mortalidad.

El establecimiento de programas de seguimiento para evaluar el éxito de una repoblación es una parte fundamental de las actividades de restauración (Holl y Howarth 2000). Información sobre la dinámica espacio-temporal de la supervivencia de los plantones introducidos puede ser utilizada para mejorar la gestión y diseñar programas efectivos de seguimiento tras la plantación. Una de las actividades fundamentales dentro del seguimiento y cuidado post-plantación, especialmente en zonas de clima semiárido donde la mortalidad inicial es elevada, es la reposición de marras (Serrada 1997). Los mapas del índice v producidos por SADIE pueden ser utilizados para optimizar esta actividad, ya que permiten distinguir estadísticamente las áreas donde la mortalidad ocurre al azar de aquellas donde la mayor parte de los plantones están muertos. Estas últimas no deberían utilizarse para reponer marras a menos que se aplique alguna medida correctora que disminuya el riesgo de mortalidad. La selección de las zonas de reposición de marras utilizando estos mapas permitiría reducir notablemente los costos económicos asociados a esta actividad. Asimismo, también pueden utilizar-

se como punto de partida de investigaciones para elucidar las posibles causas que han originado la mortalidad de los plantones.

La consistencia encontrada en el patrón espacial durante los tres primeros años tras la plantación resalta la importancia de la fase de aclimatación a las condiciones de campo para el establecimiento de los plantones bajo condiciones semiáridas. Los resultados obtenidos sugieren que el seguimiento de los plantones debe concentrarse durante el primer año tras la plantación, especialmente después del primer verano en el campo, un período clave para el establecimiento de los plantones bajo condiciones mediterráneas (Alloza y Vallejo 1999, Maestre *et al.* 2001).

4.7. REVISIÓN DE SOFTWARE

Todos los análisis descritos en este capítulo pueden realizarse con una serie de programas realizados por el creador de SADIE, Joe Perry, y su equipo de colaboradores (fundamentalmente Kelvin Conrad y Colin J. Alexander). Estos programas, que son totalmente gratuitos ("freeware"), funcionan en cualquier ordenador personal (PC) con sistema operativo Windows (versión 95 y superiores). Para aquellos que trabajen con otros sistemas operativos, o que prefieran disponer del código fuente, existen también versiones de los programas en lenguaje Fortran, que pueden ser posteriormente compiladas para ser utilizadas con cualquier sistema operativo.

Se describen a continuación de forma breve las principales funcionalidades de los programas empleados para realizar los análisis SADIE presentados en este capítulo. Para una descripción detallada de su funcionamiento se recomienda al lector consultar el manual de instrucciones disponible para cada programa.

4.7.1. SADIEShell

SADIEShell es una interfaz gráfica bajo entorno Windows que permite realizar todos los análisis SADIE (obtención de los índices I_a, V_i, V_j y χ, con sus correspondientes test de permutaciones y numerosa información para análisis posteriores) de una forma sencilla e intuitiva. El programa y

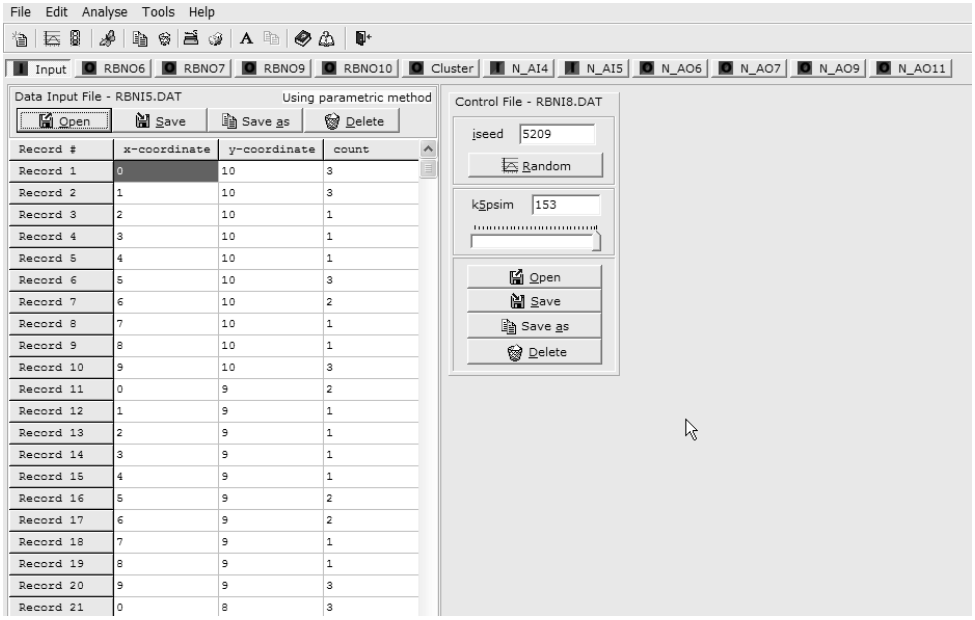
su correspondiente documentación puede descargarse de la página web de SADIE (*http://www.rothamsted.ac.uk/pie/sadie/*).

Básicamente, SADIEShell controla dos archivos ejecutables, "rebrelv13.exe" y "n_a.exe", que se activan mediante iconos que contienen un semáforo y una mariposa, respectivamente (Fig. 4.15A). La aplicación "rebrelv13.exe" sirve para analizar el patrón espacial de variables individuales y calcula los índices I_a, V_i y V_j, con sus correspondientes tests estadísticos, y el valor de para cada punto de muestreo. La aplicación "n_a.exe" permite realizar los análisis de asociación/disociación local y global y calcula el coeficiente de correlación entre los valores de dos variables y el índice. Para que sendas aplicaciones funcionen correctamente en SADIEShell, se debe seleccionar una carpeta donde se incluyan todos los ficheros de entrada necesarios y en la que se generarán los ficheros con los resultados. En el caso de "rebrelv13.exe" la carpeta se puede crear activando el icono "new project" situado en la esquina superior izquierda de la pantalla (Fig. 4.15A). En el caso de "n_a.exe", activando el botón en el que se dibuja una mariposa, aparecerá una ventana para seleccionar la carpeta (Fig. 4.15B).

Los ficheros de entrada pueden ser creados fácilmente con formato texto delimitado por tabulaciones (*.dat ó *.txt). Para el caso de "rebrelv13.exe" se necesitan dos ficheros de entrada, "rbni5.dat" y "rbni8.dat". El primero debe poseer tres columnas, dos de posición (coordenadas x, y) y una con el valor de la variable objeto de estudio, el segundo sólo esta compuesto por dos números, uno que contiene la "semilla" para comenzar las permutaciones y otro que indica el número de randomizaciones a realizar (en bloques de 39, si ponemos 30 el programa utilizaría 1.170 permutaciones). El fichero "rbni5.dat" se abre directamente desde SADIEShell, mientras que el "rbni8.dat" puede generarse directamente desde el programa. Nosotros recomendamos seleccionar el máximo número posible de permutaciones (5.967 en la versión actual), ya que cualquier ordenador personal actual será capaz de realizar los análisis SADIE en varios minutos. SADIEShell ofrece también la alternativa de usar el método no paramétrico para distribuciones de datos muy sesgadas descrito en el apartado 4.4.1. La ejecución del programa "rebrelv13.exe" produce los siguientes archivos de salida (independientemente de que se use la versión paramétrica o no paramétrica de SADIE):

- "rbno6.dat": contiene el número de puntos de muestreo, el número de parámetros introducidos en el archivo "rbni8.dat", el número de

A)



B)

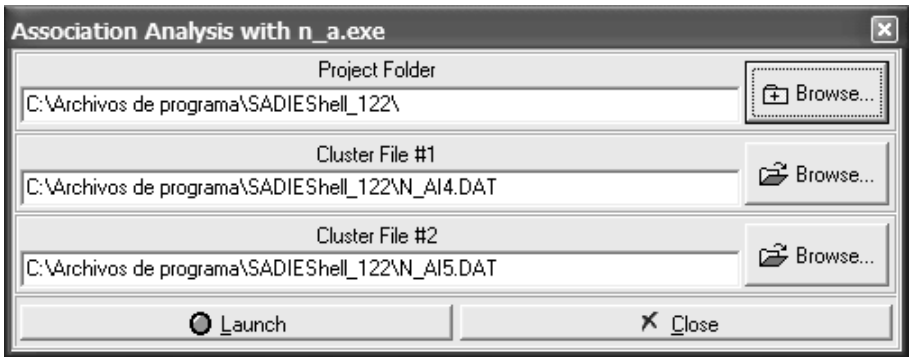


Figura 4.15. *Aspecto general del programa SADIEShell (A) y detalle de la ventana del análisis de asociación espacial entre dos variables (B), que se abre al pulsar sobre el icono señalado con un círculo verde. El icono que activa el análisis del patrón espacial de una variable viene marcado con un círculo rojo.*

permutaciones y algunos estadísticos que resumen algunas características del patrón espacial de los datos (coordenadas del centroide de las unidades de muestreo, coordenadas del centroide de los valores de la variable objetivo de estudio, distancia máxima entre dos unidades de muestreo, media, varianza e índice de dispersión).

- "rbno7.dat": contiene la media de la variable objeto de estudio, el valor de D observado para los datos, su significación estadística, la media de D para las permutaciones, el índice I_a, el valor de para cada punto de muestreo (con información adicional necesaria para calcular cada valor de v) los índices V_i y V_j (con sus correspondientes tests estadísticos) y el índice J, no discutido en este capítulo por ser un índice en desuso en la actualidad (para más información sobre el mismo puede consultarse Perry 1995b, 1998).
- "rbno9.dat": este archivo contiene numerosa información para realizar algunas representaciones gráficas de interés, como los gráficos "inicial y final" y otros gráficos presentados en Perry et al. (1999). También contiene los valores de D para cada una de las permutaciones, los valores de v para cada unidad de muestreo, los valores medios de v para cada permutación, así como otra información presente también en el "rbno7.dat".
- "rbno10.dat": contiene los índices I_a, V_i y V_j, con sus correspondientes P valores bajo la hipótesis nula de una distribución aleatoria de la variable objeto de estudio.
- "cluster.dat": este archivo contiene las coordenadas de los datos (columnas 1 y 2) y los valores de v (columna 3), y puede utilizarse directamente para la realización de mapas bidimensionales con programas como Surfer y para el análisis de asociación/disociación con el programa "n_a.exe".

Para ejecutar la aplicación "n_a.exe" se necesitan dos ficheros: "n_ai4.dat" y "n_ai5.dat" que pueden obtenerse a partir de los archivos "cluster.dat" de las dos variables objeto de estudio. Cada uno de ellos llevará tres columnas, dos con las coordenadas x e y, una tercera con los valores del índice de agrupación de la variable a analizar (v). Sendos ficheros se capturan desde SADIEShell activando el botón en el que se dibuja una mariposa. Al igual que con "rebrelv13.exe" se requiere también un tercer fichero, "n_ai8.dat", análogo a "rbni8.dat" y salvado de la misma manera anteriormente descrita. La ejecución del programa "n_a.exe" produce los siguientes archivos de salida:

- "n_ao6.dat": contiene los parámetros seleccionados para los análisis y los datos utilizados, junto con un análisis previo para comprobar si las coordenadas coinciden en los dos archivos.
- "n_ao7.dat": en este archivo podemos encontrar los valores del índice χ, los valores del índice χ_i para cada unidad de muestreo y sus correspondientes tests estadísticos.
- "n_ao9.dat": contiene todos los valores del índice χ derivados de las permutaciones, así como todos los detalles del análisis de tendencias descrito en el apartado 4.3.1.
- "n_ao11.dat": el contenido de este archivo es irrelevante para la mayor parte de usuarios, ya que alberga información relativa al ajuste de Dutilleul (1993a), de interés únicamente para aquellos usuarios avanzados que deseen calcular sus propios ajustes.

Por último, conviene mencionar que cada vez que se ejecuta "rebrelv13.exe" o "n_a.exe" hay que renombrar los archivos de salida, ya que si no se hace SADIEShell escribirá encima de los mismos los resultados de cada nuevo análisis.

4.7.2. SADIE Tools

Este programa se compone de cuatro herramientas que facilitan al usuario los pasos a seguir en los análisis del patrón espacial y los análisis de asociación descritos en el apartado anterior, así como otros análisis SADIE de interés. Estas herramientas se describen a continuación:

- *Association extractor*: extrae la sección del fichero "n_ao7.dat" que contiene los índices de asociación local (χ), los cuales vienen acompañados por gran cantidad de texto explicativo, lo que hace dificultoso extraer dichos índices manualmente. Esta herramienta facilita esta tarea simplemente seleccionando en el programa el fichero "n_ao7.dat" de interés y automáticamente se generará otro fichero con los índices de asociación local así como su posición (coordenadas x, y). Adicionalmente, es posible elegir el formato del nuevo fichero, ya sea de impresión, separado por comas o por tabulaciones (este último se recomineda para importar a Excel).
- *Results collector*: es una herramienta análoga a la descrita anteriormente, solo que en este caso extrae la parte del fichero "n_ao7.dat"

que contiene el resumen de los estadísticos generados así como los intervalos de confianza de los análisis de asociación local decritos en el apartado 4.3.2. (aplicación "n_a.exe").

- *ClusterShell*: es una interfaz Windows que facilita el manejo de los ficheros de entrada y salida de la aplicación "clusterxyc.exe", que define el centroide y los límites de cada agrupación (mancha o claro) además de examinar las distancias mínimas entre ellas. Se debe destacar que este programa esta diseñado para áreas de muestro rectangulares. Pese a ello, si nuestros datos no cumplen esta característica, podemos generar una parrilla rectangular mediante cualquier técnica de interpolación (e.g. krigging). Como la mayoría de las aplicaciones SADIE, la aplicación "clusterxyc.exe" necesita dos ficheros de entrada, "clusteri5.dat", que contiene los valores de los índices de agrupación de cada unidad de muestreo, y "clusteri8.dat" que contiene los valores de límite de las agrupaciones (por defecto, = 1,5 para las manchas y = – 1,5 para los claros). Tras la rutina se generarán tres ficheros, "clustero6.dat", "clustero7.dat" y "clustero9.dat", de los cuales, éste último es el más interesante ya que describe las agrupaciones como hemos señalado anteriormente.
- *DOS Watcher SADIE debug tool*: en ocasiones es difícil conocer las causas por las que las aplicaciones SADIE (p. ej. "rbrelv13.exe" y "n_a.exe") no funcionan adecuadamente, ya que si existe algún problema, éstas simplemente dejan de procesar sin mensaje o aviso de error. *DOS Watcher* localiza estos problemas para que puedan ser solventados. El programa es una versión reducida de la interfaz Windows *SADIEShell* consistente en una única ventana donde se introducen los ficheros de entrada, se selecciona el tipo de análisis y, en la mitad superior de la ventana aparecerán los errores que han impedido que las aplicaciones se hayan completado con éxito. Ya que el programa esta diseñado para corregir posibles errores, alberga la opción de correr los análisis sólo con tres permutaciones para evitar que la rutina se prolongue en el tiempo.

El programa y su correspondiente documentación puede descargarse de la página web de Kelvin Conrad (*http://www.rothamsted.ac.uk/pie/kfconrad /download.htm*).

4.7.3. *ViVj extractor* y *PC2 Calculator*

En el apartado 4.4.2. hemos explicado un modo de evaluar el grado de agrupación de las manchas frente a los claros. La herramienta *ViVj extractor* realiza el primer paso de este procedimiento, extrayendo del fichero "rbno9.dat" los valores medios de los índices de agrupación procedentes de cada permutación, asi como V_i y V_j observados. *ViVj extractor* funciona de forma análoga al programa Association extractor, explicado en el apartado anterior.

Como ya hemos descrito, los valores medios de los índices de agrupación de cada permutación, más los valores de V_i y V_j observados, se utilizan para efectuar un análisis de componentes principales, los cuales se ordenan en una distribución de frecuencias para compararlos con los valores observados mediante un test de dos colas. Este último paso se puede realizar con PC2 calculator, una macro de Excel que facilita los cálculos del test de significancia. Incluyendo en la hoja de cálculo los datos extraídos en el fichero "rbno9.dat" y los componentes principales derivados de los mismos, que se pueden obtener con la ayuda de cualquier programa estadístico, obtendremos directamente el nivel de significación que nos indicará si existen diferencias significativas en el número de manchas y claros.

El programa y su correspondiente documentación puede descargarse de la página web de Kelvin Conrad (*http://www.rothamsted.ac.uk/pie/kfconrad /download.htm*).

4.7.4. *Association Analysis Batch Runner* y *Red-Blue Analysis Runner*

A la hora de analizar la asociación espacial entre pares de variables ("n_a.exe") puede resultar laborioso, e incluso inducir a error, ejecutar estos análisis cuando disponemos de muchos pares de variables a evaluar. La aplicación *Association Analysis Batch Runner* permite realizar series de análisis de asociación espacial de manera automática y controlada. El programa requiere una carpeta de entrada en la que se incluirán subcarpetas, cada una incluyendo el fichero "cluster.dat" correspondiente a cada variable. *Association Analysis Batch Runner* tomará las variables dos a dos y realizará automáticamente todos los análisis de asociación espacial entre ellas.

Los resultados se incluirán en una carpeta de salida con subcarpetas que contendrán los ficheros de salida de cada análisis.

Análogamente, podemos realizar series consecutivas de análisis del patrón espacial ("rbrelv13.exe") con cada una de nuestras variables con el programa *Red-Blue Analysis Runner*. Ya que las rutinas de estos análisis requieren varios minutos, esta aplicación confiere la ventaja de realizarlos de forma no interrrumpida con lo que podemos dejar nuestro ordenador procesando los análisis sin necesidad de ejecutar los análisis variable a variable, por ejemplo, podríamos dejar un listado de variables procesando durante toda la noche. Al igual que el programa anteriormente descrito, *Red-Blue Analysis Runner* requiere una carpeta de entrada con las diferentes subcarpetas correspondientes a cada variable que inclurán los ficheros "rbin5.dat". Los ficheros de salida en esta caso, se incluirán en cada una de las subcarpetas mencionadas. Estos programas, junto con su correspondiente documentación puede descargarse de la página web de Kelvin Conrad (*http://www.rothamsted.ac.uk/pie/ kfconrad/download.htm*).

4.8. PÁGINAS WEB DE INTERÉS

En el apartado anterior hemos introducido la página web de SADIE (*http://www.rothamsted. ac.uk/pie/sadie/*), que es la principal fuente de información en Internet sobre esta técnica. Junto al software descrito en dicho apartado, y versiones anteriores de estos programas, en esta página puede encontrarse numerosa documentación sobre SADIE, separatas de numerosos artículos que han utilizado esta técnica, una sección con consejos prácticos y respuestas a preguntas comunes y un tutorial para Windows que ilustra el funcionamiento de SADIE de una forma sencilla y didáctica (*http://www.rothamsted.ac.uk/pie/sadie/SADIE_downloads_tutorial_page_5_5.php*). La lista de bibliografía que aparece en la web de SADIE no está actualizada (aparecen artículos publicados hasta 2002), aunque pueden encontrarse allí todos los artículos metodológicos sobre esta técnica. Así pues, la consulta de esta página web resulta obligatoria para todos aquellos interesados en conocer en profundidad los distintos aspectos y aplicaciones de SADIE. Junto a la web de SADIE, otra página web altamente recomendable es la del Dr. Kelvin Conrad (*http://www.rothamsted.ac.uk/pie/kfconrad /download.htm*), investigador del grupo de Joe Perry que ha desarrollado la interfaz gráfica SA-

DIEShell y otros programas descritos en el apartado anterior. En esta página se encuentran las últimas versiones del software SADIE, incluyendo versiones beta, por lo que es también muy recomendable visitarla frecuentemente si se quiere disponer de las mismas. Amén de estas dos páginas web, no existe ninguna otra dedicada en exclusiva a SADIE.

AGRADECIMIENTOS

FTM agradece a Joe Perry toda su ayuda, sin la cual difícilmente hubiera podido utilizar SADIE de forma satisfactoria, así como su hospitalidad durante las distintas visitas que ha realizado a Rothamsted en los últimos años. Este capítulo se ha elaborado gracias a un contrato Ramón y Cajal del Ministerio de Educación y Ciencia, a un Early Career Project Grant (ECPG 231/607), otorgado por la British Ecological Society y a los proyectos CEFEMED (URJC-RNT-063-2), financiado por la Dirección General de Universidades e Investigación de la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid (DGUICAM) y la Universidad Rey Juan Carlos, INTERCAMBIO (BIOCON 06_039), financiado por la Fundación BBVA, y REMEDINAL (S-0505/AMB/0335), financiado por la DGUICAM. JLQ disfrutó de una beca FPI-MEC (BES-2003-1716), adscrita al proyecto HETEROMED-MEC (REN2002-04041-C01) para la realización del capítulo y de una estancia (Estancias breves 2005, MEC) en la Universidad de Duke (NC, USA), para el estudio de técnicas de análisis espacial. María Dolores Puche colaboró activamente en la toma de datos de los estudios realizados en Alicante, mientras que Irene Mendoza, Luis Matías y Asier Herrero hicieron lo propio en el Parque Nacional de Sierra Nevada.