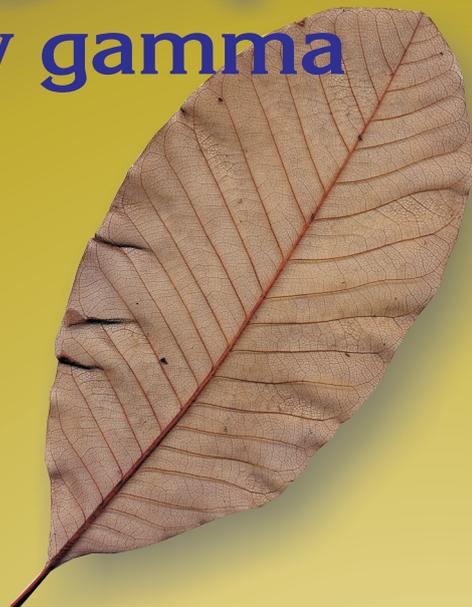


Sobre Diversidad Biológica:
El significado de las Diversidades

α β γ
alfa, beta y gamma

Gonzalo Halffter
Jorge Soberón
Patricia Koleff
& Antonio Melic
(eds.)



S.E.A.



CONABIO



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



DIVERSITAS
an international programme
of biodiversity science

m3m
vol. 4
Monografías
3er Milenio

**Sobre Diversidad Biológica:
El significado de las Diversidades
alfa, beta y gamma**



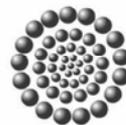
S.E.A.



CONABIO



DIVERSITAS
an international programme
of biodiversity science



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Zaragoza, 2005

Primera edición: 30 Noviembre 2005

Título:

***Sobre Diversidad Biológica:
el Significado de las Diversidades Alfa, Beta y Gamma.***

Editores:

Gonzalo Halffter, Jorge Soberón, Patricia Koleff & Antonio Melic

ISBN: 84-932807-7-1

Dep. Legal: Z-2275-05

m3m : Monografías Tercer Milenio
vol. 4, SEA, Zaragoza.

Patrocinadores del volumen:

• **SOCIEDAD ENTOMOLÓGICA ARAGONESA (SEA)**

<http://entomologia.rediris.es/sea>

Avda. Radio Juventud, 37; 50012 Zaragoza (ESPAÑA)

• **COMISION NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD (CONABIO) MÉXICO**

• **GRUPO DIVERSITAS-MÉXICO**

• **CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT) MÉXICO**

Portada, diseño y maqueta: A. Melic

Imprime:

GORFI, S.A. Menéndez Pelayo, 4 - Zaragoza (España)

Forma sugerida de citación de la obra:

Halffter, G., J. Soberón, P. Koleff & A. Melic (eds.) 2005. *Sobre Diversidad Biológica: el Significado de las Diversidades Alfa, Beta y Gamma*. m3m-Monografías Tercer Milenio, vol. 4. SEA, CONABIO, Grupo DIVERSITAS & CONACYT, Zaragoza. IV + 242 pp.

Sobre Diversidad Biológica:
El significado de las Diversidades

$\alpha\beta\gamma$

alfa, beta y gamma

Gonzalo Halffter
Jorge Soberón
Patricia Koleff
& Antonio Melic
(eds.)





S.E.A.

Sociedad Entomológica Aragonesa

D. Antonio Melic Blas
Presidente

D. César González Peña
Vicepresidente

D^a Inés Montañés Alcaine
Secretaria

Comité Editorial:
Director Publicaciones: A. Melic
Comité científico-editorial compuesto por
22 entomólogos



DIVERSITAS
an international programme
of biodiversity science

Grupo DIVERSITAS

Dr. Gonzalo Halffter
Presidente

Dra. Claudia E. Moreno
Secretaria Técnica



CONABIO

**Comisión Nacional para el
Conocimiento
y Uso de la Biodiversidad**

Ing. José Luis Luege Tamargo
Secretario Técnico

Dr. José Sarukhán Kermez
Coordinador Nacional

Mtra. Ana Luisa Guzmán y López Figueroa
Secretaría Ejecutiva

M. en C. María del Carmen Vázquez Rojas
Dirección de Evaluación de Proyectos



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Dr. Gustavo Chapela Castañares
Director General

Dr. Efraín Orestes Aceves Piña
Director de Asuntos Internacionales

Lic. Clara Morán Andrade
Subdir. de Organismos Multilaterales
y Estrategia de Cooperación



CAPÍTULO 5:

La estadística espacial como herramienta de análisis de la biodiversidad**Miguel Murguía**

ABACO, A.C.
 Av. San Jerónimo 507
 Col. San Jerónimo Lídice
 Deleg. Magdalena Contreras,
 México, D.F. 10200, México
 mmurguia@prodigy.net.mx

**Sobre Diversidad Biológica:
El significado de las Diversidades
Alfa, Beta y Gamma.**

Editores:

Gonzalo Halffter, Jorge Soberón,
 Patricia Koleff & Antonio Melic

Patrocinadores:

COMISION NACIONAL PARA EL
 CONOCIMIENTO Y USO DE LA
 BIODIVERSIDAD (CONABIO) MÉXICO

SOCIEDAD ENTOMOLÓGICA ARAGONESA
 (SEA), ZARAGOZA, ESPAÑA.

GRUPO DIVERSITAS-MÉXICO

CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y
 TECNOLOGÍA (CONACYT) MÉXICO

ISBN: 84-932807-7-1

Dep. Legal: Z-2275-05

m3m: Monografías Tercer Milenio
 vol.4, S.E.A., Zaragoza, España
 30 Noviembre 2005
 pp: 63 – 72.

Información sobre la publicación:
www.sea-entomologia.org/m3m

LA ESTADÍSTICA ESPACIAL COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE LA BIODIVERSIDAD

Miguel Murguía

Resumen: La estadística espacial es una ciencia consolidada que cuenta con instrumentos de medición sólidos desde el punto de vista de las propiedades estructurales y de interpretación. Como estos instrumentos son de aplicación genérica, es decir, no únicamente son aplicables a variables sobre biodiversidad, en la literatura se cuenta con muchos ejemplos de su aplicación, así como de sus fortalezas, debilidades e interpretación. En este trabajo se explican y ejemplifican algunas maneras de aplicar la estadística espacial al análisis de la biodiversidad. Se presentan la media espacial, la autocorrelación espacial y el semivariograma, incluyendo ejemplos esquemáticos. Se discuten los beneficios de utilizar a la estadística espacial como herramienta descriptiva y de análisis espacial de la biodiversidad.

Palabras clave: Análisis espacial, autocorrelación espacial, bases de datos geográficas, estadística espacial, MAUP, media espacial, semivariograma, sistemas de información geográfica.

Spatial statistics as a biodiversity analysis tool

Abstract: Spatial statistics is a consolidated science that has measurement tools with reliable interpretative and structural properties. As these instruments are for generic application, i. e., valid not just for biodiversity variables, there are many examples both of their application in the literature and of its strengths, weaknesses and interpretation. In this paper some ways in which spatial statistics can be applied to biodiversity analyses are explained and exemplified. The spatial mean, spatial autocorrelation and the semivariogram are presented with schematic examples. The benefits of using spatial statistics as a descriptive and analytical tool for biodiversity are discussed.

Key words: Spatial analysis, spatial autocorrelation, geographic data bases, spatial statistics, MAUP, spatial mean, semivariogram, geographical information systems.

Introducción

El objetivo de este capítulo es exponer la importancia que tiene la incorporación de la estadística espacial como herramienta de análisis de la biodiversidad y las implicaciones positivas de este proceso. Se explican algunas técnicas, con sus respectivas fórmulas matemáticas, que pueden ser de utilidad inmediata en los análisis de la biodiversidad.

Primero, en la sección “Análisis espacial y estadística espacial”, se explica el concepto de análisis espacial y el papel que desempeña la estadística espacial como una manera de realizar el análisis espacial en adición a la metodología clásica del álgebra de mapas ampliamente incorporada en los sistemas de información geográfica.

Después, en la sección “Herramientas de la estadística espacial”, se presenta una lista de las herramientas más comunes de la estadística espacial y se profundiza en tres de ellas: la media espacial, la autocorrelación espacial y el semivariograma, ejemplificándolas y exponiendo las fórmulas matemáticas implicadas.

En la sección “El espacio: realidad, teoría y técnica” se abordan, desde la perspectiva de la estadística espacial, diferentes problemas del estudio de la biodiversidad que involucran a la dimensión espacial.

En la “Discusión” se perfilan algunas implicaciones y escenarios futuros en el análisis de la biodiversidad al incorporar la estadística espacial como herramienta descriptiva y de análisis.

Finalmente, en las “Conclusiones”, se brinda una síntesis de los beneficios que puede aportar la incorporación de la estadística espacial como herramienta de análisis de la biodiversidad.

Aunque existen técnicas y métodos para tratar al espacio en sus tres dimensiones, por su carácter introductorio, este capítulo trata al espacio en sólo dos dimensiones, es decir, la altitud se considera un atributo más, mientras que la latitud y la longitud (Y y X, ordenadas y absisas, respectivamente) son consideradas los principales descriptivos del espacio. Así mismo, aunque ya existen varios ejemplos de teorías científicas que muestran la clara dependencia e “inseparabilidad” de la dimensión del tiempo de las explicaciones más acertadas de las observaciones, la dimensión temporal se considera aquí como un atributo más, y no como parte integral del espacio-tiempo como categorías inseparables de modelos o teorías para el entendimiento de muchos fenómenos.

1. Análisis espacial y estadística espacial

1.1 Análisis espacial

Desde una perspectiva muy general, el análisis espacial es una habilidad general para manipular datos espaciales de diferente formas y extraer, como resultado, un significado diferente (Bailey, 1994). Un concepto más acotado, considera al análisis espacial como un conjunto de técnicas para analizar eventos geográficos, en el que los resultados dependen del arreglo espacial de los eventos (Haining, 1994). El “evento geográfico” se representa por una colección de puntos, líneas o áreas localizados en un espacio geográfico a los que se asocian atributos. El análisis espacial se diferencia de otros tipos de análisis en que éste requiere no sólo de los valores de los atributos, sino además de la localización geográfica de los objetos.

Existen diversos niveles de análisis, por ejemplo se suele distinguir entre el análisis descriptivo y el exploratorio o entre el resumen (‘summarization’) y propiamente el análisis (Bailey, 1994). En general, el análisis espacial tiene que ver con la investigación de patrones de los datos espaciales.

Fotheringham y Rogerson (1994) profundizan en el concepto de análisis espacial y Murguía y Llorente (2003) tratan de manera particular el concepto de análisis espacial en biogeografía.

De forma tradicional, los sistemas de información geográfica han proporcionado herramientas para realizar análisis espacial, estas herramientas son, en general, implementaciones de las operaciones del álgebra de mapas, por ejemplo, superposición de mapas, punto en polígono o “buffers” aplicados a puntos, polígonos o regiones, reclasificaciones por agrupamiento o combinación de atributos o búsqueda de elementos geográficos a un radio de distancia de un punto en específico. Estas funciones han sido la manera tradicional de realizar análisis espacial. Con la consolidación de la estadística espacial, surgen nuevas formas de realizar análisis espacial, con la posibilidad de controlar o describir el error asociado al combinar dos fuentes de errores (provenientes, por ejemplo, de dos cartografías diferentes).

Por lo anterior, se puede clasificar al análisis espacial en dos clases de acuerdo al tipo de herramienta:

1) análisis espacial mediante operaciones del álgebra de mapas y 2) análisis espacial mediante la estadística espacial.

En los últimos años, la estadística espacial se ha ido incorporando a los sistemas de información geográfica, brindando nuevas posibilidades al análisis espacial. Al tener bases estadísticas, la estadística espacial proporciona un marco dentro del que se pueden estudiar de manera directa y explícita los límites de la aplicación de las herramientas, propiedad con que no cuentan los métodos tradicionales del álgebra de mapas.

1.2 Estadística espacial vs. estadística clásica

La estadística clásica considera una independencia de los datos respecto al espacio, es decir, estudia y analiza a los procesos como “aespaciales”. La estadística espacial marca la diferencia al reconocer de manera explícita la dependencia entre los fenómenos y su ubicación en el espacio (Vasiliev, 1996).

La estadística clásica seguirá siendo una herramienta valiosa, en el sentido de que proporciona un método general y más sencillo (al no considerar a la dimensión espacial) que la estadística espacial para la descripción, análisis y modelación de los datos e información. Sin embargo, al considerar la dimensión espacial, la estadística espacial afronta un problema ignorado por la estadística clásica.

La investigación en estadística espacial es un campo en desarrollo, pues además de haberse consolidado hace no más de una década, los métodos de la estadística clásica no pueden ser trasladados o analogados de manera directa, ya que la dimensión espacial agrega complejidad y nuevas propiedades.

2. Herramientas de la estadística espacial

2.1 Presentación de las herramientas de la estadística espacial

La tabla I incluye una lista de herramientas de la estadística espacial. La secuencia dentro de la tabla no sigue un arreglo estricto, aunque de manera intuitiva se ordenó de las herramientas más descriptivas a las analíticas y hasta el final las de modelación.

Existen varias propuestas sobre como clasificar a las herramientas de la estadística espacial, aquí únicamente se da una lista que muestra el tipo de conceptos involucrados.

En la figura 1 se incluye un resumen de las fórmulas de la estadística espacial presentadas más adelante (media espacial, el coeficiente de Moran y el semi-variograma). En Li (1996) se encuentran las fórmulas matemáticas para la variancia y el error del coeficiente de Moran, entre otras.

El “vecino más cercano” y el “conteo de cercanos” (“Join count”) suelen incluirse en un grupo de herramientas que se denomina “análisis de patrón de puntos”.

La matriz de conectividad es una herramienta descriptiva que se utiliza para calcular otros estadísti-

Tabla I. Lista de las herramientas de la estadística espacial más comúnmente usadas

Herramienta	Descripción
Media espacial	Calcula el "centro de masa", en el espacio, de los valores de los eventos espaciales.
Matriz de conectividad	Describe cuáles pares de eventos se consideran vecinos o en qué grado. La diagonal generalmente carece de significado.
Autocorrelación espacial	Relaciona los valores de una misma variable de acuerdo a su ubicación en el espacio. Los estadísticos más comunes para medir la autocorrelación espacial son el "Coeficiente de Moran" (MC) y el "Radio de Geary" (GR).
Distancia estándar	Es una medida de la dispersión de los puntos; valores altos significan una alta dispersión de los eventos geográficas, mientras que valores bajos representan distribución agrupada.
Vecino más cercano	Es una medida del promedio de la distancia al vecino más cercano de cada evento.
Semivariograma	Es una gráfica que muestra las diferencias promedio en los valores de eventos ubicados a intervalos constantes de distancia.
Conteo de cercanos ("Join count")	Compara ocurrencias de atributos binarios (dos clases) con respecto a una distribución al azar (compara la frecuencia de la adyacencia o vecindad de eventos de la misma clase y de diferente clase).
Interpolación espacial ("Kriging")	Estima la ocurrencia de eventos o valores en una superficie espacial a partir de una muestra de puntos.
Muestreo espacial	Diseño de muestras espaciales para inferir parámetros de la población.

Fig. 1. Fórmulas de las herramientas de la estadística espacial presentadas.
 a) Media espacial.
 b) Coeficiente de Moran.
 c) Semivariograma.

<p>a) Media espacial</p> $\overline{\text{lon}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \text{lon}_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad \overline{\text{lat}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \text{lat}_i}{\sum_{i=1}^n x_i}$ <p>b) Coeficiente de Moran</p> $\text{MC} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ <p>c) Semivariograma</p> $\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{(ij) h_{ij}=h} (x_i - x_j)^2$	<p>Notación:</p> <p>x_i: valor del i-ésimo dato</p> <p>n: número de datos</p> <p>w_{ij}: i-ésima entrada de la matriz de conectividad</p> <p>lon_i: longitud del i-ésimo dato</p> <p>lat_i: latitud del i-ésimo dato</p> <p>\bar{x}: promedio de los n valores</p> <p>h: un escalar</p> <p>h_{ij}: distancia entre los puntos x_i y x_j</p> <p>$N(h)$: número de pares de puntos que se encuentran a una distancia h</p>
--	--

cos, como por ejemplo la autocorrelación; los resultados de esas herramientas dependen fuertemente de la configuración de la matriz de conectividad. Aunque la estructura más simple de la matriz de conectividad, con entradas cero o uno (para los pares no vecinos y para los pares vecinos, respectivamente) es útil en muchos de los casos, en ocasiones se requiere describir entradas de valores reales. Griffith (1996) describe algunos criterios para construir la matriz de conectividad cuando se requieren más que valores binarios.

2.2 Media espacial

La media espacial es un estadístico muy simple de calcular y que a nivel descriptivo puede mostrar algunos atributos espaciales interesantes de los datos. La media espacial es un promedio ponderado de las coordenadas en las que se ubican los atributos. El resultado de la media espacial es un punto, un par coordenado, que puede ser visto como el "centro de masa" de los datos

en el espacio. La media espacial está dentro de los límites máximo y mínimo de las coordenadas de los datos, tanto para dimensión X (o longitud), como para la Y (o latitud).

La media espacial se puede calcular sobre puntos o sobre polígonos. No obstante que la fórmula considera su aplicación sólo a datos de puntos, cuando desea calcularse sobre polígonos, lo que se hace es obtener un centroide, o punto medio, para cada polígono, y entonces aplicar la fórmula a esos puntos.

Cada una de las dos dimensiones se calcula de manera independiente. En la figura 1 se muestran las fórmulas de la media espacial y puede observarse que se presentan dos, una para la dimensión X y otra para la Y.

En la figura 2 se ejemplifica la media espacial para un área hipotética dividida en cuatro regiones. En cada caso el área está compuesta por cuatro regiones con valores de atributos 2, 6, 8 y 8 (que pueden representar, por ejemplo, riqueza). La ubicación de la media

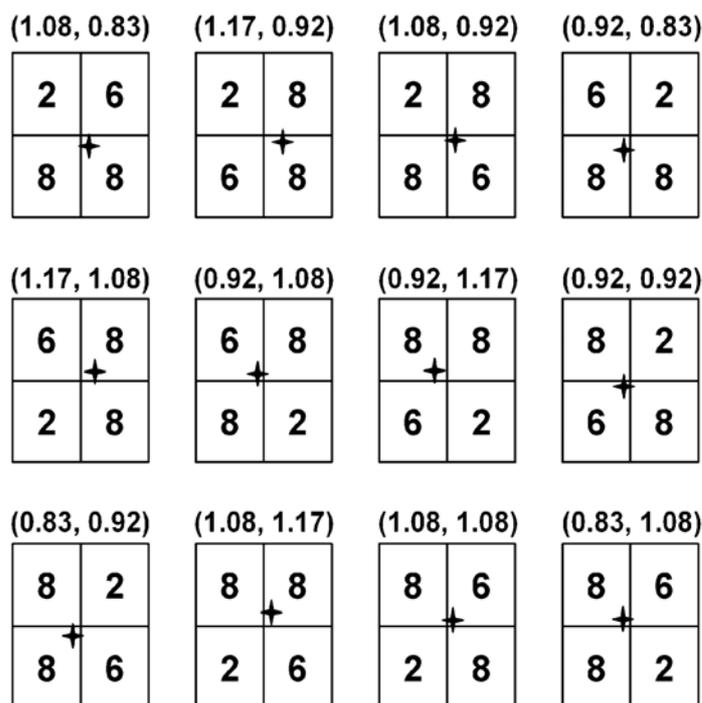


Fig. 2. Ejemplificación de la media espacial. Todas las áreas están subdivididas en cuatro regiones y en todas las áreas los valores de las regiones son 2, 6, 8 y 8 pero la medias espaciales varían, pues el arreglo espacial de los valores entre las regiones es diferente.

espacial se representa gráficamente con una cruz y las coordenadas respectivas con el par de datos entre paréntesis arriba de cada área. En cada caso el arreglo espacial de los valores es diferente, por eso la media espacial no es la misma coordenada para todos los casos.

A continuación se ejemplifica el cálculo de la media espacial para el área de la esquina superior izquierda de la figura 2. Para calcular la media espacial con polígonos, primero se tienen que obtener los centroides de los polígonos. Tomando como origen (0, 0) en la esquina inferior izquierda del área y suponiendo que el área mide 2x2, entonces los centroides de las cuatro regiones son (1.5, 1.5), (1.5, 0.5), (0.5, 0.5), (0.5, 1.5). Aplicando las fórmulas de la figura 1:

$$x = (2 \times 0.5 + 8 \times 0.5 + 6 \times 1.5 + 8 \times 1.5) / 24 = 1.08$$

$$y = (8 \times 0.5 + 8 \times 0.5 + 2 \times 1.5 + 6 \times 1.5) / 24 = 0.83$$

por lo que se obtiene una media espacial de (1.08, 0.83). El denominador es 24 en todos los casos, pues $2+6+8+8=24$.

La media espacial es una herramienta que es poco sensible al MAUP (ver sección 4.2. más adelante), así que los resultados de diferentes formas o niveles de agregación pueden ser comparables. La media espacial para una especie (o grupo de especies) es un dato que puede ser de utilidad como descriptivo de la biodiversidad y que puede usarse para comparar entre diferentes periodos de tiempo, entre diferentes grupos de especies u otra dimensión. Además, la media espacial puede compararse con la media espacial de la cartografía, es decir, calculando la media espacial suponiendo que todos los atributos valen uno.

2.3 Autocorrelación espacial

La autocorrelación espacial es un concepto sobre la cercanía o lejanía de los eventos en el espacio según el valor de los atributos. Se dice que una variable tiene

autocorrelación espacial positiva cuando los valores similares tienden a agregarse o ser vecinos, y se dice que tiene autocorrelación espacial negativa cuando los valores similares tienden a separarse y los puntos o eventos vecinos son de diferente tipo. Se dice que no hay autocorrelación cuando la distribución espacial, en relación a los valores de sus vecinos, es al azar.

Los dos medios más comunes para calcular la autocorrelación espacial son el coeficiente de Moran y el índice de Geary. En la figura 1 se incluye la fórmula del coeficiente de Moran. El resultado del coeficiente de Moran (CM) se interpreta de la siguiente manera (Vasiliev, 1996):

- Cuando el CM se aproxima a +1, hay autocorrelación positiva.
- Cuando el CM se aproxima a -1, hay autocorrelación negativa.
- Cuando el CM se aproxima a $-1/(n-1)$, hay una distribución al azar de los valores (siendo n el número total de observaciones).

En la figura 3 se muestra un ejemplo hipotético con diferentes situaciones de autocorrelación espacial. El área en 3.a) está subdividida en 9 regiones (A, B, C, D, E, F, G, H e I). En 3.b) se muestra la correspondiente matriz de conectividad; las entradas con uno significan que las regiones representadas por la columna y el renglón son conexas, las entradas en blanco significan que no son conexas; en las entradas de la diagonal se incluyen x para indicar que no supone una situación de conectividad o no conectividad. En 3.c) se muestra una situación con autocorrelación positiva, donde los valores similares tienden a estar adyacentes. En 3.d) se muestra una situación sin autocorrelación, donde los valores tienden a distribuirse al azar. En 3.e) se muestra una situación con autocorrelación negativa, donde los valores disimilares tienden a estar adyacentes.

Fig. 3. Ejemplificación de la autocorrelación espacial. **a)** Área de estudio subdividida en 9 regiones: A, B, C, D, E, F, G, H e I. **b)** Matriz de conectividad. **c)** autocorrelación positiva. **d)** distribución sin autocorrelación. **e)** autoco-rrelación negativa.

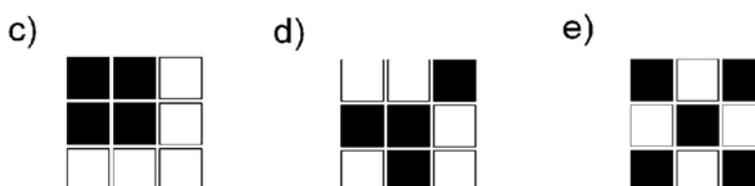
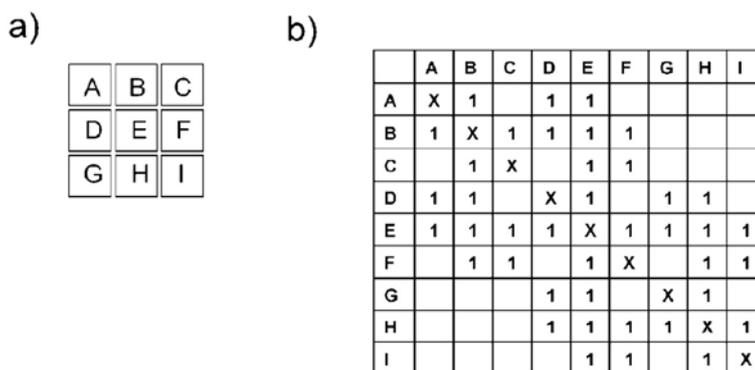


Fig. 4. Esquemización de la herramienta del semivariograma de acuerdo a diferentes tipos de autocorrelación espacial. **a)** Semivariograma típico de una autocorrelación positiva. **b)** Semivariograma típico de una autocorrelación negativa. **c)** Semivariograma típico de una distribución sin autocorrelación.

En el ejemplo de la figura 2 se esquematiza con una variable binaria (valores cero o uno), pero la autocorrelación espacial también puede calcularse para variables continuas como por ejemplo, la riqueza. La autocorrelación espacial de la riqueza puede constituir un concepto útil para la descripción e investigación de patrones de distribución de la biodiversidad.

2.4 Semivariograma

El semivariograma es una herramienta para averiguar los posibles patrones de autocorrelación. La estrategia es graficar la función $\gamma(h)$ vs. h , donde h es una distancia que se va incrementando en intervalos constantes y $\gamma(h)$ es una función que mide las diferencias entre todos los pares de los valores que se encuentran a h distancia entre ellos. En la figura 1 se incluye la fórmula más comúnmente usada para calcular $\gamma(h)$. La fórmula se calcula para diferentes h , y cada par $(h, \gamma(h))$ se grafica.

Si los datos tienen una autocorrelación espacial positiva, las diferencias entre los pares de valores cada

vez más distantes irán creciendo de manera continua, por lo que la gráfica tendrá un aspecto de curva asintótica creciente. Si por el contrario, los datos no tienen una autocorrelación espacial positiva, entonces las diferencias podrán alternarse entre grandes y pequeñas al ir aumentando h , ya sea debido a una autocorrelación negativa o a la carencia de autocorrelación.

En la figura 4 se esquematizan tres curvas típicas de a) la autocorrelación positiva, b) autocorrelación negativa, y c) distribución al azar. Griffith y Lane (1999) brindan abundantes ejemplos de curvas del semivariograma de datos empíricos. Las curvas se pueden ajustar a modelos matemáticos para obtener parámetros y poderlas comparar cuantitativamente. Existen diversos modelos para realizar los ajustes, entre los que se encuentran la función de Bessel, la gaussiana y la exponencial.

Se debe tener cuidado en no elegir valores h muy grandes, pues podría suceder que el número de pares de puntos que se encuentran a una distancia h es muy pequeño y eso sesgaría el análisis. Una alternativa es in-

interpretar sólo la primera parte de la curva en términos de autocorrelación, pues los puntos finales de la curva pueden tener ese sesgo.

De manera muy esquemática, se podrían establecer las siguientes reglas para el semivariograma:

- Autocorrelación positiva: la forma de la curva tiene una pendiente siempre positiva que va decreciendo poco a poco.
- Autocorrelación negativa: curva con aspecto senoidal definido.
- Sin autocorrelación: curva con altibajos no tan definidos como en el caso de la autocorrelación negativa.

El semivariograma puede ser una herramienta muy útil en el análisis de la biodiversidad para investigar los fenómenos relacionados con la escala.

3. El espacio: realidad, teoría y técnica

3.1 El modelo espacio-tiempo

La filosofía es a la vez un punto de partida y uno de confrontación con las teorías de la realidad. Es similar al papel que desempeña un control entre las observaciones de la realidad y las concepciones teóricas de “esa realidad”. Cuando existe un alto nivel de consistencia entre ellas dos, se dice que se entiende más a la realidad. ¿Cómo entiende la biología de la conservación al espacio? ¿Cuál es la concepción filosófica del espacio en las diferentes aproximaciones al estudio de la biodiversidad?

Kant (1781) propuso al espacio y al tiempo como “categorías” preexistentes a la percepción sensorial en las concepciones de los individuos, a partir de las cuales se construyen las concepciones de la realidad. Desde este punto de vista, el espacio se afirma como un modelo mental a partir del cual podemos relacionarlos con el mundo.

La existencia del espacio no es algo de lo que se dude mucho, sin embargo, las concepciones surgidas de la Física en el siglo pasado sí han cambiado la forma de apreciarlo y modelarlo.

En la selección natural, la Biología encontró una teoría sólida incorporando el tiempo para entender los procesos de los seres vivos. La biogeografía histórica incorpora, además del tiempo, a la dimensión del espacio. No obstante que la robustez de la biogeografía histórica dista mucho de la robustez de que goza la selección natural, la cualidad de incorporar al espacio-tiempo como marco indispensable (e inseparable) para entender los procesos de la forma, la hace más realista, es decir, que explica mejor las observaciones que aquellas teorías que no incorporan a la vez al espacio-tiempo.

Así, al espacio se le asigna un calificativo de “real”, por lo que es más probable que las teorías que mejor expliquen los hechos observados incorporen al espacio. Con el surgimiento de la estadística espacial se brinda una opción formal, con bases conceptuales sólidas, para estudiar y describir al espacio.

3.2 El espacio y las teorías soberbias

Penrose (1989) clasifica a las teorías científicas en tres tipos: SOBERBIAS, ÚTILES y TENTATIVAS. Dentro de las teorías SOBERBIAS sitúa a aquellas que por su alcance y exactitud con que se aplican son excepcionales, aunque no necesariamente no existen refutaciones con respecto a los fenómenos del mundo. De las teorías de la biología, sitúa como más cercana a la categoría de SOBERBIA, aunque a una buena distancia, a la selección natural. ¿Podremos construir una teoría SOBERBIA de la biodiversidad? Es muy probable que así sea, si la búsqueda de la biogeografía se orienta, como se ha venido haciendo, incorporando explícitamente y adecuadamente a las dimensiones forma, espacio y tiempo, es decir, incorporando los elementos propios de nuestro estudio, los seres vivos y su cambio a través del espacio y del tiempo. La robustez de la teoría de la selección natural alienta la búsqueda.

El enfoque histórico de la biogeografía marca un avance en esa búsqueda, mientras que la biogeografía cuantitativa (entendida como la incorporación del método de la taxonomía numérica a la biogeografía) significa, no precisamente un retroceso, pero sí un camino sin salida hacia la construcción de teorías que describan y expliquen los procesos de la biodiversidad, tanto con mayor sencillez como con mayor grado de generalidad. Además, la biogeografía histórica también ha cambiado nuestra concepción del espacio-tiempo al mostrar la inseparabilidad de los tres aspectos.

Independientemente de la diferencia entre teoría y método, en la tabla II se exponen algunas analogías de enfoque en diversas disciplinas al pasar de un nivel nulo o pobre de incorporación de la dimensión espacio-tiempo a un nivel mayor.

La incorporación del tiempo a la estadística espacial es un área en desarrollo, sin embargo, observando al espacio-tiempo como un bloque, se puede afirmar que la estadística clásica incluye un grado de incorporación de este espacio-tiempo menor del que lo hace la estadística espacial.

3.3 Sistemas de información geográfica y bases de datos geográficas

3.3.1 La dimensión espacial tratada explícitamente

La estadística espacial ayuda a establecer criterios para el grado de normalización de una base de datos (*sensu* Codd, 1990). Una base de datos geográfica desagrega la dimensión geográfica en campos o tablas adicionales a los que contiene una base de datos no geográfica. Un ejemplo de ello es la información de la localidad de colecta; mientras en las bases de datos no geográficas, la información se almacena en un sólo campo, en las bases de datos geográficas se almacena en los campos MUNICIPIO, LATITUD, LONGITUD, LOCALIDAD. Así, se pueden clasificar a las bases de datos en dos tipos:

- Bases de datos tipo 1: Bases de datos no espaciales.
- Bases de datos tipo 2: Bases de datos geográficas.

Las bases de datos tipo 1 tienen un grado menor de normalización que las bases de datos del tipo 2.

Tabla II. Nivel de incorporación de la dimensión espacio-tiempo en algunos enfoques técnicos y teóricos.

Bajo nivel de incorporación de la dimensión espacio-tiempo	Alto nivel de incorporación de la dimensión espacio-tiempo
Biogeografía cuantitativa	Biogeografía histórica
Historia natural	Selección natural
Geología clásica	Deriva continental
Física clásica	Teoría de la relatividad
Bases de datos	Bases de datos geográficas
Estadística clásica	Estadística espacial

3.3.2 Base de datos del tercer tipo

Desde el punto de vista informático, la estadística espacial exige un grado mayor de “granularidad” o desagregación de la información de lo que lo hacen los otros métodos de análisis espacial, como por ejemplo el álgebra de mapas. Por lo anterior, un proyecto de investigación que requiera la aplicación de técnicas de estadística espacial deberá considerar bases de datos con un mayor grado de normalización que aquellos en los que no se requiera ese tipo de técnicas. Así, se puede desagregar la clasificación de bases de datos propuesta en la sección anterior, de la siguiente manera:

- Bases de datos tipo 1: Bases de datos no espaciales
- Bases de datos tipo 2: Bases de datos geográficas (para aplicaciones con álgebra de mapas)
- Base de datos tipo 3: Bases de datos geográficas (para aplicaciones con estadística espacial)

Las bases de datos tipo 1 tienen un grado menor de normalización que las bases de datos del tipo 2 y las bases de datos tipo 2 tienen un grado menor de normalización que las bases de datos del tipo 3. Lo mismo sucede con el grado de extensión y riqueza de dichos tipos de bases de datos. Zhang y Griffith (2000) discuten aspectos técnicos sobre las características de las bases de datos geográficas para el análisis espacial mediante la estadística espacial.

4. Discusión

4.1 La medición de la certidumbre y el error

En el desarrollo de las sesiones, se discutió sobre la necesidad de señalar el grado de incertidumbre, o cuando menos algún dato que indique o haga explícito el hecho de que la transformación de información espacial conlleva, muy probablemente, a un grado de certidumbre menor que el mínimo grado de certidumbre de la cartografía implicada en el análisis.

El análisis clásico del álgebra de mapas corre el riesgo de no indicar la incertidumbre de los resultados, tanto en los niveles descriptivo, analítico y de modelación. ¿Cuál es el grado de certeza de los resultados de la herramienta al ser aplicada a datos específicos? y ¿cuál es la probabilidad de que sean incorrectos esos resultados? Son preguntas en las que la estadística espacial puede ayudar a construir una respuesta general y metódica.

4.2 MAUP y el tamaño de la rejilla

El problema de definir el tamaño de la unidad geográfica de análisis, por ejemplo, el tamaño del cuadro cuando se impone una rejilla, no es un problema particular del análisis de la biodiversidad; los investigadores de los sistemas de información geográfica y de la estadística espacial lo han definido como “el problema de la unidad de área modificable” (MAUP por sus iniciales en inglés). El MAUP reconoce que los resultados del análisis espacial pueden depender fuertemente de cómo se divide el área. El MAUP contiene básicamente dos componentes: el primero, el efecto de escala, consiste en las variaciones de los resultados debidas al tamaño de la unidad de área, el segundo, el efecto de agregación o zonificación, consiste en la dependencia de los resultados de la forma y posición, aún considerando unidades de área constante (Opewnschaw & Taylor, 1976; Wong, 1996).

Los estudios sobre biodiversidad dedicados a establecer las mejores formas de agregar datos, subdividir un área o definir el tamaño de la rejilla, como los de Phipps (1975), Murguía y Villaseñor (2000) y Anderson y Marcus (1993), pueden reinterpretarse y analizarse desde la perspectiva de cómo la estadística espacial aborda el problema del MAUP.

4.3 El problema de la escala

En análisis de la biodiversidad aún no existe una manera precisa y ampliamente aceptada para señalar la medida de la escala en la que se sitúa el análisis. El semivariograma es una herramienta que ayuda a describir el cambio de los fenómenos de los atributos al variar la escala. Es posible que en la estadística espacial se puedan encontrar soluciones a este tipo de problemas, o conceptos que ayuden a establecer los criterios del grado de comparación entre diferentes niveles de agregación de la información.

La estadística espacial proporciona herramientas para construir instrumentos de medición de grados de certeza del análisis espacial. Lilburne *et al.* (2004) proponen un método para establecer la consistencia o inconsistencia entre fuentes de información provenientes de diferentes escalas. Es posible que el uso de herramientas de la estadística espacial, como por ejemplo el semivariograma, guiadas por este tipo de modelos cualitativos, puedan dar luz a soluciones al problema de la escala.

4.4 La lección de la taxonomía numérica

El método de la taxonomía numérica, tanto en su contexto meramente taxonómico, como en el biogeográfico, llamado “biogeografía cuantitativa” *sensu* Crovelo (1981), si bien en cierto momento adquirió adeptos para constituirse en una “escuela biogeográfica”, no puede ser considerada como una “teoría biogeográfica”. Así mismo, la estadística espacial, aplicada a la distribución de los organismos en la superficie de la Tierra, no puede llegar a ser por sí misma una teoría biogeográfica. La estadística espacial no es una teoría de la biodiversidad. Es importante anotar esta opinión de manera explícita, pues así lo amerita la cantidad de malas interpretaciones (con la consecuente pérdida de recursos en la investigación científica) que pueden generarse de la aplicación de una técnica en una disciplina científica.

El error de la biogeografía cuantitativa, en cuanto a los métodos heredados de la taxonomía numérica (los métodos del tipo 1, *sensu* Murguía & Llorente, 2003), fue precisamente el aplicar formas de medir a conceptos por construir. Por ejemplo, los análisis de agrupamiento, con sus variantes de ligamientos, es una herramienta que permitió construir fenogramas de áreas, pero ¿qué significa un fenograma de áreas en términos de los hechos biogeográficos?, ¿qué significa, en términos biogeográficos, aplicar un ligamiento promedio, uno simple o uno completo? son preguntas que se han intentado responder después de haber aplicado la herramienta varias veces. Esto es lo que Murguía y Llorente (2003) denominan un “método formal no fundamentado”, explicando que

“... la biogeografía cuantitativa contiene un subconjunto grande de técnicas exploratorias carentes de una consistencia teórico-biogeográfica, a lo que se podría identificar como un método formal pero no fundamentado, desde el punto de vista de que no está basado en conceptos biogeográficos.”

Además de un oscuro significado biogeográfico, otro problema de los métodos de la taxonomía numérica heredados a la biogeografía cuantitativa es la imposibilidad de comparar fenogramas que, aunque contruidos con los mismos criterios de similitud, pero con diferente tipo de ligamiento, resultan en topologías muy diferentes (Murguía & Villaseñor, 2003).

4.5 Biodiversidad y el futuro de la estadística espacial

La biodiversidad no cuenta con medidas universalmente aceptadas. Por ejemplo, existe gran variedad de fórmulas para medir la diversidad beta y no pocas interpretaciones de lo que mide (por ejemplo, Koleff, 2002). En el desarrollo de las “conversaciones” el Dr. Jorge Soberón expuso la posibilidad de la inexistencia de la diversidad beta en términos biológicos, independientemente del concepto creado por los científicos. En otras situaciones, aunque el significado de la herramienta no es totalmente claro, se discuten los diferentes resultados a partir de diversas técnicas particulares, esto se presenta, por ejemplo, en herramientas de la biogeografía

cuantitativa como los índices de similitud y los métodos de agrupamiento con sus “tipos de ligamiento” (Murguía & Villaseñor, 2003). Tampoco la estadística espacial goza de un consenso en cuanto a la mejor manera de medir las cosas, sin embargo, los conceptos que se intentan cuantificar o medir si tienen una amplia aceptación. Por ejemplo, el concepto de autocorrelación espacial se reconoce como tal en la estadística espacial, en tanto se acepta que un conjunto de observaciones pueden tener diferente grado de dispersión o acumulación en el espacio. No sucede así con los conceptos de diversidad alfa, beta o gama. Por lo anterior, la estadística espacial puede constituir un conjunto de “técnicas base” con las cuales se pueden afinar, desagregar, descubrir, contextualizar o enmarcar conceptos de la biodiversidad. Así, es preferible que la discusión científica se centre primero en “qué medir” y después en “cómo medirlo” y no al revés. La estadística espacial brinda un marco sólido en este respecto al proporcionar conceptos de relaciones espaciales y medios para medirlos.

La estadística espacial constituye una homologación entre las técnicas de análisis espacial de diversas disciplinas científicas. Es decir, aunque tratando diferentes atributos, cada disciplina que incorpora el hecho de la dependencia espacial, puede beneficiarse de la estadística espacial siendo un punto de contacto, como así lo ha sido la estadística clásica.

5. Conclusiones

La estadística espacial es una herramienta que puede proporcionar grandes beneficios a la cuantificación y análisis de la biodiversidad, principalmente porque trata de manera explícita a la dimensión espacial y brinda herramientas para la cuantificación y exploración de la dependencia entre los atributos y su ubicación espacial.

En diferentes tipos de conceptos de biodiversidad, como la diversidad alfa, beta o gama, y en sus diferentes modalidades específicas del concepto, está implicada la dimensión espacial. Así, una de las diferencias entre los conceptos de diversidad alfa y de diversidad gama es el grado de extensión del área, mientras que la diversidad beta, puede apreciarse como una relación del cambio de la primera dentro de los límites de la segunda. Es decir, en los conceptos de la diversidad beta, generalmente está implícita una relación entre dos escalas distintas. La estadística espacial brinda herramientas para la exploración de fenómenos al cambiar la escala. El problema de la unidad de área modificable, conocido como MAUP por sus iniciales en inglés, es una manifestación explícita del interés en el estudio de las consecuencias del cambio de escala al realizar análisis espacial. El MAUP es un problema común a las disciplinas que analizan los procesos considerados como dependientes de la ubicación espacial.

El concepto y las medidas de media espacial, autocorrelación espacial y semivariograma, constituyen ejemplos de herramientas de la estadística espacial de los que el análisis de la biodiversidad puede beneficiarse directamente, con poco peligro de reinterpretaciones equivocadas o poco eficientes. Al existir una

amplia comunidad de diversas disciplinas científicas (como por ejemplo, la geología, la epidemiología, la demografía, la economía o la mercadotecnia) interesadas en el estudio y generación de herramientas para el análisis espacial mediante la estadística espacial, crece la posibilidad de que la construcción y forma de aplicación de dichas herramientas estén bajo una constante crítica y revisión. La estadística espacial es un campo que promete crecimiento acelerado pero ordenado.

Se deberán realizar estudios formalmente fundamentados y con datos empíricos para esclarecer el significado de cada una de las herramientas de la estadística espacial aplicada al análisis de la biodiversidad. A continuación se da una lista de posibles aplicaciones:

- La media espacial de una especie (o grupo de especies).
- La comparación entre la media espacial geográfica con la de una especie (o grupo de especies).
- La comparación entre las medias espaciales de dos especies (o grupo de especies).
- La autocorrelación espacial de la riqueza.
- La autocorrelación espacial de dos especies o grupos de especies.

La estadística espacial es una manera de hacer análisis espacial *sensu* Haining (1994), es decir, análisis en los que los resultados dependen del arreglo espacial de los datos. Ese concepto de “análisis espacial” es de gran utilidad práctica en el análisis de la biodiversidad estableciendo un criterio técnico para diferenciar los estudios en los que está implicada la dimensión espacial de los que no lo está. Además, la estadística espacial

brinda herramientas para cuantificar ese grado de dependencia. El estudio de la biodiversidad, entonces, puede beneficiarse de la estadística espacial para la definición de criterios que establezcan la importancia de la dimensión geográfica en los procesos que estudia.

Es común escuchar el perogrullo “la computadora es sólo una herramienta”. Vale la pena reinterpretar ese perogrullo en términos de la estadística espacial, para lo cual se propone el siguiente

MANIFIESTO BIOGEOGRÁFICO DE LA ESTADÍSTICA ESPACIAL:

NO DEBE CREARSE UNA ESCUELA BIOGEOGRÁFICA CON BASE EN LA ESTADÍSTICA ESPACIAL POR SÍ MISMA, PUES NO DEBE REPETIRSE LA TRISTE HISTORIA DE LA TAXONOMÍA NUMÉRICA, TANTO EN LA VERSIÓN TAXONÓMICA, COMO EN LA BIOGEOGRÁFICA.

Agradecimiento

El autor desea agradecer al comité organizador de la reunión “Conversaciones sobre diversidad biológica: el significado de las Diversidades alfa, beta y gamma” especialmente al Dr. Gonzalo Halffter y al Dr. Jorge Soberón. En la reunión tuve la oportunidad de exponer las ideas de este capítulo obteniendo una valiosa retroalimentación de los asistentes. Varias de las ideas presentadas en este capítulo han sido inspiradas en discusiones que el autor ha sostenido con el Dr. Jorge Llorente, con el Dr. José Luis Villaseñor y con la Dra. Patricia Dávila.

Bibliografía

- Anderson, S. & L. F. Marcus. 1993. Effect of quadrat size on measurement of species density. *J. Biogeog.*, **20**: 421-428.
- Bailey, T. C. 1994. A review of statistical spatial analysis in GIS. pp. 13-44. En: Fotheringham, S. y P. Rogerson (Eds.). *Spatial Analysis and GIS*. Taylor & Francis. 201 pp.
- Codd, E. F. 1990. *The Relational Model for Database Management*. Addison-Wesley Pub. 531 pp.
- Crovello, Th. J. 1981. Quantitative biogeography: an overview. *Taxon*, **30**(3): 563-575.
- Fotheringham, S. & P. Rogerson (Eds.). 1994. *Spatial Analysis and GIS*. Taylor & Francis. 281 pp.
- Griffith, D. A. 1996. Some guidelines for specifying the geographic weights matrix contained in spatial statistical models. En: Arlinghaus, S. L. (ed.). 1996. *Practical handbook of spatial statistics*. CRC Press. 307 pp.
- Griffith, D. A. & L. J. Layne. 1999. A casebook for spatial statistical data analysis. A compilation of analyses of different thematic data set. *Oxford Univ. Press*. 506 pp.
- Haining, R. 1994. Designing spatial data analysis modules for geographical information systems. Pp. 45-63. En: Fotheringham, S. y P. Rogerson (Eds.). *Spatial Analysis and GIS*. Taylor & Francis. 281 pp.
- Kant, M. 1781 [1991]. *Crítica de la razón pura*. Porrúa. México. 375 pp.
- Koleff, P. 2002. *Spatial species turnover: patterns, determinants, and implications*. Tesis de Doctorado. University of Sheffield, Londres. 195 pp.
- Li, B. 1996. Implementing spatial statistics on parallel computers. En: Arlinghaus, S.L. (ed.). 1996. *Practical handbook of spatial statistics*. CRC Press. 307 pp.
- Lilburne, L. R., T. H. Webb. & G. L. Benwell. 2004. The scale Matcher: a procedure for assessing scale compatibility of spatial data and models. *Int. J. Geographical Information Science*, **18**(4): 257-279.
- Murguía, M. & J. E. Llorente. 2003. Reflexiones conceptuales en biogeografía cuantitativa. En: Morrone, J. J. & J. Llorente (Eds.). *Una perspectiva latinoamericana de la biogeografía*. UNAM. 307 pp.
- Murguía, M. & J. L. Villaseñor. 2000. Estimating the quality of the records used in quantitative biogeography with presence-absence matrices. *Ann. Bot. Fennici*, **37**: 289-296.
- Murguía, M. & J. L. Villaseñor. 2003. Estimating the effect of the similarity coefficient and the cluster algorithm on biogeographic classifications. *Ann. Bot. Fennici*, **40**: 415-421.
- Openshaw, S. & P. J. Taylor. 1976. A million or so correlation coefficients: three experiments on the modifiable areal unit problem. En: N. Wrigley (ed.). *Statistical applications in the spatial sciences*. Pion Limited, London.
- Penrose, R. 1989. *La nueva mente del emperador*. Grijalbo Mondadori. Barcelona. 597 pp.
- Phipps, J. B. 1975. BestBlock: optimizing grid size in biogeographic studies. *Canadian Journal of Botany*, **53**(15): 1447-1452.
- Vasiliev, I. R. 1996. Visualization of spatial dependence: an elementary view of spatial autocorrelation. En: Arlinghaus, S. L. (ed.). 1996. *Practical handbook of spatial statistics*. CRC Press. 307 pp.
- Wong, D. 1996. Aggregation effects in geo-referenced data. En: Arlinghaus, S. L. (ed.). *Practical handbook of spatial statistics*. CRC Press. 307 pp.
- Zhang, Z. & D. A. Griffith. 2000. Integrating GIS components and spatial statistical analysis in DBMSs. *Int. J. Geographical Information Science*, **14**: 543-566.

Entre los días 18 y 20 de mayo del 2004 se celebró en la Ciudad de México el simposium titulado “Conversaciones sobre diversidad: el significado de alfa, beta y gamma” organizado por CONABIO y el grupo DIVERSITAS-México, con el apoyo financiero de la Dirección de Asuntos Internacionales del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México. La celebración de esta reunión respondió a una verdadera necesidad, sentida por muchos investigadores: convocar a una parte importante de los interesados en esta temática para discutir ideas y enfrentar puntos de vista sobre lo que significan las distintas expresiones de la biodiversidad, las relaciones que tienen entre sí y la forma de medirlas. El simposio fue un éxito, tanto por las comunicaciones presentadas, como por la amplia discusión desarrollada en su seno y ello nos llevó a considerar la publicación de sus contenidos, con la ayuda de la Sociedad Entomológica Aragonesa (España), para ofrecer al mundo científico un libro que los editores creemos nuevo y original, y en español, con las contribuciones más destacadas de aquel evento.

