

# El concepto de escala



## *y la teoría de las jerarquías en ecología*

Hasta ahora, la aproximación al conocimiento de la naturaleza ha sido posible al utilizar el método científico tradicional (hipotético-deductivo), en el cual los fenómenos de la naturaleza han sido conceptualizados como sistemas simples y aislados, y cuya finalidad ha sido el ofrecer una explicación causal (determinista) y mecanicista de los fenómenos que ocurren en ella. El método hipotético-deductivo incorpora pocas variables, considerando que ellas están en equilibrio y que son estáticas y homogéneas tanto en el espacio como en el tiempo, es decir, unicasales, unidireccionales y lineales. Además, la escala de espacio y de tiempo que incorpora es muy pequeña, por tanto, en la búsqueda de explicaciones y predicciones de los patrones de la naturaleza, dicho método tiene un bajo poder de generalización. El fin último de este enfoque es establecer que el entendimiento de cada una de las partes que conforman a la naturaleza ofrece la compren-

sión de la misma como un todo. En esta concepción reduccionista no sólo existe una disminución en el número de factores que explican los patrones, sino también en la posibilidad de ofrecer explicaciones alternas, con lo cual se busca explicar el componente como resultado de su comportamiento intrínseco, es decir, sin tomar en cuenta su entorno.

La ciencia ecológica no ha sido la excepción al adoptar el método científico tradicional, por lo que en la búsqueda de generalizaciones y predicciones ha concebido una naturaleza en equilibrio, estática y homogénea. Los procesos ecológicos que la explican se conciben por tanto como fenómenos simples, unidireccionales, unicasales y con respuestas lineales. Los estudios mecanicistas han ayudado a entender las relaciones causa-efecto de algunos procesos ecológicos; sin embargo, no ha sido posible explicar los patrones ecológicos en la naturaleza

LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO



ALBA E. ZARCO ARISTA

por medio de la extrapolación de los resultados de laboratorio y de campo en pequeña escala. Esta limitante se debe a que en la naturaleza existe una gran heterogeneidad espacial y temporal que hace difícil extrapolar datos que se generan en condiciones homogéneas, es decir, que no se han logrado explicar los mecanismos que producen los patrones de distribución de especies en áreas geográficas grandes. La aplicación del concepto de heterogeneidad presupone que el funcionamiento de la naturaleza está explicado por procesos que se llevan a cabo en diferentes escalas espacio-temporales, que los procesos ecológicos son dependientes de la escala. Sin embargo, la importancia del concepto de escala no se ha generalizado en los diferentes niveles de organización ecológica, aun cuando se ha mencionado que el estudio de la heterogeneidad espacial es fundamental para la investigación en la naturaleza.

El concepto de escala puede definirse como la dimensión espacial y temporal que se requiere para un cambio en la tasa a la cual ocurren los procesos y en la importancia relativa de los factores que explican dichos procesos. La definición de escala implica heterogeneidad; conforme la ventana de observación de espacio o de tiempo aumenta, cambia la importancia de los organismos, sus características y los parámetros ambientales. Por tanto, la incorporación del análisis espacial puede ayudar a identificar la heterogeneidad en diferentes escalas espaciales y temporales sobre las cuales operan los procesos que explican los patrones en amplias áreas geográficas. Los estudios de procesos ecológicos en el laboratorio o el campo, en pequeña escala espacio-temporal, no son considerados dependientes de la misma, es decir, muchas veces los procesos que generan cambios importantes en el patrón ocurren lentamente y requieren amplias esca-

las geográficas y largos períodos de observación. Como menciona Levin, el estudio de la escala requiere el análisis del cambio y la variabilidad de los patrones de acuerdo con la escala de descripción.

Otro elemento conceptual importante en este trabajo es el de la teoría de las jerarquías, la cual considera a los sistemas ecológicos como sistemas complejos, es decir, que postula la existencia de una relación entre la entidad (el objeto de estudio en cuestión) y su contexto (las interrelaciones con su matriz), por lo que cada nivel jerárquico posee un grupo de relaciones diferentes. La importancia de este concepto es que nos ayuda a entender las diferentes tasas a las que ocurren los procesos ecológicos. Los fenómenos que se estudian en pequeñas escalas espacio-temporales no son muy predecibles porque los sistemas biológicos son poco persistentes y muy variables, lo cual se debe al límite y a la baja extensión espacio-temporal de los datos. La escala de observación también cambia el número de variables involucradas. A escalas pequeñas existe un gran número de variables que explican un proceso, por

tanto, los fenómenos que ocurren en éstas tienen gran variabilidad y poca generalidad. Por el contrario, en grandes escalas, pocas variables explican los procesos, por lo cual se incrementa la predictibilidad.

En diferentes trabajos se ha establecido que los sistemas ecológicos poseen heterogeneidad y están estructurados jerárquicamente. Por lo mismo, el desarrollo de la teoría ecológica debe incorporar la descripción y la cuantificación de la variabilidad espacial y los diferentes niveles jerárquicos que explican los patrones ecológicos. Levin señala: "Todos los sistemas ecológicos presentan heterogeneidad y formación de parches en grandes escalas espaciales y temporales". Estas características son fundamentales para entender la dinámica de las poblaciones, la estabilidad y organización de las comunidades y el reciclaje de elementos en los ecosistemas. Sin embargo, no se ha producido la información relevante en diferentes escalas para explicar los patrones del comportamiento de las poblaciones, la estructura de las comunidades y la de los ecosistemas, así como su funcionamiento.





### La ecología de las poblaciones

Tradicionalmente, los modelos de crecimiento poblacional suponen que el espacio y el tiempo son homogéneos. El problema principal de este enfoque es que no considera que los parámetros demográficos como la natalidad, la mortalidad y la sobrevivencia dependen de la heterogeneidad espacial; por tanto, no pueden explicar los patrones de la distribución y dinámica de las especies en amplias escalas geográficas. Por otro lado, en la ecología de poblaciones, la incorporación del concepto de heterogeneidad espacial no ha sido la excepción.

Un tema reciente relacionado con este nivel de organización ha sido el papel de la heterogeneidad espacial en la reducción de las tasas de extinción de las poblaciones. Los modelos que toman en cuenta el espacio son: a) los de reacción-difusión, b) los de parches, y c) los de estados discretos basados en sistemas individuales. Estos modelos se basan únicamente en cómo los organismos responden a esa heterogeneidad, pero se vuelve a considerar que el crecimiento, la reproducción y la sobrevivencia ocurren en la misma escala temporal, a pesar de que es claro que éstas operan en distintas escalas temporales. Asimismo, se considera que los parámetros demográficos son producto únicamente del comportamiento de los organismos que componen la población; es decir, que los factores denso-dependientes son más importantes que los factores denso-independientes. Sin embargo, se ha reportado que los parámetros independientes de la densidad operan en escalas espacio-temporales que están por encima de la población y que son los más importantes para regular la dinámica poblacional. Un primer esfuerzo por incorporar la escala que determina la dinámica de las poblaciones ha sido llevado a cabo con el enfoque de meta-

poblaciones, en el cual se supone que los parches individuales tienen tasas de extinción altas, pero que la alternativa de colonizar más parches reduce la posibilidad de la extinción de las poblaciones. En este ejemplo ha sido importante la inclusión del enfoque de la teoría de la jerarquía para decidir a qué escala operan los procesos que mantienen dicha dinámica, por lo que es posible: a) entender la importancia relativa de todos los procesos (dependientes e independientes de la densidad), así como su variación en el tiempo; b) generar modelos poblacionales que posean una aproximación más real y mejorar la precisión de los modelos de proyección poblacional; y c) la incorporación de la teoría de jerarquías con el fin de observar a las poblaciones como un sistema jerárquico (recurso-población-comunidad). En dicho sistema podemos entender si la dinámica de la población está regulada por un nivel inferior, como la disponibilidad y heterogeneidad de recursos, o por un nivel superior, como la comunidad (interacciones al interior de la especie).

### La ecología de las comunidades

Los comportamientos de las interacciones de dos especies han incorporado el papel de la heterogeneidad espacial. Los modelos que han sido utilizados para incluir el espacio han sido de reacción-difusión y de autómatas celulares. Estos trabajos concluyen que la heterogeneidad espacial es indispensable para la coexistencia de especies. En los trabajos en el ámbito de la comunidad, la integración de la heterogeneidad espacio-temporal y la escala han documentado el cambio de los factores que explican los procesos que mantienen la estructura de las comunidades. Por ejemplo, con el cambio de la ventana de observación espacio-temporal las interacciones de las es-

pecies pueden cambiar de intensidad e inclusive de dirección. Los recursos (agua, nutrientes, luz) son heterogéneos, y dependiendo de la escala podemos observarlos formando parches o continuos. Asimismo, la variabilidad de éstos desempeña un papel clave en la variación espacial de la estructura de las comunidades.

El problema científico de la ecología de comunidades tiene que ver con las fuerzas que las estructuran y con la predicción de los cambios en el número de las especies de las mismas. Por tanto, tiene una amplia relación con la variabilidad. Muchos de los mecanismos por los cuales las especies coexisten son dependientes de la



heterogeneidad ambiental en espacio o tiempo, o en el caso de perturbaciones de ambas heterogeneidades. Sin embargo, ésta no sólo existe en la distribución de los recursos, sino que hay una amplia heterogeneidad biótica (densidad y composición de las especies), en particular en los parámetros demográficos (sobrevivencia, crecimiento y fecundidad), los cuales varían en el espacio dando lugar a cambios en la estructura de la comunidad.

Las perturbaciones tienen un efecto estabilizador sobre la limitación de recursos, ya que éstas pueden: a) eliminar a los individuos competitivamente dominantes y reducir la exclusión competitiva; y b) generar una alta disponibilidad de recursos que permita que las especies de rápido crecimiento puedan coexistir.

Al incluir la teoría de las jerarquías y el concepto de escala se pueden conocer los cambios en la disponibilidad de recursos —integrando diferentes escalas espacio-temporales— y la manera en la que influyen sobre la coexistencia de especies en amplias áreas geográficas; también permiten comprender la interacción de la variabilidad de las características ambientales y los cambios en la estructura de la comunidad.

## La ecología de los ecosistemas

La ecología de los ecosistemas ha sido uno de los enfoques que mayor atención ha puesto en la heterogeneidad espacial y temporal. En los estudios a nivel de ecosistema se ha observado que los procesos que explican la productividad, los balances de agua, los patrones de descomposición y la biogeoquímica, son procesos dependientes de la escala. Así, a escala local, la productividad es explicada por la precipitación y por la capacidad de retención de agua en el suelo, pero que, a escalas mayores, lo es por el patrón regional de la precipitación.

Holling menciona que la dinámica y estructura de los ecosistemas son explicadas por fenómenos que ocurren en diferentes escalas espacio-temporales, y establece que los procesos de la vegetación se explican en pequeña escala por el crecimiento de las plantas, por su estructura y por la del suelo, a mediana escala por los procesos de perturbación (fuego, plagas de insectos y los huracanes), y a macro escala los procesos geomorfológicos los que mantienen la estructura de los ecosistemas. Asimismo, él propone que se debe buscar información que se pueda cruzar entre escalas para determinar la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas. Aunque la heterogeneidad espacial de muchos procesos en los ecosistemas es desconocida, los resultados de los sitios específicos no pueden extrapolarse a escalas regionales.

Una propuesta interesante sería entender cómo los procesos que ocurren en escalas pequeñas influyen sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, es decir, cómo pequeños procesos tienen grandes implicaciones en la dinámica de éstos. Otro aspecto de interés es concebir la entrada de energía y materia a los ecosistemas como fenómenos aleatorios y estocásticos (*i.e.* la entrada de precipitación a los ecosistemas). Esto tiene profundas consecuencias en el comportamiento de los ecosistemas; por ejemplo, la dinámica de los flujos se presenta en pulsos (actividad microbiana y liberación de nutrientes al suelo). Lo anterior pone de manifiesto que si los ecosistemas se abordan con los parámetros anteriores, se puede ofrecer una visión novedosa acerca de la complejidad de la naturaleza.

## Heterogeneidad espacial estadística

Como se mencionó previamente, uno de los aspectos que ha adquirido relevancia en la teoría ecológica es el

reconocimiento de la variabilidad, la cual refleja la heterogeneidad espacial y temporal de los sistemas ecológicos. El problema de concebir a la naturaleza de manera simplificada y homogénea se manifiesta en la forma de abordarla analíticamente. Con anterioridad, en los trabajos ecológicos la variabilidad era considerada como ruido en la interpretación estadística de los datos, ya que éstos se analizan bajo los supuestos de que existe homogeneidad de varianzas, independencia, etcétera. En realidad, lo que se ha considerado como ruido se debe a que en los sistemas ecológicos la heterogeneidad es inherente al sistema, por lo cual éstos no pueden cumplir con los requisitos de replicación, homogeneidad de varianzas, independencia, etcétera.

El concepto de heterogeneidad ha sido usado indistintamente en las áreas de ecología y estadística, y es interpretado de diferente manera en ambas disciplinas. Los ecólogos la definen como la variación espacial en la composición de especies, la disponibilidad de recursos, etcétera, es decir, que identifica cambios en los valores de un parámetro cuantitativo o cualitativo. Por el contrario, en estadística la heterogeneidad se refiere a que los datos no presentan una distribución normal e independiente, por tanto, no se refiere a la heterogeneidad espacial de los patrones en la naturaleza.

Es importante comprender la variabilidad asociada a la heterogeneidad espacial en diferentes formas y combinaciones. Asimismo, no se debe perder de vista que los componentes de los diseños experimentales son deterministas (en pequeñas escalas espacio-temporales), pero se ignora si puedan existir componentes estocásticos y caóticos. Los componentes deterministas pierden importancia en estudios de grandes escalas espaciales porque en éstas las interacciones son más importantes que las relaciones causa-efecto.

#### Alternativas al método científico

Considerando lo anterior, permanece el reto de comprender a la naturaleza como un sistema complejo, multidireccional, multicausal, sin equilibrio, dinámico y con respuestas no lineales. Es decir, hace falta incorporar la heterogeneidad biológica y ambiental en diferentes niveles tróficos de manera simultánea para entender las fuerzas que regulan la organización de los sistemas ecológicos. La forma de llevarlo a cabo es integrando el concepto de escala espacial y temporal y la teoría de jerarquías en

la descripción de los patrones ecológicos en la naturaleza. Entender los fenómenos ecológicos de cada uno de los niveles de organización como un sistema complejo (componentes y contexto), es un reto para el cuerpo conceptual en la ecología. Bajo estas condiciones, la aproximación experimental tiene que llevar a cabo experimentos que consideren: a) sistemas de muchas especies, b) recursos múltiples limitantes, c) la incorporación de diferentes niveles tróficos, d) experimentos en grandes áreas geográficas, y e) estudios de largo plazo. Esto puede ser interesante para entender la dinámica de poblaciones y la estructura de las comunidades.

Una alternativa más es concebir a los patrones ecológicos de las poblaciones, los ecosistemas y las comunidades como sistemas autoorganizables con dinámica de parches y con equilibrios múltiples y estables. Esto puede ser posible aplicando la teoría general de sistemas y la teoría del caos para entender la variabilidad espacio-temporal y las escalas de resolución.



La ecología necesita la implementación de técnicas estadísticas que incluyan en sus hipótesis e interpretaciones la heterogeneidad espacial, técnicas como los índices para patrones de punto, variogramas, análisis de varianza dependiente de la escala y correlogramas para patrones de superficie. Asimismo, hace falta la incorporación de los índices fractales para determinar las tasas de cambio de los procesos en el espacio. Por otro lado, la inclusión de la teoría del caos es importante porque ésta puede ayudarnos a determinar analíticamente si los patrones en la naturaleza son periódicos, caóticos o aleatorios, así como la escala temporal a la cual ocurren los procesos.

### El reto de la complejidad

En la información revisada en la literatura ecológica la descripción de la heterogeneidad espacial es vista sólo como una entidad estática. La variabilidad espacial y temporal ha sido descrita como una entidad más, es decir, sólo afecta a los organismos y a su forma de responder a esa heterogeneidad espacial; sin embargo, poco se ha dicho sobre cómo el cambio de escala y la heterogeneidad pueden influir en las conclusiones que se obtienen en un nivel jerárquico aislado. Por tanto, es necesario crear modelos con diferentes niveles de complejidad, es decir, entender los patrones ecológicos, integrando diferentes

niveles de organización y, sobre todo, generando información a la escala adecuada para discernir la importancia de los procesos que explican los patrones en la naturaleza.

Como se mencionó anteriormente, uno de los retos es la integración de los diferentes enfoques en la ecología. Este tipo de visión comienza a utilizarse al enlazar procesos funcionales entre el nivel de poblaciones y el de ecosistemas, como las relaciones entre la actividad fisiológica de los individuos (fotosíntesis, uso eficiente de agua y nutrientes) y la estructura de los ecosistemas. Asimismo, sería conveniente combinar parámetros de la estructura de la población (tamaño de los individuos, tasa de crecimiento) con la productividad del ecosistema. Otro ejemplo son los estudios que incluyen las relaciones entre comunidades y ecosistemas, como el papel de la diversidad de especies sobre el funcionamiento del ecosistema.

Los cambios y las perturbaciones dentro de los sistemas ecológicos son atribuidos a propiedades de las entidades, pero no a cambios en el contexto. La organización de los sistemas ecológicos posee características como la estructura, el funcionamiento y la complejidad, y éstas cambian por influencia de fuerzas internas y externas.

Tal vez en la teoría ecológica lo más interesante sea estudiar la amplitud y periodicidad de las fluctuaciones ecológicas y los patrones de variación acorde con la dinámica espacio-temporal. 🌱



#### Leopoldo Galicia

Instituto de Geografía,  
Universidad Nacional Autónoma de México.

#### Alba Esmeralda Zarco Arista

Instituto de Ecología,  
Universidad Nacional Autónoma de México.

#### AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer al Dr. Jorge Meave del Castillo por su valiosa revisión del trabajo.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, T. F. H. y T. W. Hoekstra. 1992. *Toward a Unified Ecology*. Columbia. University Press, Nueva York.

Dutilleul, P. y P. Legendre. 1993. "Spatial Heterogeneity against Heteroscedasticity: an Ecological Paradigm *versus* a Statistical Concept", en *Oikos*, núm. 66, pp.152-171.

Holling, C. S. 1992. "Cross-scale Morphology, Geometry, and Dynamics of Ecosystems", en *Ecological Monographs*, núm. 62, pp. 447-502.

Kareiva, P. 1994. "Special Feature: Space: The Final Frontier for Ecological Theory", en *Ecology*, núm. 75, pp. 1-2.

Levin, S. A. 1992. "The Problem of Pattern and Scale in Ecology", en *Ecology*, núm. 73, pp. 1943-1967.

O'Neill, R. V., A. R. Johnson y A. W. King. 1989. "A Hierarchical Framework for the Analysis of Scale", en *Landscape Ecology*, núm. 3, pp. 193-206.

Pahl-Wostl, C. 1995. *The Dynamic Nature of Ecosystems: Chaos and Order Entwined*. John Wiley & Sons, Londres.

Tilman, D. 1994. "Competition and Biodiversity in Spatially Structured Habitats", en *Ecology*, núm. 75, pp. 2-16.

Turner, M. G. 1989. "Landscape ecology: The Effect of Pattern on Process", en *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, núm. 20, pp. 171-197.

#### IMÁGENES

P. 34: Mariana Yampolski, *Oratorio menor en la muerte de Silvestre Revueltas*, grabado sobre linoleo, 1949. Pp. 35-39: Alberto Beltrán, grabados diversos. P. 40: Mariana Yampolski, *El ppoquin*, viñetas en scratchboard, 1956.