

Con la aparición del libro *Biological Diversity of Mexico* (Ramamoorthy, et al., 1993) vino a cerrarse un primer ciclo en el estudio de la riqueza biológica del país, una etapa que se inició cinco años atrás con la aparición de mi artículo *La diversidad biológica de México* (Toledo, 1988), que fue la primera publicación dedicada a tratar de manera explícita este tema. En ambos casos, las publicaciones se originaron en sendos encuentros académicos realizados por iniciativa de varias instituciones tanto mexicanas, como de carácter internacional. Si esta primera etapa concluyó fue para dar lugar a un segundo periodo. En efecto, la creación de la CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), un organismo gubernamental, especialmente dirigido a atender este tópico, marca el inicio de lo que seguramente será la segunda etapa en el abordaje del tema. Este hecho tiene un enorme significado, porque coloca al país en una situación privilegiada, casi única, con respecto a la problemática de la conservación y uso correcto de la biodiversidad en el mundo. No solo es México uno de los pocos países en donde existe un programa de carácter nacional sobre la biodiversidad (sólo se tiene noticias de esfuerzos similares en Australia y Sudáfrica), sino que es el único "país tropical" con una reconocida megadiversidad, que cuenta con una estructura institucional de esta índole. Ello ubica al país en una situación de vanguardia, pero también obliga a quienes se encuentran comprometidos con este reto, a resolver problemas e interrogantes, nunca antes visualizados, de organización académica, de teoría y metodología, de estrategia de investigación y aun de simple logística.

En efecto, la sola formulación de un *proyecto nacional de investigación* como el que el estudio de la biodiversidad de México plantea, supone un salto cualitativo en la investigación desde los estilos personales de los investigadores hasta los relacionados con la política científica a nivel de instituciones y del país entero. Por

# La diversidad biológica de México.

## Nuevos retos para la investigación en los noventas

VÍCTOR M. TOLEDO

todo lo anterior, el presente ensayo hace una exploración de los principales retos que, para la investigación, desencadena el estudio de la biodiversidad del país, en el futuro inmediato (los noventa). Dicha exploración se realiza tomando como punto de partida un balance, o diagnóstico de los avances logrados en el campo y las nuevas interrogantes que se proyectan.

### El estudio de la biodiversidad: significados epistemológico y social

El cierre del siglo encuentra a los seres humanos enfrentando una crisis ecológi-

ca de escala planetaria, uno de cuyos componentes es, precisamente, la pérdida de la "variedad de la vida" como resultado de la transformación de los hábitats, la contaminación de origen urbano-industrial (especialmente sobre los ecosistemas acuáticos continentales y marinos), la sobreexplotación de los recursos y el comercio ilegal de especies. Como sucede con el resto de los principales problemas ambientales reconocidos, la pérdida de la biodiversidad ha cimbrado los círculos académicos contemporáneos, ha cuestionado buena parte de los paradigmas de las discipli-

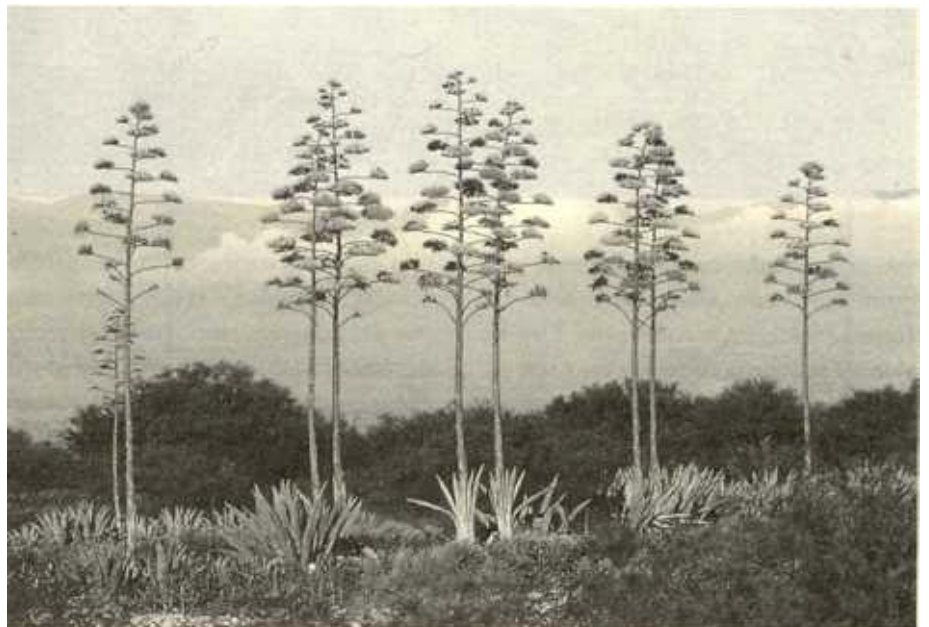


Foto: Fulvio Eccardi

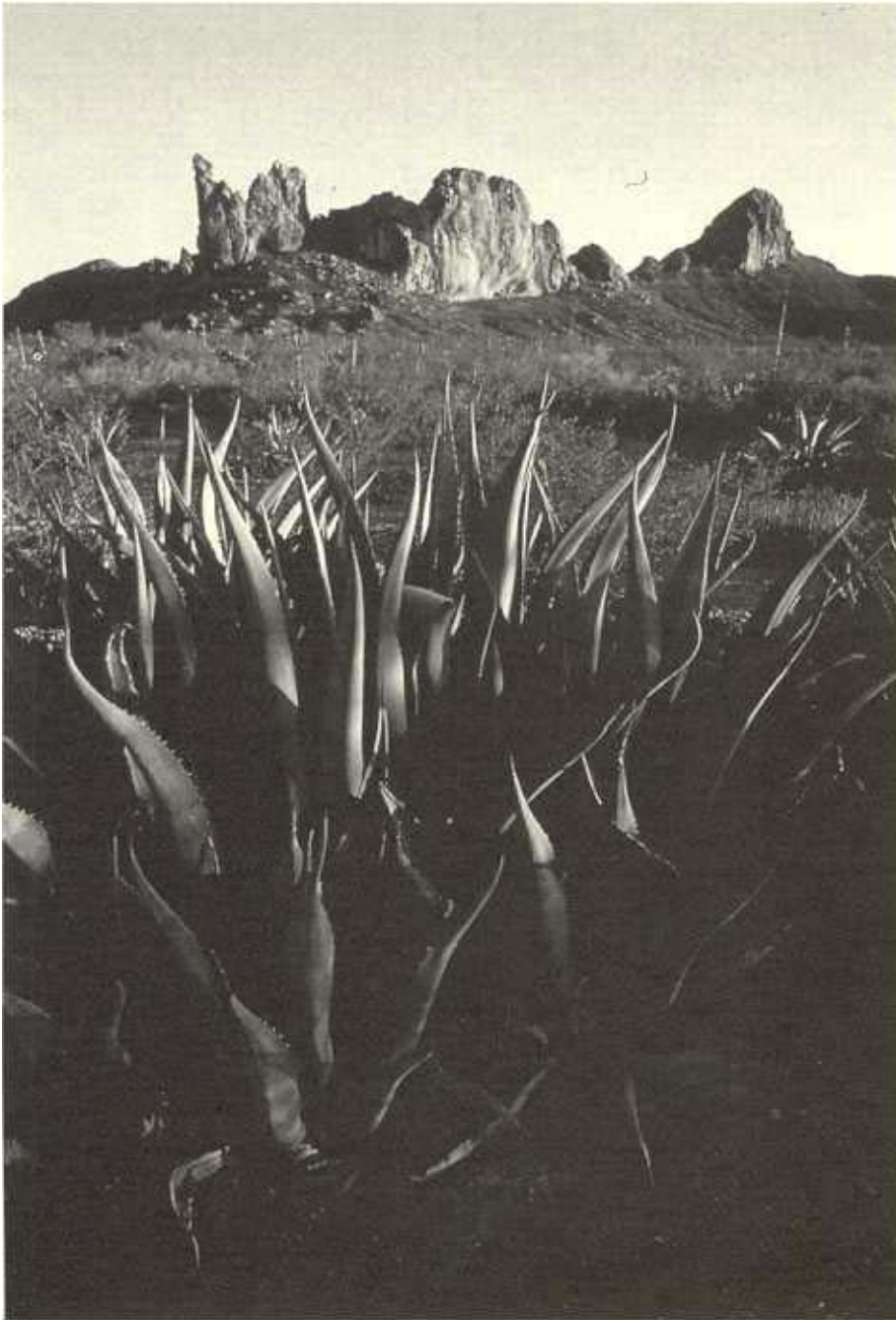


Foto: Fulvio Eccardi

nas relacionadas con el problema y ha estimulado la proposición de nuevos enfoques, métodos y conceptos. Ello ha sido así porque la conservación y uso correcto de la diversidad biótica del planeta requiere de información confiable y precisa, es decir, requiere de la investigación científica. Esta ha sido, por cierto, la manera en que, a través de la historia los nuevos campos de la ciencia se han originado: nuevas demandas sociales,

esto es, la resolución de nuevas problemáticas, estimulan y crean nuevos campos del conocimiento. Desde el punto de vista epistemológico, esto se traduce, como ha argumentado Kuhn, en el cuestionamiento de una "ciencia normal", es decir de los paradigmas habituales. En el caso de los problemas ambientales (y la pérdida de la biodiversidad es uno de ellos), no cabe duda de que estamos viendo un profundo reacomodo en la

manera de visualizar las problemáticas y, por lo mismo, una re-configuración de los campos habituales del conocimiento científico, normalmente encargado del estudio del tema.

Desde otra perspectiva, puede afirmarse que el estudio de la biodiversidad está dando lugar a un nuevo campo o enfoque del conocimiento (*¿la biodiversología?*) o a lo que Soulé ha llamado (al referirse a la biología de la conservación) una "disciplina de crisis" (*crisis discipline*), y en la cual ante la urgencia de datos, "...one must act before knowing all the facts; crisis disciplines are thus a mixture of science and art, and their pursuit requires intuition as well as information". Cualquiera que sea el destino de esta nueva forma de abordar el problema, queda claro que la necesidad de salvaguardar el patrimonio biótico del planeta y sus espacios (países, regiones, localidades) está replanteando el significado normal de las ramas de la biología, tradicionalmente encargadas de atender estos asuntos. En efecto, lo que presenciamos hoy en día es una reformulación del fenómeno evolutivo (esta vez por sus implicaciones prácticas) y de las tres ramas que se ocupan de interpretarlo (la *taxonomía*, la *ecología* y la *biogeografía*). Esta reconfiguración surge como una respuesta a problemas y preocupaciones concretas del mundo contemporáneo, tales como la pérdida de genes y organismos, el uso y manipulación de genes y especies con utilidad real o potencial, y el mismo equilibrio ecológico del sistema planetario. Estas disciplinas se encontraban en una especie de "encantamiento academicista", el cual tendía a mantenerlas confinadas al aislamiento, es decir, como estancos separados. Pero el nuevo concepto de *biodiversidad* ha tenido la virtud de sacarlas de ese estado para reunir las y ponerlas en acción, de manera integradora, en torno a un problema concreto. Es decir, las ha vuelto un conocimiento, socialmente demandado, que se requiere con urgencia. Parece entonces que estamos ante el advenimiento

to de un área del conocimiento con una estructura sintética, ecléctica, pragmática y multidisciplinaria. Veamos cómo toma cuerpo esta situación, en el caso del estudio de la biodiversidad de México, no sin antes hacer una rápida revisión de lo que este concepto implica.

**El concepto de biodiversidad: definiciones, explicaciones y mediciones**

El empleo del término *diversidad biológica* es reciente; surgió indisolublemente ligado a las instituciones académicas y organismos nacionales e internacionales dedicados a la conservación biológica, y como un concepto sintético que incluye por igual enfoques de la taxonomía, la ecología y la biogeografía. Es al mismo tiempo un concepto que implica una finalidad práctica: la evaluación de los ambientes naturales (y sobre todo) perturbados del planeta. En tal sentido el concepto de biodiversidad de carácter tridisciplinario y pragmático resulta diferente del concepto de *diversidad de especies*, postulado hace casi cuatro décadas como un rasgo estructural ecosistémico, a partir de la aplicación a la ecología, de la Teoría de la Información (por ejemplo Margalef, 1957 y 1968). En varios sentidos, el término de biodiversidad conlleva un significado amplio, de tal forma que, como bien señala Pielou (1991), tal concepto abarca varios diferentes tipos de diversidad: *genética, específica, estructural, ambiental y ecosistémica* (véase también Lévêque & Glachant, 1992 y di Castri & Younés, 1990).

Para complicar el cuadro, el concepto de biodiversidad, que implica la medición de la riqueza biótica en un espacio y un tiempo determinados, dado su significado práctico, también conlleva un componente geopolítico. Por ello el empleo del término *megadiversidad biológica*, introducido por Mittermeir, así como su utilización como un elemento más de la negociación internacional (en la Cumbre de Río), otorga a este concepto una dimensión cualitativamente nueva, que

lo deja muy lejos del concepto de diversidad empleado, de manera "doméstica", por los investigadores de la ecología (biológica). Usher de alguna forma coincide con esta apreciación cuando afirma: "*Biodiversity is therefore an integration of natural history (or knowing what species there are), measurement (or how to assess what we mean by diversity and how to compare sites) and use (or the realisation that many species are important for the long term survival of Homo sapiens)*". Por todo ello, el concepto de biodiversidad ha sido ya integrado al vocabulario normal del pensamiento conservacionista (por ejemplo Wilson, 1988; McNeely, *et al.*, 1990).

El carácter cualitativamente nuevo del concepto de biodiversidad (por sobre el de diversidad de especies) se vuelve determinante cuando se revisan tanto las diferentes elaboraciones teóricas que tratan de explicar el fenómeno,

como las fórmulas propuestas para medirlo. Que los patrones de biodiversidad rebasan el ámbito meramente ecológico, ha sido puesto en evidencia por la investigación empírica de las últimas décadas (véase Brown, 1988), que muestra la insuficiencia de los modelos basados en principios tales como la disponibilidad de recursos, predación, competencia, equilibrio entre especiación/inmigración y extinción/emigración y estructura o productividad del hábitat, formulados desde la teoría ecológica (Mac Arthur, 1972; Terborg, 1974). Otros factores, como aquellos utilizados por la biogeografía para explicar patrones o tendencias en la distribución espacial de las especies (por ejemplo procesos históricos, barreras geográficas, refugios, etc.), resultan de mayor importancia sobre una cierta escala geográfica. *Más fértil ha sido por lo tanto la explicación de fenómenos parti-*

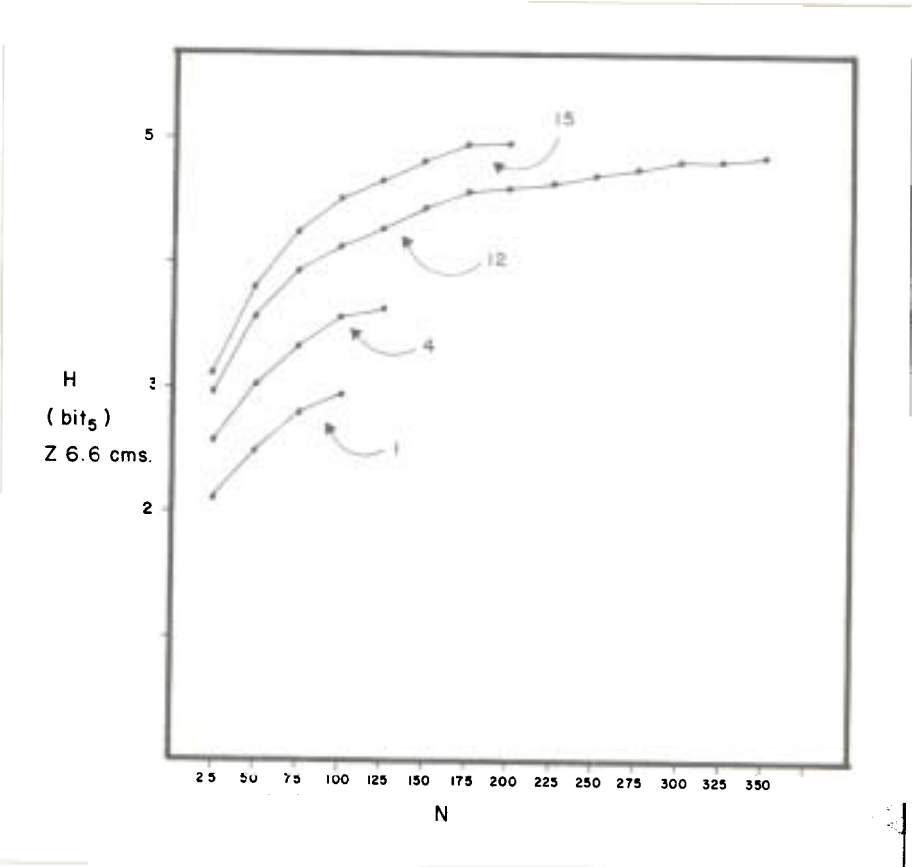


Figura 1. Espectros de diversidad (H) para cuatro muestras de árboles en el trópico húmedo de México. Los sitios de las muestras son: 1: Huichihuapan, SLP; 4: Tuxtepec, OAX; 12: Huimanguillo, TAB y 15: La Lacandona CHIS. Fuente: Toledo, inédito.



culares, basados en evidencias empíricas, que los intentos por crear una teoría general. La explicación de los patrones de biodiversidad encontrados, varía, por lo menos, en función de la escala espacial, el tipo de organismo estudiado, la condición del hábitat (terrestre *versus* acuático o marino), etc. Muy notable es la importancia de la escala espacial del estudio, un hecho que hoy en día obliga a repensar los dominios de las disciplinas y aun sus definiciones.

En el caso de la medición de la biodiversidad sucede algo semejante. Si bien se han realizado propuestas sofisticadas para medir la diversidad de especies (véanse los libros de Pielou, 1975 y de Magurran, 1988 y la última contribución sobre el tema de Margalef, 1991), después de una cierta escala la fórmula más utilizada sigue siendo la más simple: el cálculo de la riqueza (número de especies) por unidad de superficie. Esto es así porque en la práctica los cálculos más complicados (por ejemplo los índices de Shanon-Weaver o Simpson) sólo son factibles sobre escalas muy finas, con las que puede obtenerse la información requerida (véase una discusión sobre este tema en Brown, 1988). Por otro lado, algunos autores se preguntan



Foto: Fulvio Eccardi

si una simple cifra logra expresar cabalmente el fenómeno, y si no resulta conveniente buscar otras formas para representarlo. Por ejemplo, siguiendo lo sugerido por Margalef (1968), es posible elaborar *espectros de diversidad*, los cuales expresan la tendencia del incremento de este parámetro, conforme aumenta el tamaño de la muestra o de la colección (figura 1). De enorme interés es la reciente propuesta de Pielou

(1991) que consiste en buscar, por una vía diferente un índice de biodiversidad de carácter totalizador (esto es que incluya todos los grupos de organismos presentes en un espacio determinado). Pielou (*op cit*) sugiere utilizar un *vector de diversidad* (*diversity vector*) que para ser útil, debe cumplir con dos propiedades: tendrá que ser elaborado a partir de información de campo de fácil obtención y, también que tendrá que ser rápidamente comprendido por los no especialistas. El mismo autor se inclina por el uso de *diagramas de diversidad*, en los que deberían quedar expresados ciertos patrones de la biodiversidad de un ecosistema o comunidad, tales como el espectro de formas de vida vegetales y otros fenómenos.

Más allá de las diferentes interpretaciones de la biodiversidad y de sus formas de medirla, nos encontramos con tres momentos o etapas del proceso cognoscitivo. El estudio de la biodiversidad, como el de cualquier fenómeno de la realidad natural o social, pasa necesariamente por tres fases bien definidas: una *descriptiva*, una *interpretativa* (o *analítica*) y una última *predictiva*. En todos los casos se trata, en última instancia, de descubrir y describir *patrones*, es decir regulari-

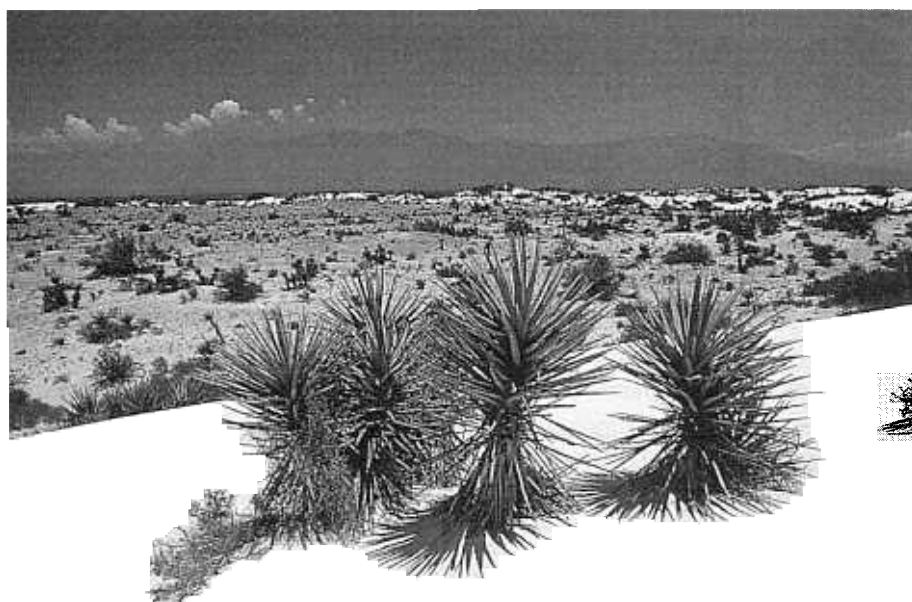


Foto: Fulvio Eccardi

dades en los fenómenos que se abordan. Los apartados que siguen hacen una exploración acerca de algunos de los retos que esperan a los estudiosos de la biodiversidad en México. Aunque he tomado como universo exploratorio el caso particular de un país, las aportaciones y propuestas tienen un significado general; es decir, deberían ser válidos para otros países que buscan igualmente la comprensión de este fenómeno, en una escala nacional.

### El primer paso necesario: los inventarios biológicos

La búsqueda de patrones de biodiversidad es imposible si no se cuenta con una estructura básica de conocimiento taxonómico. Esto es aún más cierto cuando se trata de buscarlos a una escala nacional. Ello implica no solamente el disponer de un conocimiento confiable acerca de las especies que habitan un espacio determinado (en este caso México), sino de sus distribuciones a través de ese espacio. La ausencia de este conocimiento hace aparecer como patrones aparentes lo que no son sino artificios de colecta (por ejemplo especies que aparecen como endémicas cuando en realidad no existen colectas suficientes). El problema reside entonces en saber en qué momento un inventario (que no es sino una muestra de escala nacional) alcanza el *mínimo de confiabilidad*. Esto depende, por supuesto, del grupo de organismos que se estudia y del espacio geográfico (en este caso un territorio nacional). Examinemos el caso de las plantas mexicanas, ya que ello nos dará oportunidad de atender el grado de dificultad que esto encierra.

En México no conocemos aún el total de especies de la flora fanerogámica, la cual se estima que aloja entre un mínimo de 23 000 especies y un máximo de 30 000 (Toledo & Rzedowski, 1993; Toledo, 1993b). Como ningún otro país en Latinoamérica, la colecta de plantas se incrementó en las últimas décadas al

pasar de 566 000 especímenes en 1974 (alojados en 18 herbarios nacionales) a 2 100 000 en 1990 (en 71 herbarios) (Toledo & Sosa, 1993). En un trabajo reciente, Campbell postuló, de manera arbitraria, que un índice de densidad de colecta mínima para los países tropicales, debería de ser de 100 especímenes

por 100 km<sup>2</sup>. Hacia 1990, México presentaba un índice de 107. Si a las colecciones nacionales se agrega el número de especímenes depositados en herbarios extranjeros, que se calcula es de 1 900 000 (Toledo & Sosa, 1993), el país quedaría con un gran total de unos cuatro millones de especímenes colectados.

ÁREA	S	REFERENCIA
<b>I. Floras exclusivas</b>		
A. Baja California	2 705	Wiggins (1980)
B. Nueva Galicia	6 000 <i>a</i>	MacVaugh (com. personal)
C. Tehuacán-Cuicatlán	2 600	Dávila <i>et al.</i> (1991)
D. Chiapas	8 248	Breedlove (1986)
Subtotal	19 553	
<b>II. Endemismos</b>		
E. Desiertos chihuahuenses	1 000	Johnston (1977)
F. Península de Yucatán	329 <i>b</i>	Sosa <i>et al.</i> (1985); V. Sosa, com. personal
G. Valle de México	62 <i>c</i>	Rzedowski y Rzedowski (1989) y J. Rzedowski, com. personal
Subtotal	1 391	
<b>III. Especies de otras floras no incluídas en I y II</b>		
H. Tamaulipas	66 <i>d</i>	F. González Medrano, com. pers.
I. Veracruz	740 <i>e</i>	V. Sosa, com. personal
J. Oaxaca	1600 <i>f</i>	Lorence y García (1986)
K. Guerrero	1200 <i>g</i>	
Subtotal	4 140	
<b>IV. Nuevos registros de floras terminadas</b>		
L. Baja California	800	Delgadillo (1987)
M. Chiapas	1000	E. Martínez, com. personal
N. Quintana Roo	175	Villanueva y Cabrera (1990)
Subtotal	1 975	
<b>V. Especies de hábitats especiales</b>		
O. Dunas costeras	200 <i>h</i>	Moreno (198)
P. Acuáticos y subacuáticos	250 <i>i</i>	Lot <i>et al.</i> (1986)
Subtotal	450	
<b>Total: I+ II+ III + IV + V = 27 509</b>		

Cuadro 1. Cálculo de la riqueza florística de México, basado en los inventarios florísticos regionales. *a.* 7 500 especies menos 1 500 por posible sobreposición con Chiapas. *b.* 17% de 1936. *c.* 3% de 2 071. *d.* 10% de un total de 8 000. *e.* 10% de un total de 7 400. *f.* 20% de un total de 8 000. *g.* 20% de un total de 6 000. *h.* 50% de un total de 400. *i.* 50% de un total de 500. (Tomado de Toledo, 1993).

Esto deja al país con un índice global de densidad de colecta botánica más que suficiente: sobre 200 especímenes por cada 100 km<sup>2</sup>. Sin embargo la realidad es otra. A pesar de que existen 16 floras regionales terminadas, o en proceso, que abarcan el 70% del territorio nacional, y de que ya está descrito el 75% de las especies consignadas en listados florísticos —*checklists*— (Sosa & Dávila, 1993), el país no cuenta aún con un listado de especies a escala nacional; es decir, no se conoce aún su diversidad florística. Todavía más, algunas de las que se suponen son ya floras terminadas, han sido enriquecidas recientemente por nuevos esfuerzos de colecta. Este es el caso de la flora de Baja California, a la cual Delgadillo J. R. agrega 800 especies; la de Quintana Roo, a la cual Villanueva y Cabrera adicionan 175 especies, y la de Chiapas a la cual Esteban Martínez (com. personal) le agrega ¡1 000 especies! Ello resalta la insuficiencia que existe en las colectas y que prevalece aún en los territorios o regiones. Por otra parte, revela el carácter limitado de los índices de densidad que suponen que

las colectas han sido realizadas de manera uniforme en el espacio. En análisis recientes sobre la cartografía de las colectas, se puede ver que muchas veces los colectores se concentran en los sitios más accesibles o con menor grado de dificultad (una muestra de esto es el conocido sesgo de la colectas junto a las carreteras).

El ejemplo anterior muestra la necesidad de evaluar con precisión el estado que guardan los inventarios biológicos, lo que nos obliga a crear índices o fórmulas para evaluar el grado de avance de un inventario biológico determinado y esto, a su vez hace necesario el usar modelos teóricos que evalúen la relación que se establece entre el “esfuerzo del conocimiento” y el universo por conocer. Todo esto nos hace regresar al problema de la escala, pues lo que aquí denominamos inventario, no es sino una muestra a escala nacional. Entonces ¿cómo formular modelos que sean igualmente válidos para unas cuantas hectáreas (que es la escala a la que trabajan los ecólogos) y para espacios microregionales, regionales, estatales y

de todo el territorio nacional? El punto de partida es, como en otros muchos casos, los avances logrados desde la teoría ecológica (véase Soberón & Llorente, 1993), que hoy son la porción más sólida del terreno. Sin embargo, se necesita mucha intuición y arte (invocando a Soulé), para matizar estas formulaciones, para poder utilizarlas en cada una de las diferentes escalas. Por ejemplo, la espacialización del “esfuerzo de colecta”, que en un modelo esencialmente ecológico se expresa por la relación que existe entre el número de nuevas especies encontradas con el tiempo empleado por un número determinado de investigadores (Soberón & Llorente *op cit*), puede quedar expresado, en otra dimensión, a través de mapas. En otros casos, la simple revisión histórica de la bibliografía, o de las colecciones, han ofrecido una idea del estado actual del conocimiento. Este ha sido el caso de los mamíferos (Ramírez-Pulido & Britton, 1981; Ramírez-Pulido & Müdspacher, 1987), los musgos (Delgadillo, 1990), las compuestas (Cabrera-Rodríguez & Villaseñor, 1987) o los sifonáptera (Morales & Llorente, 1986). Lo anterior llevaría a reconocer la necesidad de crear una *cartografía de esfuerzo de colecta* para cada grupo de organismos, sobre diferentes escalas espaciales, y elaborado bajo normas, criterios y estándares bien establecidos. Para ello tendrían que crearse comités de especialistas para cada grupo de organismos, que serían los responsables de realizar esta tarea. La teorización deberá ser un juego de proyecciones espaciales, a partir de áreas bien conocidas, combinado con técnicas de distribución geográfica de las especies, etc. La tarea, puede ser relativamente fácil en grupos bien colectados y de relativamente pocas especies, como lo son los vertebrados (especialmente los mamíferos) y quizás las plantas, pero esto tiende a complicarse en grupos tales como los insectos. Tendrán que buscarse otros métodos a partir de las colecciones mismas y sus registros; es decir eva-

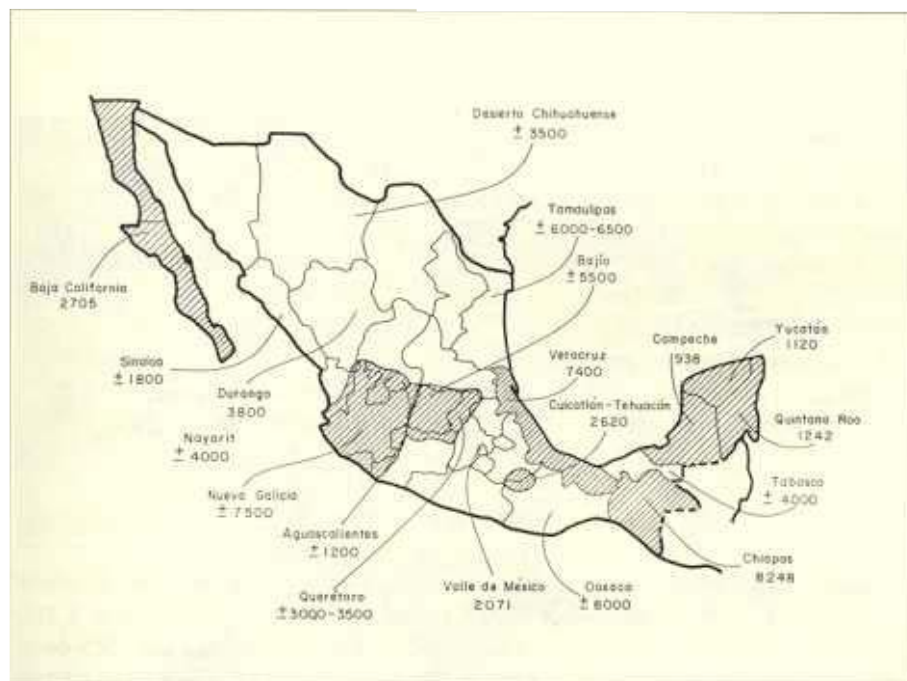


Figura 2. Riqueza florística (en número de especies de plantas) para varias regiones de México. Fuente: Toledo & Rzedowski, 1993 elaborado a partir de varias fuentes.

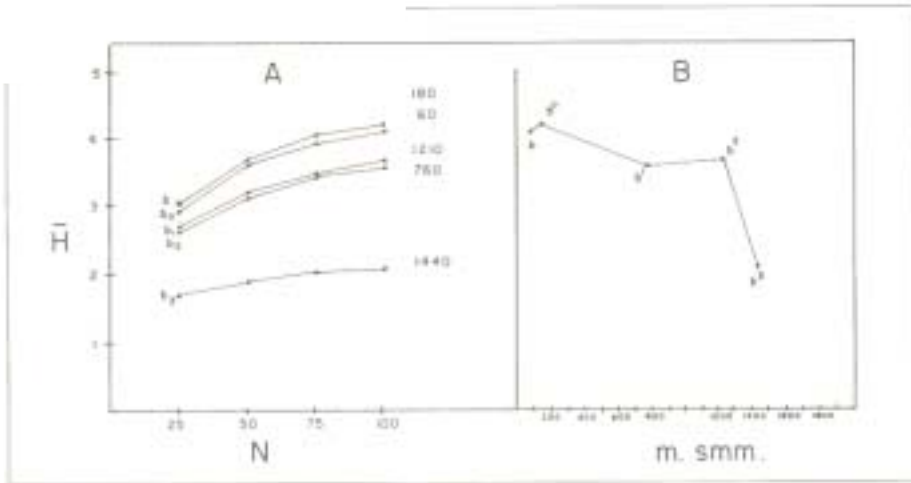


Figura 3. Diversidad de especies de árboles en cinco muestras de 100 individuos, cada una en diferentes altitudes de la región de Los Tuxtlas, Veracruz. Datos de campo del autor. A: Espectros de diversidad. B: Totales de diversidad.

luando el esfuerzo del conocimiento mediante formas de cuantificación de especímenes en herbarios y museos. De cualquier forma se hace necesario inducir y formalizar las investigaciones teórico-metodológicas en torno al grado de avance de los inventarios biológicos, en todas sus facetas y dimensiones. Ello debería permitir la uniformidad metodológica con la intención de tener una panorámica, bien sustentada, del grado de conocimiento básico sobre las especies de México y las necesidades de investigación en el futuro.

La segunda lección que se desprende del examen realizado con las plantas, es que la determinación de la riqueza biológica del país, en lo que concierne a su primera etapa (los inventarios), debe ser obligatoriamente un esfuerzo no solo metapersonal sino multiinstitucional. La realización y terminación de los inventarios biológicos, es entonces la primera prioridad en todo proyecto que intenta conocer la biodiversidad de un país. El caso de las plantas resulta de nuevo ilustrativo. Todo indica que hay que dar el "paso final" para integrar no solo un listado florístico del país, sino también un banco de información que incluya registros de colecta (etiquetas), distribución geográfica, caracteres principales, usos, imágenes de la especie, etc. (Sosa & Dá-

vila, 1993). La simple acumulación del número de especies derivados de las floras regionales, los endemismos, los nuevos registros, etc, sacados de la literatura nos ofrecen ya una primera cifra de lo hasta ahora conocido: más de 27 000 especies (Cuadro 1). Esta etapa de consolidación de la flora de México requiere sin embargo del consenso y la intención de las múltiples instituciones involucradas en el asunto y de sus cuerpos de investigadores; una iniciativa que debería ser impulsada por el Programa Flora de México, con más de una década de existencia.

### Patrones taxonómicos

Un primer conjunto de patrones pueden detectarse de manera *aespacial*, es decir, circunscritos a la simple numerología de las especies por grupos de organismos y a sus relaciones entre ellos. A éstos podríamos denominarles *patrones taxonómicos*. El primer patrón es el número de especies que existen en México, en relación con el número total descrito para el mundo. Por lo que indican los grupos de organismos mejor conocidos, México parece contener entre un 10 y un 12% del total de la biota del mundo. Este porcentaje se ajusta al caso de las plantas con flores (y entre ellas la familia Leguminosae y las plantas acuáticas), los musgos, los mamíferos, las aves, los reptiles, las abejas y las mariposas. Las dos excepciones que saltan a la vista son el caso de los anfibios y el de los peces marinos, con solo un 7%. Para el caso de las algas marinas, puede esperarse que también se ajuste el patrón, ya que hasta ahora existe un primer listado de 2 000 especies (básicamente macroalgas), que si aumenta en un 50% cuando se le agreguen las microalgas bentónicas y el fitoplancton y otros grupos no estudiados (Novelo, com. personal), darían un total de hasta 3 000 especies. Esta cifra representaría algo más del 10% del total de

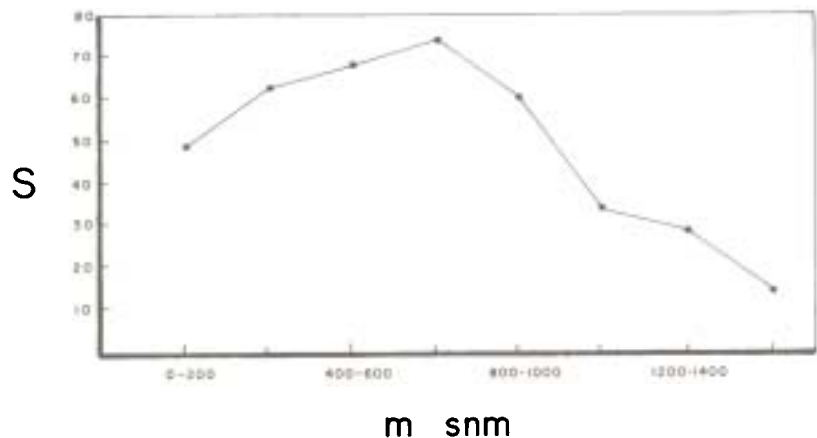


Figura 4. Número de especies de aves en relación con la altitud en la región de Los Tuxtlas, Veracruz. Elaborada a partir de los datos de Andrie (1967).







interés el estudio comparativo de los patrones geográficos entre grupos diferentes de organismos. Por ejemplo Fa & Morales (1993:351) encuentran similitudes entre las provincias bióticas que resultan del análisis de aves, mamíferos, reptiles y anfibios. Y en la perspectiva geopolítica las evidencias provenientes de diferentes grupos indican que Oaxaca, Chiapas y Veracruz son los estados más ricos de la república (figura 2). Sin embargo el estudio de las anomalías o singularidades en la distribución geográfica de las especies un aspecto, es el que se antoja fascinante. En efecto, la ubicación latitudinal de la república mexicana, su compleja fisiografía y climatología y su historia particular, hacen de México un escenario *sui generis*. Por ejemplo, el patrón latitudinal que establece un aumento progresivo de especies hacia el ecuador y que parece ser de carácter universal entre los macroorganismos (Brown, 1988), no siempre se ajusta al caso de México, ya que se presenta una muy desusada riqueza de especies entre los 19 y 20° de latitud norte, debido al del Eje Neovolcánico Transversal. Este fenómeno ha sido señalado por diversos autores (Halffter, 1964; Rzedowski, 1978; J. R. Delgadillo, 1987 y especialmente Fa, 1989) en el estudio de grupos, tales como los insectos, las plantas, los musgos y los mamíferos. De manera similar, el patrón de disminución de especies, conforme aumenta la altitud, se ve modificado por la enorme riqueza del bosque mesófilo de montaña, una comunidad vegetal que se distribuye entre los 900 y 2 000 msnm y que es el sitio de encuentro entre las especies neárticas y neotropicales. Este fenómeno, que fue sugerido desde principios del siglo por Gadow (1907-1909), parece operar no solo entre las especies de plantas (figura 3), sino entre algunos grupos animales, como las aves (figura 4). Finalmente, el incremento de especies de plantas, conforme aumenta la humedad, que ha sido un patrón postu-

lado por Gentry (1988 y 1992) basándose en estudios realizados en las zonas tropicales de los tres continentes, parece ser un patrón que no opera en México, ni en la escala de grandes áreas

(Rzedowski, 1993), ni sobre la comparación de sitios específicos (Toledo, 1982). En ambos casos parecen tener mayor importancia los sucesos de tipo histórico.

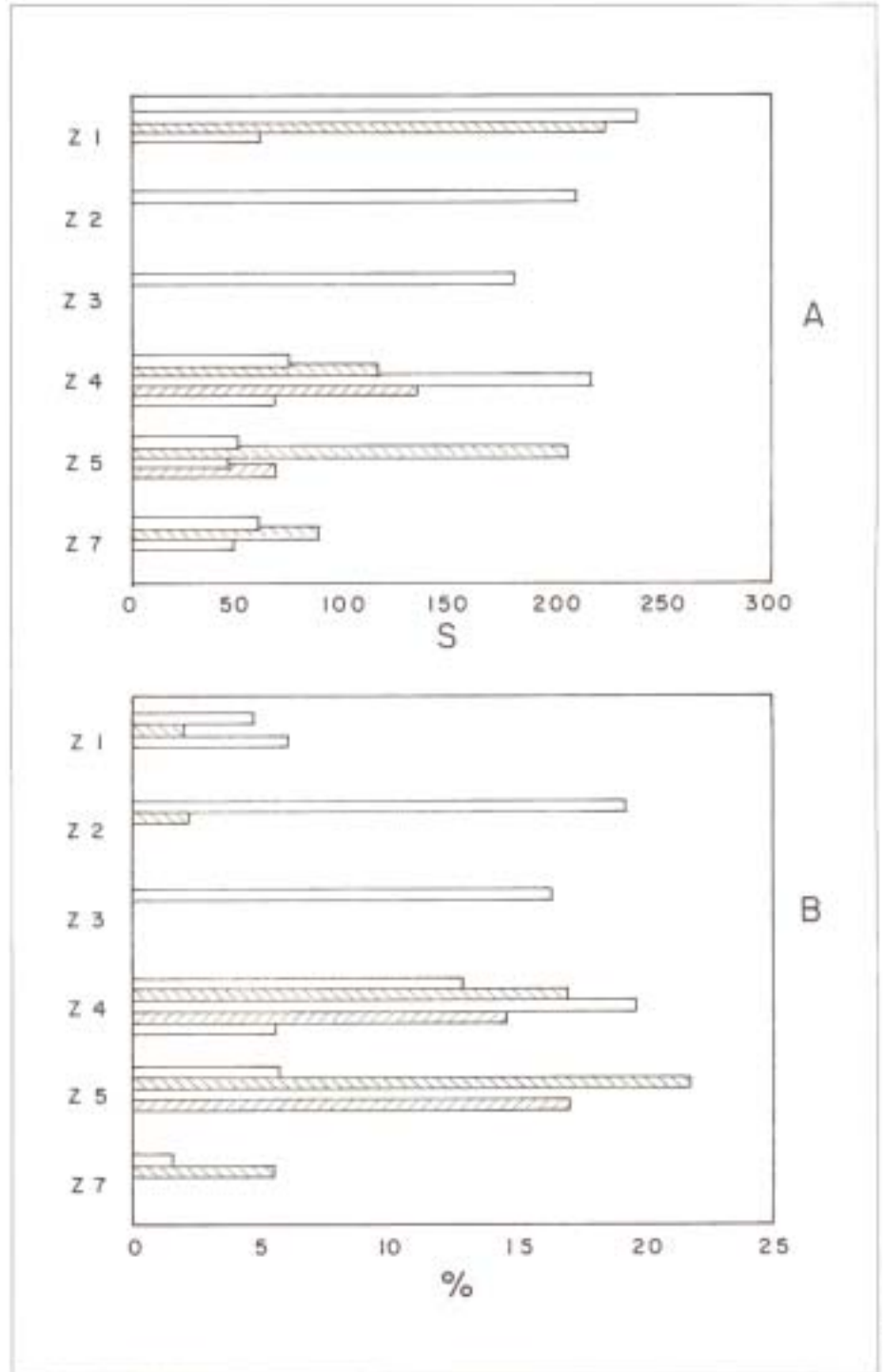


Figura 6. Riqueza de especie(s), porcentaje de especies endémicas de aves por tipo de hábitat. Z1: trópico húmedo; Z2: Trópico subhúmedo; Z3. Templado húmedo; Z4: Templado subhúmedo; Z5: Árido y semiárido; Z7: Aguas continentales. Las barras corresponden a tipos de vegetación dentro de cada hábitat. Elaborada a partir de los datos de Escalante *et. al.* 1993.

**II. La dimensión ecológica:**  
**Patrones espaciales**

De enorme importancia estratégica es el distinguir entre los patrones de la biodiversidad en el espacio, tomado de manera ecológicamente abstracta (apartado anterior), y el espacio conceptualizado como un conjunto de unidades ecológi-

cas discretas (las comunidades de organismos y su entorno abiótico). Podría decirse que en este último, el observador enfoca su objeto para distinguir con precisión el conjunto de especies representado por la comunidad biótica y su entorno no vivo, que media entre los organismos estudiados y los factores del medio físico. Ello nos lleva a reconocer

el concepto de *hábitat*, y a todo espacio (terrestre o acuático), como un conjunto de hábitats. Por lo tanto, los patrones de diversidad se exploran, ya no solo en función del área de la especie (es decir su distribución geográfica), sino de su presencia o ausencia en los hábitats distinguidos en el espacio. En sentido estricto, los criterios que se requieren para definir un hábitat, se establecen basándose en la naturaleza específica de los organismos que están bajo estudio. Las características y dimensión del hábitat son diferentes para, por ejemplo, los vertebrados o las especies de árboles, que para los insectos, las algas o los moluscos. Por ello habría que formular un sistema jerárquico de hábitats en función de la escala. Sin embargo, parece lógico pensar que, en una primera instancia, el espacio puede ser dividido en grandes macro (¿mega?) hábitats y que los (meso y micro) hábitats incluidos en ellos representan subconjuntos de los primeros; es decir que son variaciones dentro de intervalos mayores.

Los hábitats terrestres también son definidos de manera diferente a los acuáticos, y dentro de estos últimos habría que distinguir entre los de las aguas continentales y los marinos. Por ejemplo, mientras que en la porción terrestre, para la casi totalidad de los organismos, el espacio es de carácter bidimensional, en el medio acuático los organismos nadadores (*nekton*) se mueven en tres dimensiones.

De acuerdo con lo anterior, la búsqueda de patrones ecológicos de la biodiversidad en el espacio requiere de la delimitación de los hábitats terrestres y acuáticos. En efecto, sólo mediante el manejo común de una tipología de hábitats será posible explorar patrones generales del comportamiento, de la biodiversidad de diferentes grupos. En el caso de la porción terrestre, existe una franca tendencia a reconocer en el clima y la vegetación, los dos criterios centrales para poder definir los grandes hábitats. De esta forma, varios autores

SUPERFICIE MUESTREADA	ÁRBOLES	TOTAL DE PLANTAS
<b>1 000 m<sup>2</sup></b>		
a Los Tuxtlas		109
<b>2 000 m<sup>2</sup></b>	p = 48.8	
1 Misantla, Ver	33	—
2 Tuxtepec, Oax	42	—
3 Tuxtepec, Oax	40	—
4 Tuxtepec, Oax	42	—
5 Los Tuxtlas, Ver	39	—
6 Coatzacoalcos, Ver	37	—
7 Coatzacoalcos, Ver	36	—
8 Coatzacoalcos, Ver	27	—
9 Pichucalco, Chis	58	—
10 Pichucalco, Chis	54	—
11 Lacandona, Chis	94	—
12 Lacandona, Chis	86	—
<b>1 ha</b>	p=121	
A Tuxtepec, Oax	103	—
B Tuxtepec, Oax	117	—
C Los Tuxtlas, Ver	107	—
D Huimanguillo, Tab	101	—
E Bonampak, Chis	156	267
F Chajul, Chis	143	—
<b>Regiones</b>		
I Tuxtepec, Oax	—	737
II Los Tuxtlas, Ver (400-500 has ?)	210	816
III Uxpanapa, Ver (1 200 has ?)	230	814
IV La Lacandona	—	1 670
V Sian Ka'an	—	558
<b>Total</b>	<b>690</b>	<b>3 100</b>

Cuadro 2. Número de especies de plantas fanerógamas y de árboles registrado en diferentes escalas espaciales en el trópico húmedo de México.  
Fuentes: Gentry (1982); Meave del Castillo (1986); Toledo (1982) y datos inéditos



han dividido el territorio nacional basándose en estos criterios, durante el estudio de la cultura (West, 1964), la flora (Rzedowski, 1978), la fauna de vertebrados (Flores & Gerez, 1989), los "ecosistemas" (Pérez-Gil, *et al.*, 1984), la producción de alimentos (Toledo, *et al.*, 1985) y la producción rural (Toledo, *et al.* 1989). Siguiendo esta corriente, Toledo & Ordoñez (1993) han propuesto una división del territorio en 7 hábitats principales (o zonas ecológicas), a través de la cual es posible reconocer grandes unidades ambientales en el espacio. Esta tipología se basa en el agrupamiento de varios tipos de vegetación bajo criterios fisionómicos y biogeográficos y en sus relaciones con los principales tipos de clima (véase García, 1989), y coincide en lo general, con la realizada por otros autores (Rzedowski, 1993; Flores, 1993). Por sus dimensiones, estos hábitats terrestres resultan equivalentes a los conceptos de *región natural* o *bioma*, utilizados por otros autores.

La figura 5 muestra la manera como estos hábitats son definidos y cómo se distribuyen a través de la república mexicana. Veamos ahora cómo se comporta la biodiversidad en estos grandes hábitats analizando dos grupos bien conocidos de organismos: la flora fanerogámica (siguiendo las estimaciones de Rzedowski, 1993) y las aves (de acuerdo con Escalante *et al.* 1993). En el caso de la flora, la mayor riqueza de especies se encuentra en el hábitat templado subhúmedo (zona 4), esto es, con bosques de pino-encino, seguido del hábitat árido y semiárido (zona 5) y el trópico subhúmedo (zona 2). Si evaluamos la riqueza relativa (número de especies por unidad de superficie), el hábitat templado húmedo (zona 3) queda en primer sitio: 3 000 especies de plantas en solo el

1% del territorio del país. La misma situación se presenta en el caso de la riqueza en endemismos, con la salvedad de que el hábitat árido y semiárido se coloca en segundo sitio (con unas 3 600 especies endémicas). Esta primera aproximación revela patrones interesantes, entre los que destaca la menor riqueza global (es decir en su diversidad delta, véase la sección siguiente) del trópico húmedo, un hábitat que ha sido privilegiado a nivel mundial, en lo que respecta a su diversidad alfa —o de sitios específicos— (véase un reclamo similar en Redford, *et al.* 1990). Este fenómeno requiere de una explicación convincente, la cual se encuentra ligada a la situación de insularidad, contigüidad, tamaño y forma de las áreas que conforman cada hábitat dentro del territorio mexicano. Para el caso de las aves (figura 6), existen patrones diferentes a los encontrados en las plantas. Por ejemplo, la mayor riqueza de especies se localiza en el hábitat tropical húmedo, seguido muy de cerca por el hábitat (4) templado subhúmedo y por el hábitat (3) tropical subhúmedo. El tercer rango lo comparten la zona (5) árida y semiárida y el hábitat (3) templado húmedo. Sin embargo, en el porcentaje de endemismos, la avifauna de México se comporta



Foto: Fulvio Eccardi



de manera muy similar al caso de la flora. Las especies endémicas se encuentran en la zona árida y semiárida, seguido de los hábitats templado subhúmedo y tropical subhúmedo. De nuevo, como sucede con las plantas, en el trópico húmedo se presenta un bajo porcentaje de endemismos. Se deberían realizar comparaciones de este tipo, una vez que se cuente con la información de otros grupos, lo que permitirá detectar los factores que determinan la biodiversidad del país sobre una escala amplia.

La dimensión ecológica de la biodiversidad no se restringe, por supuesto, a la sola búsqueda de patrones en relación con los hábitats, sino que existe también una perspectiva que está muy relacionada con el papel que juegan los conjuntos de organismos en el entramado ecosistémico (di Castri & Younes, 1990). Por ejemplo, ¿cuál es el papel funcional de la biodiversidad en relación con la viabilidad y reproducción de los ecosistemas terrestres y acuáticos? La relación de la biodiversidad con el funcionamiento ecosistémico la determina el tipo de organismos (con un énfasis en el papel de los microorganismos); la función de ciertas especies (*keystone species*) dominantes o claves, o grupos de éstas; el nivel de redundancia funcional de las especies; su papel en las cadenas tróficas, etc. El estudio de estos aspectos no es por supuesto una tarea nada fácil, ya que depende del grado de conocimiento fino que se tenga de la ecología de poblaciones de las especies y del conjunto biótico. Por ello resulta conveniente la propuesta de Field y Vázquez-Yanes, de estudiar "sistemas modelos", en vez de intentar un análisis completo de todas las especies que contribuyen a la diversidad funcional del ecosistema. Para ello, dichos autores ofrecen un ejemplo en el análisis de las especies de *Piper*, en una comunidad tropical húmeda de México (Los Tuxtlas, Veracruz). Finalmente, la biodiversidad se encuentra ligada, de alguna forma, a la heterogeneidad o variedad ambiental o paisajística, y este aspecto constituye



Foto: Fulvio Eccardi

otra dimensión que debe estudiarse en el futuro.

### III. El efecto de la escala: Patrones espaciales

Como es de esperarse, los valores de la diversidad biológica están fuertemente relacionados con la escala espacial en la que se realiza la muestra. La diversidad se incrementa, por supuesto, en la medida que se aumenta el tamaño de la muestra. Sin embargo, surge una interrogante crucial que es, cómo varía la tasa de incremento de especies en las diferentes escalas del espacio (tanto terrestre como acuático), y si existen patrones de escala en función del grupo de organismos estudiado. Hasta la fecha, la única distinción espacial de la diversidad de las especies, que se ha empleado y que tiende a reproducirse como un dogma en todos los estudios sobre el tema, es la propuesta por Mac Arthur hace casi tres décadas, que más tarde desarrolló Whittaker. La diferenciación espacial que allí se propone diferencia entre la *diversidad alfa* (o dentro de un hábitat) en áreas que por lo general no sobrepasan la hectárea; la *diversidad beta* (o entre hábitats), que es el resultado de la comparación de la diversidad alfa en-

contrada en diferentes situaciones; la *diversidad gama*, que se refiere a la encontrada en regiones o paisajes; y la *diversidad delta* que registra la heterogeneidad regional.

Shmida y Wilson (1985), han hecho notar que las tres primeras dimensiones de la diversidad coinciden con los enfoques que respectivamente hacen la ecología (o biología) de poblaciones, la fitosociología y la biogeografía clásica. Nuevamente todo esto queda dentro de una dimensión espacial, exclusivamente terrestre (lo cual deja a los medios acuáticos como áreas casi vírgenes para probar este tipo de enfoques). El reto actual, cuando los investigadores cuentan con nuevas tecnologías (como la que encierran los Sistemas de Información Geográfica) y más información sobre la distribución espacial de las especies, es el de poner a prueba esta categorización espacial que es la que se ha venido utilizando. Una contribución importante para la comprensión teórica de los diferentes factores que inciden a cada escala espacial, es la de Schmida y Wilson. En México, esta exploración permitirá precisar las aportaciones que hace cada escala espacial a su biodiversidad total.

Más allá de la fascinación teórica que encierra, los efectos de la escala espacial

sobre la riqueza de especies, adquiere una importancia práctica, en términos de la definición de las áreas requeridas para conservar conjuntos de especies, aspecto que está siendo explorado con detalle en la región Amazónica (Lovejoy, *et al.*, 1986), y que a su vez, permitirá diseñar con más confiabilidad algunas estrategias de conservación, basadas en las redes de reservas de diferentes tamaños y con distintas ubicaciones, lo que en sí es un aspecto crucial, ya sea en una escala nacional o en la *megadiversidad*. Dentro de esta perspectiva, los conocimientos acumulados en México sobre algunos grupos de organismos (especialmente vertebrados terrestres y plantas) resultan de enorme interés para comenzar a evaluar estos posibles patrones. Aquí de nuevo la complejidad paisajística del país opera como un laboratorio natural, casi único. Tomemos como ejemplo la diversidad de la flora del trópico húmedo (es decir las especies de plantas de las selvas altas-medianas perennifolias y subperennifolias, o lo que Rzedowski llama el bosque tropical perennifolio). De acuerdo con Rzedowski, la riqueza estimada de esta flora en el país es de 5 000 especies. Un banco de información elaborado durante los últimos años por el autor y por sus colaboradores, registra un total de 3 100 especies, cifra que se obtiene al acumular las especies registradas en cinco regiones estratégicas del país. A nivel regional (es decir en áreas que oscilan entre 500 y algunos miles de hectáreas), la riqueza de especies varía (dependiendo de la ubicación geográfica), entre 800 y 1 600 (cuadro 2). Por otro lado, de las 3 100 especies, un poco más de 2 000 son "exclusivas" y sólo 1 000 son comunes a dos o más sitios. Lo anterior significa que, con la preservación de 5 áreas regionales de unas mil hectáreas cada una, ¡se estaría protegiendo el 60% del total estimado de la flora tropical húmeda del país! La ausencia de datos a escalas más finas impide que se puedan realizar otras apreciaciones, aunque en una sola hectárea

se encuentran 267 especies (sin incluir epífitas) y en 1 000 m<sup>2</sup> más de 100 especies. La misma exploración, esta vez con los árboles (Cuadro 2) revela que una tercera parte del total de especies arbóreas registradas (690) pueden hallarse a escala regional y una sexta parte en muestras de ¡solo una hectárea! Finalmente 2000 m<sup>2</sup> parecen contener la mitad de las especies de árboles que se encuentran en una hectárea. Los resultados de los estudios que se realizaron

entre otros grupos de organismos del trópico húmedo, también sugieren algunos patrones. Por ejemplo, bastan unas 500 has para tener la representación de la mayor parte de la diversidad de aves de una selva tropical (véase el caso de Los Tuxtlas, con 315 especies en Coates-Estrada y Estrada, 1985), y un solo sitio de La Lacandona (Chajul), contiene el 90% de las mariposas del trópico húmedo de México (543 especies, véase De la Maza y De la Maza, 1985). Estos posibles

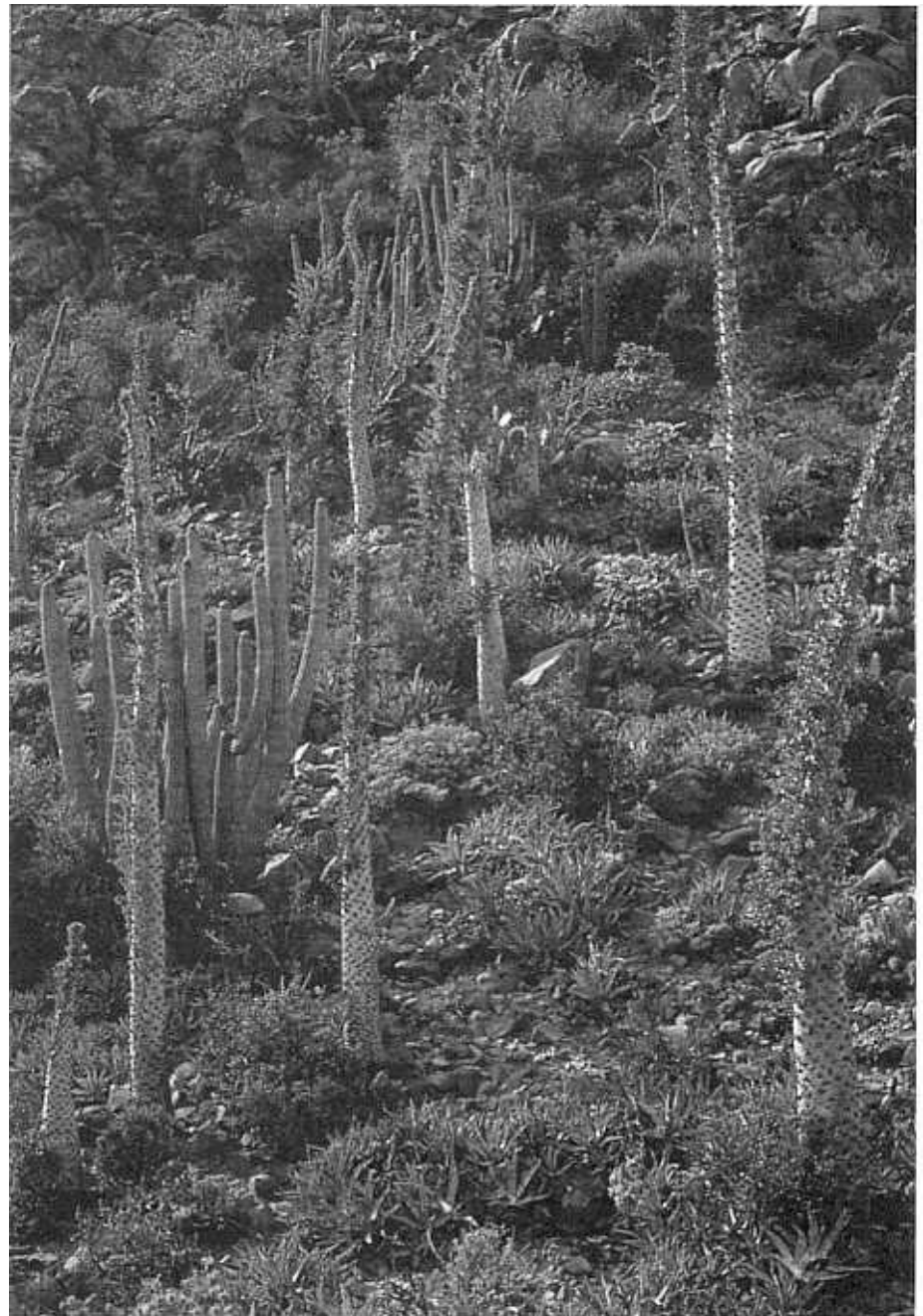


Foto: Fulvio Eccardi





Foto: Fulvio Eccardi

patrones, por simples que parezcan, adquieren la jerarquía de criterios cuando se van a tomar decisiones que conciernen a la conservación y uso de la biodiversidad.

#### Patrones de la destrucción: factores que afectan los escenarios de la biodiversidad

Hasta ahora hemos examinado los posibles patrones de la biodiversidad, bajo el supuesto de que estos existen en condiciones donde la perturbación humana es nula. Por desgracia esta situación se está volviendo cada vez más hipotética. Hasta la fecha, el sistema de parques nacionales, y otras áreas protegidas, se extiende por sólo algo más del 3% de la superficie terrestre del planeta, mientras que se estima que el 95% de la porción terrestre está ocupada por áreas agropecuarias, forestales y para asentamientos humanos (Pimentel *et al.*, 1992). Por lo tanto, estamos obligados a encarar el conjunto de factores extra-biológicos que determinan la existencia de los organismos, los cuales se encuentran bajo el asedio de las sociedades humanas y viviendo una suerte de "juego existencial". La afectación (gradual o catastrófica) de los hábitats naturales y de otras formas de extinción de especies, es pues un tema que tam-

bién debe ser analizado. Ello nos obliga a ubicar y entender los *patrones de la destrucción*, es decir, el conjunto de factores sociales, económicos, demográficos, culturales, etc., que provocan la desaparición individual o masiva de las especies. Dado que la extinción y/o desaparición de las especies vegetales y animales tiene como causa principal la destrucción de los hábitats naturales; toda política dirigida a mantener la biodiversidad requiere de información precisa y confiable acerca de los procesos de transformación de los hábitats; sus causas, características, tendencias y proyecciones. Por lo común, la transformación de los hábitats naturales se provoca por el establecimiento de diversos fenómenos de carácter social, cultural y económico, tales como el incremento y la expansión de los núcleos humanos, los diferentes modos de percibir y utilizar los recursos naturales, o la expansión de la producción rural (agropecuaria, forestal, pesquera, extractiva) y sus efectos (por ejemplo, incendios forestales, contaminación por agroquímicos, fragmentación de masas de vegetación, etc.).

En el caso de México, país en el que existe una fuerte presión sobre la flora y la fauna, el análisis de los factores extra-biológicos que afectan la biodiversidad,

es una tarea no solo necesaria sino urgente. Sólo habría que señalar que México ocupa el tercer sitio en las tasas actuales de deforestación, en el mundo, con una superficie anual estimada de 800 000 has deforestadas (Massera, *et al.* 1992). Aquí de nuevo es necesario generar modelos de carácter multi-causal de los fenómenos destructivos (por ejemplo, la deforestación, véase Rotmans y Swart, 1991; Toledo, 1992).

Las dos fuentes principales de información para la construcción de estos modelos son: 1. Los acervos de información estadística o censal, que, a su vez, son el resultado de encuestas levantadas en el terreno, y que proporcionan información acerca de fenómenos demográficos, productivos, culturales, de tenencia de la tierra, de uso de energía, etc. 2. Las imágenes obtenidas de sistemas de percepción remota (satélites, fotografías aéreas, videos), y que ofrecen datos, a diferentes escalas espaciales, sobre los recursos naturales (vegetación, suelos, geología, topografía, hidrología, etc.) El modo más adecuado y eficaz, para el manejo integrado de estos datos son los llamados *Sistemas de Información Geográfica (SIG)*. Un SIG, "...es un conjunto de programas y equipos de computación que permite el acopio, manipulación y transformación de datos espaciales (mapas, imágenes de satélite) y no espaciales (atributos) provenientes de varias fuentes..." El objetivo de un SIG es el de contribuir con información para la toma de decisiones y puede considerarse como una fuente para la conformación de sistemas expertos" (Bocco, *et al.* 1991:81). Estos sistemas, sin embargo, deben ser re-conceptualizados desde una perspectiva ecológica, de tal suerte que sea posible la geo-referenciación de los factores socio-económicos, en términos de los hábitats, que son los "escenarios teatrales" de la bio-diversidad. Como es de esperarse, existe toda una gama de diagnósticos que pueden realizarse a través de estos sistemas. Habría que distinguir por lo menos dos tipos de diagnósticos: a. Los



de carácter *sincrónico*, es decir, que ofrecen análisis para un tiempo determinado (por ejemplo el presente); b. Los que analizan a través del tiempo y que permiten descubrir procesos *diacrónicos* o históricos (por ejemplo las tendencias en la deforestación de una cierta área), mediante el empleo de imágenes y datos (por ejemplo, censales) de diferentes épocas. En otra perspectiva también pueden plantearse modelos de carácter predictivo que buscarían realizar exámenes del futuro.

Finalmente hay que destacar la gran variedad de correlaciones que pueden realizarse a través de estos sistemas. Por ejemplo el grado de afectación de los hábitats (medido mediante algún parámetro, como la deforestación) en relación a factores tales como los sistemas de producción agropecuaria, número de asentamientos del sector social (ejidos y comunidades indígenas), población indígena, o uso de energía. Estas correlaciones, a su vez, presentan variaciones o matices en dos de sus dimensiones: 1. Las diferentes zonas ecológicas del país (pues por ejemplo, una misma correlación es diferente si se da en el trópico húmedo o en las áreas desérticas); 2. Las diferentes escalas espaciales (es decir desde el nivel sub-municipal hasta el nacional). Todo lo cual ofrece una gran variedad de criterios que pueden ser usados para planear la conservación y/o el uso de ciertos hábitats que estén en íntima relación con su importancia biológica (medida a través de la riqueza, el grado de endemismo, etc.) o bio-económica (el valor económico real o potencial de la flora y/o fauna involucrada). De manera similar, tales diagnósticos serían de enorme utilidad para establecer una política nacional de prioridades y limitaciones, tanto en el terreno de la producción rural, como en el de los asentamientos humanos y aun en el de las comunicaciones (carreteras, vías férreas, caminos rurales, etc.). Actualmente está por iniciarse un proyecto de esta naturaleza está por iniciarse en la CONABIO, en



Foto: Fulvio Eccardi

el que se tiene, como punto de partida, la regionalización ecológica del país realizada por Toledo, *et al.* (1989), a nivel municipal, el que se llevó a cabo basándose en criterios climáticos, biogeográficos y de vegetación (vease una argumentación teórica de esta propuesta en Toledo y Ordóñez, 1992). El esfuerzo, sin embargo, tendrá que ser colectivo, es decir, tendrá que basarse en una red nacional de bancos de información, a la que concurren, por igual, grupos de investigadores e instituciones regionales. Finalmente el reto mayor es, de nuevo, el diseño de sistemas similares para los hábitats acuáticos y, especialmente, para los marinos. Esto supone tanto una propuesta de regionalización a diferentes escalas del espacio acuático, como el modelado de los factores que afectan a los organismos.

#### Agradecimientos

En la elaboración de este ensayo recibí oportunos apoyos de Ana Batis y Alejandro Torres en la búsqueda de información. Agradezco también a Carlos Vázquez-Yanes, John Fa, Claudio Delgadillo, Jorge Soberón, Victoria Sosa, Jorge González, Jorge Llorente, César Carrillo, Betty J. Meggers, Francisco Díaz-Pineda y

Ma de Jesús Ordóñez, por haberme facilitado materiales inéditos o de difícil acceso. La elaboración de varios cuadros y figuras fue posible gracias a la asistencia técnica de Leni Cortés. ●

#### Referencias

- Ayala, R., T.R. Griswold y S.H. Bullock, 1993, "The native bees of Mexico", En: Ramamoorthy, T.P., *et al.* 1993.
- Bocco, G., J.L. Palacio y C. Valenzuela, 1991, Integración de la percepción remota y los sistemas de información geográfica, *Ciencia y Desarrollo* 97:79-88
- Brown, J.H., 1988, "Species Diversity". En: Myers, A.A., P.S.Giller (Eds). *Analytical Biogeography*. Chapman and Hall Eds. :57-90
- Cabrera, L. y J.L. Villaseñor, 1987, "Revisión bibliográfica sobre el conocimiento de la familia Compositae en México", *Biótica* 12:131-141
- Campbell, D.G., 1988, "The importance of floristic inventory in the tropics", En: D.G. Campbell & H.D. Hammond (eds), *Floristic Inventory of Tropical Countries*. New York Bot. Garden
- Coates-Estrada, R. y A. Estrada, 1985, *Lista de las Aves de la Estación de Biología de Los Tuxtlas*, Instituto de Biología, UNAM.
- Delgadillo, C., 1987, "Moss distribution and the phytogeographical significance of the Neovolcanic Belt of Mexico", *Jour. Biogeography* 14: 69-78
- Delgadillo, C., 1990, "Advances in Mexican Bryology", *Tropical Bryology* 2:49-52
- Delgadillo C., 1993, "Diversity in the Mexican Bryoflora", En: Ramamoorthy, T.P. *et al.* (Eds):365-377.