

Identificación de sitios prioritarios para la conservación de corales formadores de arrecife en el estado de Oaxaca, México

Identification of priority conservation sites for reef building corals in Oaxaca State, Mexico

Ramón Andrés López Pérez¹
y Armando López García²

¹Instituto de Recursos, Universidad del Mar. Ciudad Universitaria, A.P 47. Puerto Ángel, Oax., 70902. México

²Programa de Postgrado, Universidad del Mar. Ciudad Universitaria, Puerto Ángel, Oax.

e-mail: alopez@angel.umar.mx

López Pérez R. A. y A. López García 2008. Identificación de sitios prioritarios para la conservación de corales formadores de arrecife en el estado de Oaxaca, México. *Hidrobiológica* 18 (3): 239-250.

RESUMEN

Los arrecifes coralinos a nivel mundial presentan una tasa de desaparición acelerada, por lo que es necesario contrarrestar esta tendencia. Con el propósito de identificar áreas prioritarias para conservación de corales en la costa de Oaxaca y, comparar el diseño sugerido por las técnicas empleadas con el diseño del Parque Nacional Huatulco (PNH), se analizó una base de datos basados en la presencia/ausencia de corales, se determinó la diversidad taxonómica, identificación de hotspots, algoritmos de complementariedad y selección al azar. Los resultados demuestran que no existe concordancia entre los métodos empleados. Las mejores técnicas fueron las de complementariedad, seguidas por la identificación de hotspots y la selección de sitios al azar. De los diez primeros sitios considerados prioritarios, sólo dos se encuentran en el PNH. Considerando el número de especies protegidas por el PNH (62.5 %), su diseño es sub-óptimo en tanto que: a) no incluye al 100 % de las especies, b) excluye poblaciones necesarias para mantener la conectividad entre sistemas arrecifales en el Pacífico americano y c) incluye sitios innecesarios de acuerdo al principio de complementariedad. La inclusión de La Entrega e Isla Montosa en el PNH incrementaría a 93% el número de especies protegidas. El estudio, además de sugerir sitios prioritarios de conservación en Oaxaca, pretende estimular la investigación en el diseño de áreas marinas protegidas (AMP) en el país con el fin último de diseñar una red de AMP que permita un mejor manejo de los arrecifes en México.

Palabras clave: Selección de reservas, áreas marinas protegidas, conservación, corales, Pacífico mexicano.

ABSTRACT

Coral reefs worldwide are being destroyed at an alarming rate, therefore it is necessary to overcome the current trend. In order to identify coral-reef conservation areas in the coast of Oaxaca and compare the design suggested by these methods against the one currently proposed by the Parque Nacional Huatulco (PNH). A presence/absence coral-reefs data base was analyzed by taxonomic diversity, hotspot analysis, complementarity algorithms, and random accumulation of reserve sites. There was a lack of concordance between the reserve-selection approaches employed. Cumulative species-site curves indicated that complementarity maximized the rate of accumulation of species, followed by the hotspot and the random accumulation approaches. Just two out of ten sites with conservation priority value, are protected by the PNH. Considering the number of species already protected by the PNH (62.5 %), its design

is sub-optimal since: a) it does not include 100 % of the species, b) populations of species necessary to maintain connectivity between eastern Pacific reef systems are excluded, and c) it includes redundant unnecessary sites under the complementarity principle. Besides suggesting coral-reef conservation areas for the coast of Oaxaca, this study aims to encourage research on the design of marine protected areas (MPA) in order to establish a network of MPA which would allow a sustainable management of Mexican reefs.

Key words: Reserve selection, marine protected areas, conservation, corals, Mexican Pacific.

INTRODUCCIÓN

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) tienen como objetivo preservar la biodiversidad, la disminución de la tasa de extinción y asegurar la sustentabilidad (Chape *et al.* 2005). El sólo establecimiento de una ANP, sin embargo, es insuficiente para garantizar el cumplimiento de los objetivos fundamentales, para ello se requiere: a) apoyo gubernamental, b) asesoramiento técnico, c) objetivos de conservación acertados y d) fuerte participación social (Crossman *et al.* 2007). Cuando en alguna medida éstos elementos son cubiertos, el establecimiento de ANP's es el método de conservación *in situ* más efectivo para detener la degradación y desaparición del ecosistema y detener la pérdida de la biodiversidad (Hyrenbach *et al.* 2000; Margules & Pressey 2000; Agardy *et al.* 2003; Graham *et al.* 2003; Briggs 2005).

En países desarrollados, la selección de áreas marinas protegidas (AMP's) se lleva a cabo mediante un proceso multi-disciplinario en donde se incluyen aspectos como distancia entre sitios (Moilanen 2005; Fuller *et al.* 2006; Wagner *et al.* 2007), abundancia de las poblaciones, patrón de corrientes, viabilidad de las larvas y límites ecológicos (Van Woesik 2000; Tole 2006), tamaño de la reserva (Conolly *et al.* 2005; Epstein *et al.* 2005), estado de conservación y funcionalidad del ecosistema (Kremen *et al.* 1999; Salomón *et al.* 2006). De igual manera, se consideran aspectos como costo de adquisición y manejo (Bhat 2003), así como las condiciones socio-políticas del área (Strange *et al.* 2006). Sin embargo, en países como México, son evidentes las carencias en el diseño y planeación de las AMP's, en donde se han omitido los criterios biológicos necesarios para el cumplimiento de sus objetivos fundamentales (Galindo-Leal 1998; Cantú *et al.* 2004). Históricamente, la selección de sitios para reservas naturales en México ha sido oportunista y ha dependido de: a) la disponibilidad (e.g., áreas de difícil acceso y/o bajo valor), b) las coyunturas o circunstancias políticas particulares, c) la existencia de especies carismáticas y d) la buena voluntad local (Benítez & Loa, 1996). La selección de sitios de conservación prioritarios bajo estas circunstancias, independientemente del éxito del programa de manejo, ocasiona que las reservas naturales no cumplan con el objetivo para el que fueron creadas (Prendergast *et al.* 1999; Duarte 2000).

Desde la década de 1980 se han desarrollado algoritmos encaminados a ayudar en la selección de áreas prioritarias para

la conservación de la diversidad biológica. Los algoritmos más utilizados han sido aquellos que identifican hotspots (áreas de riqueza de especies relevantes) o aquellos que seleccionan áreas siguiendo el criterio de complementariedad. La implementación de las técnicas referidas ha demostrado ser útil aún en regiones pobremente conocidas donde sólo se cuenta con información referente a la presencia o ausencia de especies (Margules *et al.* 1988; Pressey & Nicholls 1989; Vane-Wright *et al.* 1991; Myers 1990; Kirkpatrick 1993; Prendergast *et al.* 1993; Pressey *et al.* 1993; Camm *et al.* 1996; Pressey *et al.* 1996; Williams *et al.* 1996; Csuti *et al.* 1997). Estos métodos se han utilizado en el diseño de reservas terrestres en México (Peterson *et al.* 2000; Bojorquez-Tapia 2004; Bolland *et al.* 2006; Ericsson 2006; Fuller *et al.* 2006). Sin embargo, a excepción del trabajo realizado por Sala *et al.* (2002) para el Golfo de California, su aplicación en la selección de ambientes marinos de conservación en México ha sido nula.

A pesar de su belleza y biodiversidad, los arrecifes coralinos son uno de los ecosistemas con mayor riesgo de desaparecer. A nivel mundial, 20% de los arrecifes han sido completamente destruidos y no muestran signos inmediatos de recuperación, 24% de los arrecifes están bajo inminente riesgo de colapso y 26% presentan riesgo de colapso a largo plazo (Reyes-Bonilla *et al.* 2002a; Wilkinson 2004). No existen estudios sobre el grado de deterioro de los arrecifes en México, no obstante existen estudios puntuales de mortalidad asociada a fenómenos naturales en el Pacífico mexicano (Glynn & Leyte-Morales 1997; López-Pérez *et al.* 2002; Reyes-Bonilla *et al.* 2002b), desaparición de arrecifes en el Golfo de México en respuesta a la histórica presión de poblaciones humanas (Jordan-Dahlgren & Rodríguez-Martínez 2003; Chávez *et al.* 2007; Horta-Puga 2007), además de aquellos asociados al desarrollo costero de sitios turísticos en el Caribe (Jordan-Dahlgren & Rodríguez-Martínez 2003) y Pacífico mexicano (Leyte-Morales 2000; López-Pérez & Hernández-Ballesteros 2004). Ante esta situación, es importante identificar sitios prioritarios de conservación y establecer una red de ANP marinas para el mantenimiento de los arrecifes coralinos en México.

Se usó el sistema arrecifal de la costa de Oaxaca debido a que se tiene un conocimiento relativamente detallado acerca de la ubicación y diversidad coralina en el estado (Reyes-Bonilla *et al.* 2005). En Oaxaca se tienen identificados 28 sitios en donde se ha reportado la presencia de 17 especies de corales pétreos

(Glynn & Leyte-Morales 1997; Reyes-Bonilla *et al.* 2005; Fig. 1). En términos de extensión y grado de desarrollo, los arrecifes de la zona podrían ser considerados como los más importantes del Pacífico tropical mexicano (Reyes-Bonilla 2003; López-Pérez & Hernández Ballesteros 2004; López-Pérez *et al.* 2007). Desde el punto de vista biogeográfico, la fauna coralina de la región representa la puerta de entrada a México de especies provenientes de Centro América (Ketchum-Mejía & Reyes-Bonilla 1997; Reyes-Bonilla & López-Pérez 1998) lo que hace todavía más urgente la conservación de estos sitios. Finalmente, la zona de Oaxaca posee una ANP marina (Parque Nacional Bahías de Huatulco) que cuenta con un número importante de formaciones coralinas dentro de su polígono de protección. En este sentido, la presente contribución persigue tres fines: a) demostrar la importancia de adoptar criterios de selección de sitios sobre bases biológicas sólidas a partir de información básica (presencia/ausencia de especies), b) comparar el diseño de la porción marina del Parque Nacional Bahías de Huatulco y el sugerido por las técnicas de selección utilizadas y c) sugerir sitios prioritarios de conservación de corales en Oaxaca.

METODOLOGÍA

Base de datos. La base de datos utilizada consiste en los registros de presencia/ausencia de especies de corales hermatípicos de la costa de Oaxaca, construida a partir de trabajo de campo y de la base de datos correspondiente al estado de Oaxaca del Atlas de Corales Pétreos del Pacífico Mexicano (Reyes Bonilla *et al.* 2005), esta se basó en información proveniente de literatura primaria (1,787 registros), colecciones científicas (20 colecciones científicas en México y Estados Unidos de América) y comunicaciones personales de expertos. En los 28 sitios donde se detectó la presencia de corales en el estado de Oaxaca, la temperatura media anual de la superficie del mar fluctúa entre los $28.0^{\circ} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ (Fiedler 1992), considerada entre las más favorables para el desarrollo de los arrecifes coralinos en el Pacífico oriental (López-Pérez & Hernández-Ballesteros 2004).

Análisis de datos. Las técnicas utilizadas fueron seleccionadas debido a que funcionan con información biológica básica (presencia/ausencia de especies), han demostrado ser eficaces tanto en ambientes terrestres como marinos (Sala *et al.* 2002;

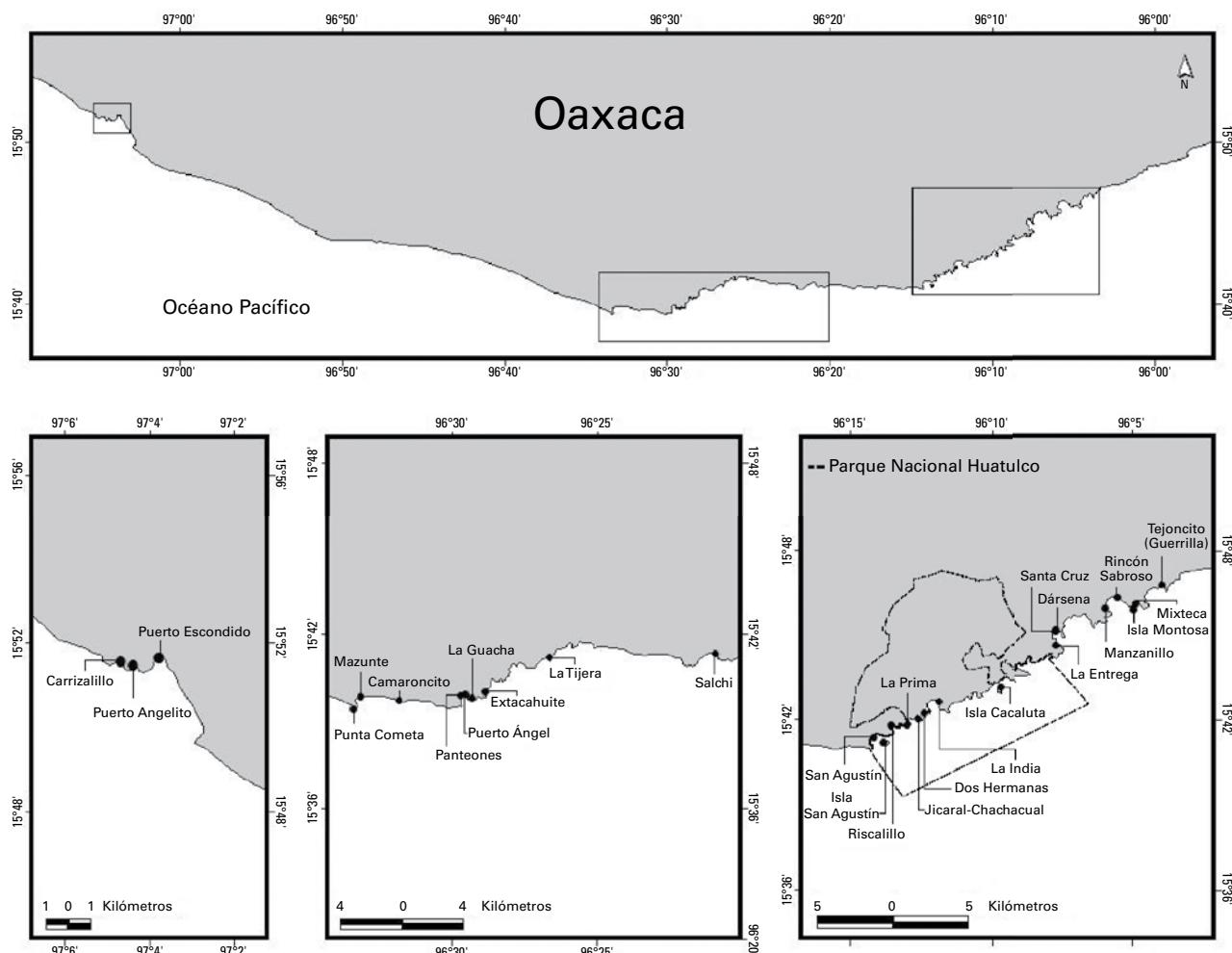


Figura 1. Ubicación geográfica de las áreas coralinas en el estado de Oaxaca. La línea punteada representa el polígono del Parque Nacional Huatulco.

Ericsson 2006; Fuller *et al.* 2006) y han sido utilizadas con éxito en la identificación de zonas coralinas prioritarias de conservación (Beger *et al.* 2003). Se sabe que los algoritmos de complementariedad tienen un mejor desempeño en la selección de sitios de conservación prioritarios (Williams *et al.* 1996; Csuti *et al.* 1997; Beger *et al.* 2003); no obstante, no hubo una selección *a priori* de las técnicas utilizadas, en tanto una de las premisas del estudio es la selección de sitios de conservación prioritarios por concordancias *a posteriori*.

La eficacia de los métodos de selección utilizados fue comparada utilizando curvas de acumulación de especies, en donde se observa el porcentaje acumulado de especies en función del número de sitios. De esta manera la eficacia del método está en función de la representación del total de especies en el menor número de sitios.

Técnicas de selección. Índice de diversidad taxonómica promedio (DTP). El cálculo de la DTP utiliza información acerca del parentesco entre las especies, de manera que entre menos relacionadas estén las especies en un sitio, la diversidad será mayor y viceversa. De manera simple, la DTP representa el promedio de la distancia taxonómica entre pares de individuos en la muestra (Clarke & Warwick 1998). La información básica acerca del parentesco entre las especies se denomina distancia taxonómica y es obtenida a partir del árbol de taxonomía Lineana (Magurran 2005). El cálculo de la DTP se realizó mediante el programa PRIMER v.6 (Clarke & Warwick 2001).

Índice de diversidad taxonómica total (DTT). Al igual que la DTP, la DTT utiliza información acerca del parentesco entre las especies. En este caso, el cálculo de la DTT representa el promedio de la distancia taxonómica de la especie *i* a todas las demás especies, sumado con el promedio de las demás especies (Clarke & Warwick 1998). En general, este índice está relacionado con la riqueza específica (*S*), sin embargo su desempeño en el contexto de la identificación de áreas de mayor biodiversidad es mejor que éste (Magurran 2005). El cálculo de la DTT se realizó mediante el programa PRIMER v.6 (Clarke & Warwick 2001).

Prueba de distinción taxonómica (DT). Fue utilizada para comparar la diversidad taxonómica de cada una de las localidades para con la lista total de especies. La prueba utiliza procesos de aleatorización, durante el proceso se submuestrea repetidamente ($n = 1000$) grupos de especies de tamaño m seleccionados al azar de la lista global, y se construye un intervalo de confianza (95%) con los valores estimados de DT, que se centrarán en la DTP global (Warwick & Clarke 1998). El cálculo de la DT se realizó mediante el programa PRIMER v.6 (Clarke & Warwick 2001).

Hotspots de riqueza (sitios de riqueza relevante). La técnica consiste en seleccionar los sitios en orden descendente de acuerdo a su riqueza absoluta hasta que todos sean incluidos. Si dos o más sitios presentan el mismo valor de riqueza, estos

fueron incluidos en orden aleatorio (Williams *et al.* 1996). Para su cálculo se utilizó el programa de selección de reservas WORLDMAP (Williams 2000).

Hotspots de rareza (sitios de rareza relevante). La técnica consiste en ordenar los sitios de acuerdo a su valor de rareza. Dicho valor se obtiene mediante la sumatoria del inverso del tamaño del intervalo de distribución de las especies. Para su cálculo se utilizó el programa de selección de reservas WORLDMAP (Williams 2000).

Algoritmos de complementariedad de riqueza y de rareza. Estos algoritmos seleccionan el menor número de sitios necesarios para que esté representado el total de especies (riqueza) (Vane-Wright *et al.* 1991; Kirkpatrick 1993) y al menos cada una del total de las especies (rareza) (Williams *et al.* 1996). Para su cálculo se utilizó el programa de selección de reservas WORLDMAP (Williams 2000).

Algoritmo de máxima representación. Mediante este algoritmo se seleccionan un número determinado de sitios con el objetivo de representar el mayor número de veces todos los taxa presentes en el área. En este trabajo se utilizó un algoritmo progresivo de rareza basado en Margules *et al.* (1988) mediante el programa WORLDMAP (Williams 2000).

Algoritmo de cuatro representaciones por taxón. Este algoritmo seleccionó un grupo mínimo de áreas, con el objetivo de representar cuatro veces (se eligieron arbitrariamente cuatro poblaciones de cada especie en el supuesto que, a mayor número de poblaciones menor probabilidad de extinción de la especie) cada taxón. El algoritmo fue implementado mediante el programa WORLDMAP (Williams *et al.* 1996; Csuti *et al.* 1997; Williams 1998).

Algoritmo al azar. El método consiste en seleccionar al azar sitios, pero calculando el número de especies representadas como la media de 1000 repeticiones, así como también el 5% superior de los resultados de riqueza obtenidos de dicha selección aleatoria (Beger *et al.* 2003). Este método es utilizado como referencia para compararlo con los demás métodos de selección y determinar su efectividad. El algoritmo fue implementado mediante el programa WORLDMAP (Williams 2000).

RESULTADOS

El índice de diversidad taxonómica promedio (DTP) y diversidad taxonómica total (DTT) resaltaron como importantes las localidades que poseen una alta diversidad filogenética, es decir, aquellos cuyas especies se encuentren menos emparentadas (Tabla 1). En este sentido sitios con pocas especies (Santa Cruz, 3 especies), pero pertenecientes a distintas familias y géneros, poseen una mayor prioridad de conservación

(DTP prioridad 1) que aquellos sitios con una riqueza alta (Puerto Escondido, 11 especies, DTP prioridad 4), pero cuyas especies pertenecen a la misma familia o género. Aun cuando no existe una concordancia completa entre los valores obtenidos por estos métodos, DTP y DTT identifican a las mismas localidades (excepto Santa Cruz) dentro de los primeros nueve sitios prioritarios de conservación. Adicionalmente, es relevante que en términos de diversidad taxonómica, ninguna localidad incluida dentro del Parque Nacional Huatulco ocupe los primeros sitios prioritarios de conservación (Tabla 1). En términos de efectividad, DTT y DTP alcanzan el 100% de conservación de especies en 7 y 14 localidades (Fig. 2).

La prueba de diversidad taxonómica demostró que las comunidades coralinas de la costa del estado de Oaxaca no presentan sitios con una diversidad taxonómica sobresaliente (por arriba del intervalo de confianza) o por encima de lo esperado (por arriba de la diversidad taxonómica promedio) (Fig. 3), sin embargo, cuenta con sitios que ya sea por algún proceso evolutivo o condición ecológica (Warwick & Clarke 1998) se encuentran por debajo del intervalo de confianza (La Tijera, Isla Montosa, Isla Cacaluta, Tejoncito e Isla San Agustín). Isla Cacaluta e Isla San Agustín son sobresalientes pues están incluidas dentro del polígono del parque, aun cuando filogenéticamente pudieran no ser relevantes en términos de conservación.

No existe una concordancia completa en la prioridad de conservación de los sitios para el resto de los métodos de selección de reservas empleados. Por ejemplo, Puerto Escondido, tiene prioridad de conservación 1 según la técnica hotspot de riqueza, pero una prioridad 3 según la técnica de complementariedad de rareza (Tabla 1). En función de lo anterior, se utilizaron dos criterios para determinar la importancia de los sitios: a) el promedio de los valores de conservación obtenidos por los diferentes métodos (Puerto Escondido, P = 1.85; La Entrega, P = 2.16; Tabla 1) y b) la frecuencia con que las técnicas consideran al sitio como prioritario (Puerto Escondido, NA = 7; La Entrega, NA = 6; Tabla 1). Existe concordancia entre estos dos últimos criterios en señalar, por ejemplo, que cuando varias técnicas encuentran a los sitios como prioritarios (Puerto Escondido, NA = 7; Tabla 1), el promedio de los valores de conservación obtenidos por los diferentes métodos son altos (Puerto Escondido, P = 1.85; Tabla 1). En este sentido, el promedio de importancia de conservación (P) y el número de técnicas (NA) indica que de los diez sitios considerados como prioritarios, sólo dos (Dos Hermanas, prioridad 6; Jicaral-Chachacual, prioridad 9) se encuentran dentro del polígono de protección del Parque Nacional Huatulco (Tabla 1). No obstante, si el número de sitios se redujera a los primeros cinco, ninguno estaría incluido dentro del polígono del parque. Este resultado es preocupante debido a que ninguno de los sitios identificados como prioritarios mediante los métodos aquí empleados, está sujeto a régimen de protección alguno.

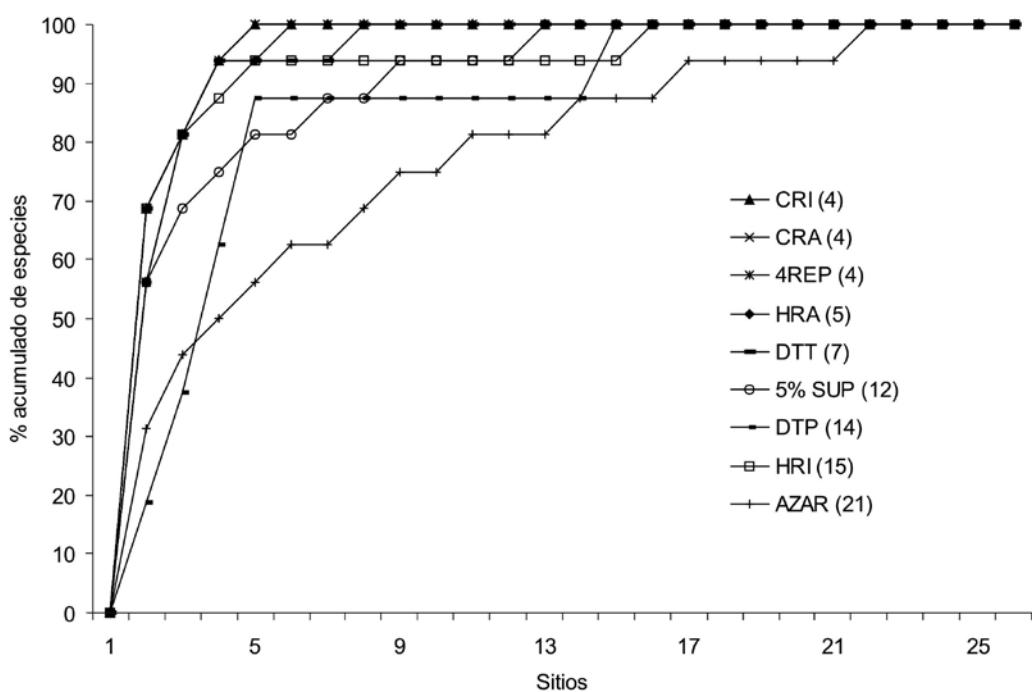


Figura 2. Curvas de acumulación de especies por sitio para nueve métodos de selección de reservas. HRA: Hotspots rareza; HRI: Hotspots riqueza; CRI: Complementariedad de riqueza; CRA: Complementariedad de rareza; 4R: Cuatro representaciones; SP: 5% Superior de la selección de sitios al azar; AZ: Selección de sitios al azar; DTP: Diversidad Taxonómica Promedio; DTT: Diversidad Taxonómica total. Los números entre paréntesis se refieren al número de sitios necesarios para representar el 100 % de las especies.

Tabla 1. Nivel de prioridad de conservación de sitios de acuerdo a los métodos de selección de reservas aplicados.

Localidad	DTP	DTT	HRI	HRA	4R	CRA	CRI	P	NA	EP
Puerto Escondido	4	1	1	2	1	3	1	1.8	7	
La Entrega	3	2	4	1	2	1	-	2.1	6	
La Tijera	9	3	3	3	3	2	4	3.8	6	
Isla Montosa	11	5	2	4	5	-	2	4.8	6	
Prima	7	4	5	6	9	-	-	6.2	5	
Dos Hermanas	6	6	6	8	7	-	-	6.6	5	PN
Santa Cruz	1	11	23	5	4	4	3	7.2	7	
Dársena	2	7	15	7	8	-	-	7.8	5	
Jicaral-Chachacual	8	8	8	12	-	-	-	9	4	PN
Panteones	8	8	9	14	-	-	-	9.7	4	
Ixtacahuite	8	8	10	15	-	-	-	10.2	4	
Isla Cacaluta	13	10	7	11	11	-	-	10.4	5	PN
La Guacha	5	9	13	18	-	-	-	11.2	4	
Mixteca	5	9	14	19	-	-	-	11.7	4	
La India	5	9	16	20	-	-	-	12.5	4	PN
Tejoncito (Guerrilla)	12	11	11	17	-	-	-	12.7	4	
San Agustín	5	9	17	21	-	-	-	13	4	PN
Isla San Agustín	14	13	12	13	-	-	-	13	4	PN
Mazunte	14	14	22	10	10	-	-	14	5	
Puerto Ángel	10	12	18	16	-	-	-	14	4	
Camaroncito	15	16	29	9	6	-	-	15	5	
Punta Cometa	10	12	19	23	-	-	-	16	4	
Rincón Sabroso	10	12	20	22	-	-	-	16	4	
Salchi	14	14	21	24	-	-	-	18.2	4	
Puerto Angelito	14	15	25	25	-	-	-	19.7	4	
Manzanilla	14	15	24	27	-	-	-	20	4	
Riscalillo	14	15	26	26	-	-	-	20.2	4	PN
Carrizalillo	15	16	28	29	-	-	-	22	4	

DTP: Diversidad Taxonómica Promedio; DTT: Diversidad Taxonómica Total; HRI: Hotspots riqueza; HRA: Hotspots rareza; 4R: Cuatro representaciones; CRA: Complementariedad de rareza; CRI: Complementariedad de riqueza; P: Promedio; NA; Número de métodos que consideran prioritario el sitio; EP: Estatus de protección; PN: Parque Nacional Huatulco.

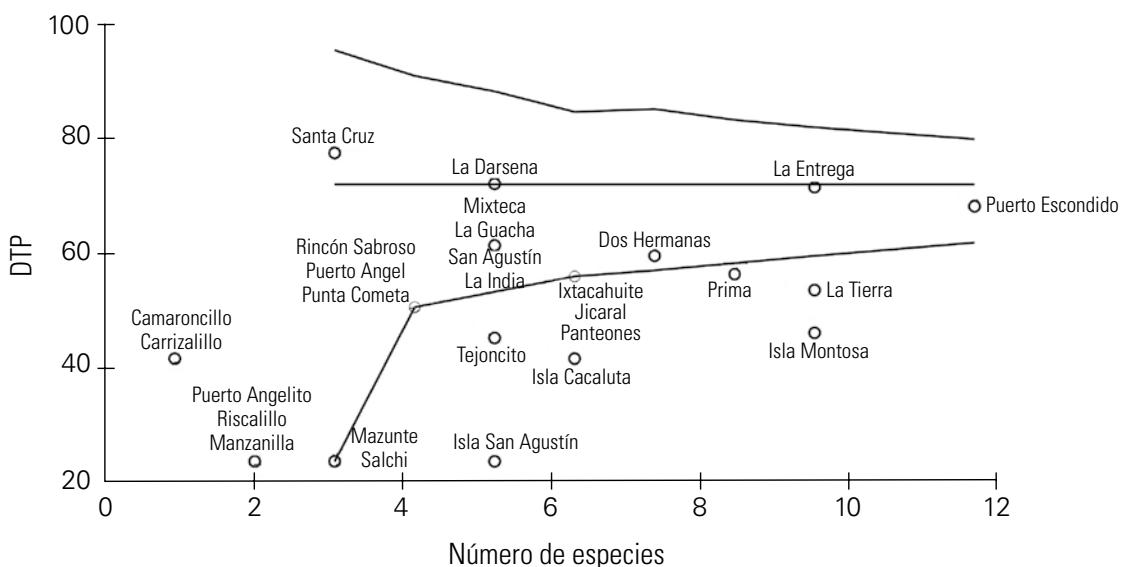


Figura 3. Prueba de diversidad taxonómica. La línea central representa la diversidad taxonómica promedio. Las líneas continuas representan el intervalo de confianza al 95%.

En términos de efectividad, los algoritmos de complementariedad de riqueza (CRI), rareza (CRA) y cuatro representaciones (4REP) fueron los más eficientes en alcanzar el 100% de conservación de especies en sólo cuatro sitios, seguido de la técnica de hotspot de rareza (HRA) en cinco sitios. Las técnicas anteriores demostraron ser superiores a la selección de sitios al azar (AZAR, 5% SUP), a las técnicas de diversidad taxonómica (DTP, DTT) y al hotspot de riqueza (HRI) (Tabla 1, Fig. 2).

En términos de efectividad, los algoritmos de complementariedad de riqueza (CRI), rareza (CRA) y cuatro representaciones (4REP) fueron los más eficientes en alcanzar el 100% de conservación de especies en sólo cuatro sitios, seguido de la técnica de hotspot de rareza (HRA) en cinco sitios. Las técnicas anteriores demostraron ser superiores a la selección de sitios al azar (AZAR, 5% SUP), a las técnicas de diversidad taxonómica (DTP, DTT) y al hotspot de riqueza (HRI) (Tabla 1, Fig. 2).

En términos de efectividad, los algoritmos de complementariedad de riqueza (CRI), rareza (CRA) y cuatro representaciones (4REP) fueron los más eficientes en alcanzar el 100% de conservación de especies en sólo cuatro sitios, seguido de la técnica de hotspot de rareza (HRA) en cinco sitios. Las técnicas anteriores demostraron ser superiores a la selección de sitios al azar (AZAR, 5% SUP), a las técnicas de diversidad taxonómica (DTP, DTT) y al hotspot de riqueza (HRI) (Tabla 1, Fig. 2).

DISCUSIÓN

Considerando el desarrollo costero actual y futuro del estado de Oaxaca, la tenencia de la tierra, y la limitada cantidad de recursos para la conservación de la biodiversidad, el uso de algoritmos para la identificación de áreas prioritarias de conservación es relevante. En el caso particular de los corales arrecifales de la costa de Oaxaca, el uso de algoritmos sugiere la existencia de distintas combinaciones (igualmente idóneas) de sitios para alcanzar la conservación del 100 % de las especies de coral con que cuenta el estado. Aproximaciones similares han sido utilizadas exitosamente por Williams *et al.* (1996) para aves en Inglaterra, Csuti *et al.* (1997) para vertebrados terrestres en Oregon, Beger *et al.* (2003) para corales y peces en Nueva Guinea, y Sala *et al.* (2002) para diversos ecosistemas marinos en el Golfo de California. Los estudios (incluido el presente) coinciden en señalar la idoneidad de los índices, en términos de un número menor de áreas para alcanzar un máximo de conservación (100 % de las especies de corales). Particularmente, los estudios coinciden en señalar a los algoritmos de complementariedad como una herramienta valiosa en el diseño de ANPs (Williams *et al.* 1996; Csuti *et al.* 1997; Beger *et al.* 2003), mientras que la utilización de técnicas para identificar hotspots de rareza y riqueza tienen un menor desempeño. Estos resultados son relevantes porque sugieren que el diseño de ANPs marinas en México debe alejarse de la idea de decretar reservas basadas únicamente en criterios de riqueza o rareza de especies, como históricamente ha sucedido (Galindo-Leal 1998; Benítez & Loa 1996; Cantú *et al.* 2004).

Los algoritmos de complementariedad utilizados en el presente trabajo demuestran que de los 28 sitios con presencia de corales en la costa de Oaxaca, sólo cuatro son necesarios para preservar el 100 % de las especies del estado (Tabla 1; Figura 2). En las ocho comunidades arrecifales ubicadas en el Parque Nacional Huatulco (PNH) sólo se encuentran representadas el 62.5 % de las especies con que cuenta la costa de Oaxaca, mientras que el 37.5 % restante, que incluye especies como *Fungia distorta* (Michelin 1842), *Gardineroseris planulata* (Dana 1846), *Leptoseris papyracea* (Dana 1849), *Pocillopora effusus* (Veron 2000), *Pocillopora inflata* (Glynn 1999) y *Psammocora stellata* (Verrill 1866) no se encuentran protegidas por el polígono del parque. Las especies mencionadas son biogeográficamente relevantes pues representan taxa cuya presencia sólo ha sido registrada para Oaxaca (*G. planulata*, *P. effusus*, *P. inflata*) (Reyes-Bonilla *et al.* 2005), o a poblaciones de especies (*F. distorta*, *P. stellata*, *L. papyracea*) que por su distribución disjunta, son potencialmente necesarias para mantener la conectividad (Hanski 1999) entre Centro América y México y para disminuir

el riesgo de extinción o extirpación de especies en el Pacífico americano. En este sentido, el diseño actual del PNH es subóptimo debido a que: a) no incluye en su polígono al 100 % de las especies de corales arrecifales con que cuenta el estado de Oaxaca, b) excluye poblaciones potencialmente necesarias para mantener la conectividad entre los sistemas arrecifales de Centro América y México poniendo en riesgo la permanencia de las especies a nivel regional y c) duplica características que son innecesarias de acuerdo al principio de complementariedad (Pressey *et al.* 1993). Considerando el diseño actual de la porción marina del PNH, la sola inclusión de La Entrega, ubicada al este del parque incrementaría en 18.75 % (3 especies) el porcentaje de conservación de especies en el estado. Si se incluyera también la Isla Montosa (también al este del parque) el 93 % de las especies del estado estarían incluidas en el polígono de protección del parque (Fig. 1).

El presente análisis sólo está basado en datos de presencia-ausencia de especies de corales formadores de arrecife, y considera como objetivo, la inclusión del 100 % de las especies en el polígono de protección de una ANP marina. La utilización de información parcial (presencia-ausencia) en procedimientos de selección de reservas, ha sido utilizada en el diseño de reservas terrestres, marinas y en la determinación de sitios de conservación prioritarios (Beger *et al.* 2003). Lo anterior es particularmente relevante en donde la velocidad del desarrollo urbano es mayor al de adquisición de datos (Conanp 2003) y donde el costo y el esfuerzo para hacer un estudio detallado es muy alto para las organizaciones locales (Beger *et al.* 2003); ambos, particularmente relevantes en la costa de Oaxaca. En esta situación, el uso de especies indicadoras para seleccionar áreas de conservación es conveniente por su potencial para reducir el costo, tiempo y esfuerzo para obtener datos (Williams & Gaston 1994); además de que ha demostrado ser útil en casos donde los taxa exhiben alto grado de congruencia y traslape en términos de hotspots, endemismo y complementariedad (Ward *et al.* 1999; Reyers *et al.* 2000; Moritz *et al.* 2001; Gladstone 2002). En el caso de arrecifes de coral, comúnmente existe una correlación entre riqueza y diversidad de corales, peces e invertebrados a escalas espaciales amplias (Bellwood & Hughes 2001). En particular, estudios realizados en la costa de Oaxaca han demostrado que las comunidades coralinas son relativamente homogéneas en tiempo y en espacio (López-Pérez & Hernández-Ballesteros 2004), al igual que la comunidad de equinodermos (Benítez-Villalobos 2001), peces (I. López-Pérez Maldonado, com. pers) y moluscos (N. Barrientos-Luján, com. pers) arrecifales, por lo que el uso de corales constructores de arrecife como especie indicadora en procedimientos de selección de sitios de conservación prioritarios en la costa de Oaxaca pudiera estar justificado.

Finalmente, los resultados aquí presentados, además de sugerir sitios prioritarios de conservación para la costa de Oaxaca,

pretende estimular la investigación en el diseño de áreas naturales protegidas marinas en el país con el fin último de diseñar una red de AMPs que permita un mejor manejo de los sistemas arrecifales en México.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Parque Nacional Huatulco por las facilidades para trabajar dentro del área protegida. El trabajo de campo se realizó mediante apoyo de los proyectos financiados por el fondo Semarnat-CONACYT (0189, 0605, 23390), Conabio (AS007) y PROMEP (103.5/07/2597) llevados a cabo durante 2002-2008. Tres árbitros anónimos revisaron el manuscrito e hicieron sugerencias para incrementar la calidad del mismo. El artículo es producto del grupo de trabajo "Arrecifes del Pacífico" de la Red de Monitoreo a Largo Plazo Red-MexLTER.

REFERENCIAS

- AGARDY, T., P. BRIDgewater, M.P. CROSBY, J. DAY, P.K. DAYTON, R. KENCHINGTON, D. LAFFOLEY, P. McCONNEY, P.A. MURRAY, J.E. PARKS & L. PEAU. 2003. Dangerous targets? Unresolved issues and ideological clashes around marine protected areas. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 13: 353-367.
- BHAT, M. G. 2003. Application of non-market valuation to the Florida Keys marine reserve management. *Journal of Environmental Management* 67: 315-325.
- BEGER, M., G.P. JONES & P.L. MUNDAY. 2003. Conservation of coral reef biodiversity: a comparison of reserve selection procedures for corals and fishes. *Biological Conservation* 111: 53-62.
- BELLWOOD, D.R. & T.P. HUGHES. 2001. Regional-scale assembly rules and biodiversity of coral reefs. *Science* 292: 1531-1534.
- BENÍTEZ, H. & E. LOA. 1996. Regiones prioritarias para la conservación en México. *Biodiversitas* 9: 7-10.
- BENÍTEZ-VILLALOBOS, F. 2001. Comparación de la comunidad de equinodermos, asociada a arrecifes, en dos localidades de Bahías de Huatulco, Oaxaca, México. *Ciencia y Mar* 5: 31-36.
- BOJÓRQUEZ-TAPIA, L. A., H. DE LA CUEVA, S. DÍAZ, D. MELGAREJO, G. ALCANZAR, M.J. SOLARES, G. GROBET & G. CRUZ-BELLO. 2004. Environmental conflicts and nature reserves: redesigning Sierra San Pedro Martir National Park, México. *Biological Conservation* 177: 111-126.
- BOLLAND, L.P., A. P. DREW & C. VERGARA-TENORIO. 2006. Analysis of a natural resource management system in the Calakmul Biosphere Reserve. *Landscape and Urban Planning* 74: 223-241.
- BRIGGS, J. C. 2005. Coral reefs: conserving the evolutionary sources. *Biological Conservation* 126: 297-305.

- CAMM, J. D., S. POLASKY, A. SÓLOW & B. CSUTI. 1996. A note on optimal algorithms for reserve design. *Biological Conservation* 78: 353-355.
- CANTÚ, C., R. G. WRIGHT, J.M. SCOTT & E. STRAND. 2004. Assessment of current and proposed natural reserves of México based on their capacity to protect geophysical features and biodiversity. *Biological Conservation* 115: 411-417.
- CHAPE, S., J. HARRISON, M. SPALDING & I. LYSENKO. 2005. Measuring the extent and effectiveness of protected areas as an indicator for meeting global biodiversity targets. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 360: 443-455.
- CHAVEZ, E., JR. TUNNELL & K. WITHERS. 2007. Reef zonation and ecology: Veracruz shelf and Campeche bank. In: Tunnell, J.W., E.A. Chavez & K. Withers (Eds.). *Coral reefs of the Southern Gulf of Mexico*. Texas A&M, Texas, pp. 41-67.
- CLARKE, K. R. & R. M. WARWICK. 1998. A taxonomic distinctness index and its statistical properties. *Journal of Applied Ecology* 35: 523-531.
- CLARKE, K. R. & R. M. WARWICK. 2001. *Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation*. 2a Ed. Plymouth Marine Laboratory, Plymouth. 215 p.
- COMISIÓN NACIONAL DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS (CONANP). 2003. *Programa de manejo Parque Nacional Huatulco*. Conanp-Semarnat, México. 205 p.
- CONNOLY, S. R., T. P. HUGHES, D. R. BELLWOOD & R.H. KARLSON. 2005. Community structure of corals and reef fishes at multiple scales. *Science* 309: 1363-1365.
- CROSSMAN, N. D., L. M. PERRY, B. A. BRYAN & B. OSTENDORF. 2007. CREDOS: A conservation reserve evaluation and design optimization system. *Environmental Modelling & Software* 22: 449-463.
- CSUTI, B., S. POLASKY, P.H. WILLIAMS, R. L. PRESSEY, J. D. CAMM, M. KERSHAW, A. R. KIESTER, B. DOWNS, R. HAMILTON, M. HUSO & K. SAHR. 1997. A comparison of reserve selection algorithms using data on terrestrial vertebrates in Oregon. *Biological Conservation* 80: 83-97.
- DUARTE, C. M. 2000. Marine biodiversity and ecosystem services: an elusive link. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 250: 117-131.
- EPSTEIN, N., M. J. A. VERMEIJ, R.P.M. BAK & B. RINKEVICH. 2005. Alleviating impacts of anthropogenic activities by traditional conservation measures: can a small reef reserve be sustainably managed?. *Biological Conservation* 121: 243-255.
- ERICSSON, J. A. 2006. A participatory approach to conservation in the Calakmul biosphere reserve, Campeche, Mexico. *Landscape and Urban Planning* 74: 242-266.
- FIEDLER, P. C. 1992. *Seasonal climatologies and variability of the tropical eastern Pacific surface waters*. NOAA Tech. Rept. 109: 1-65.
- FULLER, T., M. MURGUÍA, M. MAYFIELD, V. SÁNCHEZ-CORDERO & S. SARKAR. 2006. Incorporating connectivity into conservation planning: A multi-criteria case study from central México. *Biological Conservation* 133: 131-142.
- GALINDO-LEAL, C. 1998. Diseño de reservas: el mal congénito de Calakmul. *Biodiversitas* 17: 9-15.
- GLADSTONE, W. 2002. The potential value of indicator groups in the selection of marine reserves. *Biological Conservation* 104: 211-220.
- GLYNN, P. W. & G. E. LEYTE-MORALES. 1997. Coral reefs of Huatulco, West México: Reef development in upwelling Gulf of Tehuantepec. *Revista de Biología Tropical*. 45: 1033-1047.
- GRAHAM, N. A. J., R. D. EVANS & G. R. RUSS. 2003. The effects of marine reserve protection on the trophic relationships of reef fishes on the Great Barrier Reef. *Environmental Conservation* 30 (2): 200-208.
- HANSKI, I. 1999. *Metapopulation ecology*. Oxford. New Oxford. New York. 313 p.
- HORTA-PUGA, G. 2007. Environmental impacts. In: Tunnell Jr, J. W., E. A. Chavez y K. Withers (Eds.). *Coral reefs of the Southern Gulf of Mexico*. Texas A&M, Texas, pp. 126-141.
- HYRENBACH, D. K., K. A. FORNEY & P. K. DAYTON. 2000. Marine protected areas and ocean basin management. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. 10: 437-458.
- JORDAN-DAHLGREN, E. & R. E. RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ. 2003. The Atlantic coral reefs of Mexico. In: Cortés, J. (Ed.). *Latin American coral reefs*. Elsevier Amsterdam, pp. 131-158.
- KETCHUM-MEJÍA, J. T. & H. REYES-BONILLA, 1997. Biogeography of hermatypic corals of the archipelago Revillagigedo, Mexico. Proceedings 8th International Coral Reef Symposium, Panama. Panama 1: 471-476.
- KREMEN, C., V. RAZAFIMAHATRATRA, P. R. GUILLERY, J. ROKOTOMALALA, A. WEISS & J. S. RATSIMPATRARIVO. 1999. Designing the Mesoala national park in Madagascar based on biological and socioeconomic data. *Conservation Biology* 13: 1055-1068.
- KIRKPATRICK, J. B. 1993. An iterative method for establishing priorities for the selection of nature reserves: an example from Tasmania. *Biological Conservation* 25: 127-134.
- LEYTE-MORALES, G. E. 2000. Perturbaciones naturales y antropogénicas en las comunidades coralinas de Oaxaca (1977-1998). Resumen. XII Congreso Nacional de Oceanografía. Huatulco, Oaxaca, p. 5.
- LÓPEZ-PÉREZ, A.R. & L. M. HERNÁNDEZ-BALLESTEROS. 2004. Coral community structure and dynamics in the Huatulco area, western México. *Bulletin of Marine Science* 75 (3): 453-472.
- LÓPEZ-PÉREZ, R. A., L. M. HERNÁNDEZ-BALLESTEROS & T. HERRERA-ESCALANTE. 2002. Cambio en la dominancia de la comunidad arrecifal en Chachacual, Bahías de Huatulco, Oaxaca. *Ciencia y Mar* 16: 33-38.

- LÓPEZ-PÉREZ, R. A., M. G. MORA-PÉREZ & G. E. LEYTE-MORALES. 2007. Coral (Anthozoa: Scleractinia) recruitment at Bahías de Huatulco, Western Mexico: implications for coral community structure and dynamics. *Pacific Science* 61: 355-369.
- MAGURRAN, A. E. 2005. *Measuring biological diversity*. Blackwell, Massachusetts. 256 p.
- MARGULES, C. R., A. O. NICHOLLS & R. L. PRESSEY. 1988. Selecting networks of reserves to maximize biological diversity. *Biological Conservation* 43: 63-76.
- MARGULES, C. R. & R. L. PRESSEY. 2000. Systematic conservation planning. *Nature* 405: 243-253.
- MOILANEN, A. 2005. Methods for reserve selection: Interior point search. *Biological Conservation* 124: 485-492.
- MORITZ, C., K. S. RICHARDSON, S. FERRIER, G. B. MONTEITH, J. STANISIC, S. E. WILLIAMS & T. WHIFFIN. 2001. Biogeographical concordance and efficiency of taxon indicators for establishing conservation priority in a rainforest biota. *Proceedings Royal Society London Biological Sciences* 268: 1-7.
- MYERS, N. 1990. The biodiversity challenge: expanded hot-spots analysis. *The Environmentalist* 10: 243-256.
- PETERSON, A. T., S. L. EGBERT, V. SÁNCHEZ-CORDERO & K. P. PRICE. 2000. Geographic analysis of conservation priority: endemic birds and mammals in Veracruz, México. *Biological Conservation* 93: 85-94.
- PRENDERGAST, J. R., R. M. QUINN, J. H. LAWTON, B. C. EVERSHAM & D. W. GIBBONS. 1993. Rare species, the coincidence of diversity hotspots and conservation strategies. *Nature* 365: 335-337.
- PRENDERGAST, J. R., R. M. QUINN & J. H. LAWTON. 1999. The gaps between theory and practice in selecting nature reserves. *Conservation Biology* 13: 484-492.
- PRESSEY, R. L. & A. O. NICHOLLS. 1989. Application of a numerical algorithm to the selection of reserves in semi-arid New South Wales. *Biological Conservation* 50: 263-278.
- PRESSEY, R. L., H. P. POSSINGHAM & C. R. MARGULES. 1996. Optimality in reserve selection algorithms: when does it matter and how much? *Biological Conservation* 76: 259-267.
- PRESSEY, R. L., C. J. HUMPHRIES, C. R. MARGULES, R. I. VANE-WRIGHT & P. H. WILLIAMS. 1993. Beyond opportunism: key principles for systematic reserve selection. *Trends in Ecology and Evolution* 8: 124-128.
- REYERS, B., A. S. VAN JAARSVELD & M. KRUEGER. 2000. Complementarity as a biodiversity indicator strategy. *Proceedings Royal Society London Biological Sciences* 267: 505-513.
- REYES-BONILLA, H. 2003. Coral reefs of the Pacific coast of México. In: Cortés, J (Ed.). *Latin American coral reefs*. Elsevier, Amsterdam. pp. 331-349.
- REYES-BONILLA, H. & R. A. LÓPEZ-PÉREZ 1998. Biogeografía de los corales pétreos (Scleractinia) del Pacífico de México. *Ciencias Marinas* 24: 211-224.
- REYES-BONILLA, H., R. A. LÓPEZ-PÉREZ & P. MEDINA-ROSAS. 2002a. El estado actual de los arrecifes coralinos en el mundo. *Ciencia y Desarrollo*. 28: 12-21.
- REYES-BONILLA, H., J. D. CARRIQUIY, G. E. LEYTE-MORALES & A. L. CUPUL-MAGAÑA. 2002b. Effects of the El Niño-Southern Oscillation and the anti-El Niño event (1997-1999) on coral reefs of the western coast of México. *Coral Reefs* 21: 368-372.
- REYES-BONILLA, H., L. E. CALDERÓN-AGUILERA, G. CRUZ-PIÑÓN, P. MEDINA-ROSAS, R. A. LÓPEZ-PÉREZ, M. D. HERRERO-PÉREZRL, G. E. LEYTE-MORALES, A. L. CUPUL-MAGAÑA & J. D. CARRIQUIY-BELTRÁN. 2005. *Atlas de los corales pétreos (Anthozoa: scleractinia) del Pacífico Mexicano*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Universidad de Guadalajara/Centro Universitario de la Costa, Universidad del Mar, Guadalajara. 128 p.
- SALA, E., O. ABURTO-OROEZA, G. PAREDES, I. PARRA, J. P. BARRERA & P. K. DAYTON. 2002. A General Model for Designing Networks of Marine Reserves. *Science* 298: 1991-1993.
- SALOMON, A. K., J. L. RUESINK & R. E. DEWREEDE. 2006. Population viability, ecological processes and biodiversity: Valuing sites for reserve selection. *Biological Conservation* 128: 79-92.
- STRANGE, N., B. J. THORSEN & J. BLADT. 2006. Optimal reserve selection in a dynamic world. *Biological Conservation* 131: 33-41.
- TOLE, L. 2006. Choosing reserve sites probabilistically: A colombian amazone case study. *Ecological Modelling* 194: 344-356.
- VAN WOESIK, R. 2000. Modelling processes that generate and maintain coral community diversity. *Biodiversity and Conservation* 9: 1219-1233.
- VANE-WRIGHT, R. I., C. J. HUMPHRIES & P. H. WILLIAMS. 1991. What to protect? systematics and the agony of choice. *Biological Conservation* 55: 235-254.
- WAGNER, L. D., J. V. ROSS & H. P. POSSINGHAM. 2007. Catastrophe management and inter-reserve distance for marine reserve networks. *Ecological Modelling* 201: 81-88.
- WARD, T. J., M. A. VANDERKLIFT, A. O. NICHOLLS & R. A. KENCHINGTON. 1999. Selecting marine reserves using habitats and species assemblages as surrogates for biological diversity. *Ecological Applications* 9: 691-698.
- WARWICK, R. M. & K. R. CLARKE. 1998. Taxonomic distinctness and environmental assessment. *Journal of Applied Ecology* 35: 532-543.
- WILKINSON, C. 2004. *Status of coral reefs of the world: 2004*. Australian Institute of Marine Science, Townsville. 557 p.

WILLIAMS, P. H. 1998. Key sites for conservation: area-selection methods for biodiversity. In: Mace, G. M., A. Balmford & J.R. Ginsberg (Eds.). *Conservation in a changing world*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 211-249.

WILLIAMS, P. H. 2000. WORLDMAP iv WINDOWS: Software and help document 4.2., Distribución privada, Londres.

WILLIAMS, P. H. & K. J. GASTON. 1994. Measuring more of biodiversity: can higher- taxon richness predict wholesale species richness? *Biological Conservation* 67: 211-217.

WILLIAMS, P., D. GIBBONS, C. MARGULES, A. REBELO, C. HUMPHRIES & R. PRESSEY. 1996. A comparison of richness hotspots, rarity hotspots, and complementary areas for conserving biodiversity of british birds. *Conservation Biology* 10: 155-174.

Recibido: 16 de abril de 2008.

Aceptado: 10 de diciembre de 2008.