



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN
EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO
POSGRADO EN BOTÁNICA

**ESTRUCTURA Y RIQUEZA VEGETAL DE LAS ISLAS
DE LA COSTA DE SINALOA, MÉXICO**

BARDO HELEODORO SÁNCHEZ SOTO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

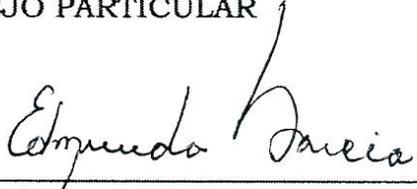
2012

La presente tesis titulada: Estructura y riqueza vegetal de las islas de la costa de Sinaloa, México, realizada por el alumno: Bardo Heleodoro Sánchez Soto, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
BOTÁNICA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:


DR. EDMUNDO GARCÍA MOYA

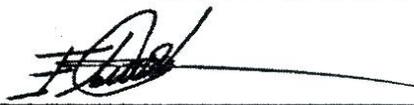
ASESOR:


DR. ÁLVARO REYES OLIVAS

ASESORA:


DRA. ANGÉLICA ROMERO MANZANARES

ASESOR:


DR. EBANDRO USCANGA MORTERA

ASESOR:


DR. RITO VEGA AVIÑA

Montecillo, Texcoco, estado de México, 2012

**ESTRUCTURA Y RIQUEZA VEGETAL DE LAS ISLAS
DE LA COSTA DE SINALOA, MÉXICO.**

Bardo Heleodoro Sánchez Soto, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2012.

Las islas continentales de Sinaloa difieren en forma, geología, topografía, clima y biología, por tanto pudieran ser varios los factores que determinan la composición y estructura de las comunidades vegetales que ahí habitan. Esta investigación, realizada en 16 islas del estado, tiene como objetivos: 1) ajustar modelos especies-área para evaluar la importancia de las variables biogeográficas en la predicción de la riqueza de especies vegetales, con base en muestreo de campo y datos publicados sobre la flora de cinco islas de la entidad, y 2) esclarecer las relaciones entre medio y vegetación en 16 islas, con ayuda de análisis multivariantes de clasificación y ordenación. El modelo exponencial y la función potencial, dan valores de R^2 entre 0.20 y 0.25, mientras que el modelo exponencial modificado [$S = \ln k + z (\ln A)^2$], resultó apropiado por mostrar un poder predictivo del 96%-98% y error menor al 3% en el número de especies predichas. La clasificación formó seis grupos de sitios con 11 especies dominantes. En la ordenación de la vegetación, los tres primeros ejes del análisis de correspondencia linealizado explican 35.0% de la varianza total de las especies con $\lambda = 0.793$ para el primer eje y una longitud del gradiente de 4.835. El análisis de correspondencia canónico muestra una varianza acumulada en los tres primeros ejes de 32.3% y $\lambda = 4.354$. El primer eje es un gradiente relacionado con nitratos y pH, mientras que el segundo eje se correlaciona con calcio, fosfatos, cobertura de rocas, pendiente, profundidad, porcentaje de materia orgánica, arena y limo. Se concluye que el modelo propuesto [$S = \ln k + z (\ln A)^2$] permite hacer estimaciones del número real de especies en las islas de Sinaloa y, los factores geomorfológicos y edáficos, son determinantes en la composición de las comunidades vegetales en las islas.

Palabras clave: relación especies-área, islas de Sinaloa, gradiente ambiental, riqueza vegetal, factores geomorfológicos y edáficos.

**STRUCTURE AND RICHNESS OF COMUNITIES VEGETATION THE
ISLANDS OFF THE COAST OF SINALOA, MEXICO.**

Bardo Heleodoro Sánchez Soto, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2012.

The islands continental of Sinaloa differ in shape, geology, topography climate and biology, therefore could be several factors that determine the composition and structure of plant communities that live there. In this study, conducted in 16 islands of the state, aims to: 1) fit species-area models to assess the importance of biogeographical variables in the predicting of plant species richness, based on field sampling and previously published data about plant communities on the five islands off the state, and 2) clarify the relationship between environment and vegetation in the 16 islands, multivariate analysis using classification and ordination. The model exponential and power function, provided R^2 values between 0.20 and 0.25, while the modified exponential model $[S = \ln k + z (\ln A)^2]$, was appropriate with predictive power of 96%-98% and with an error less than 3% in the number of species. In other results, the classification analysis formed six groups of sites with 11 species are dominant. In the analysis of the vegetation by means ordination, the first 3 axes of detrended correspondence analysis explained 35.0% of the total variance of species with $\lambda = 0.793$ for the first DCA axis gradient length of 4835. The canonical correspondence analysis gives a accumulated variance in the first 3 axes of 32.3% and $\lambda = 4354$. The first CCA axis is a gradient related to nitrates and pH, while the second axis is related to calcium, phosphates, stone cover, ground slope, soil depth, percent organic matter, sand and silt. We conclude that the model $[S = \ln k + z (\ln A)^2]$ allows to estimate the actual number of species on the islands of Sinaloa, and geomorphological and edaphic factors are important in the structure and composition of plant communities in the islands.

Key words: species-area relationship, islands of Sinaloa, environmental gradient, vegetal richness, geomorphological and edaphic factors.

DEDICATORIA

A mis padres: *María de Jesús y Heleodoro*, por todo el apoyo brindado en todo momento, gracias por permitirme decidir lo que deseo hacer.

A mis hermanos: *César, Olga, Miriam, Karla y Jesús* (que en paz descanse), por el cariño y respaldo en todo este tiempo.

A mis amigos y compañeros: Que de una y otra manera han contribuido en mi formación académica y lo más importante que me hacen mejorar como ser humano; en breve, a cada uno de las personas que aportaron sus ideas, trabajo de campo y demás apoyo para la elaboración de este trabajo de investigación.

AGRADECIMIENTOS

Al **Colegio de Postgraduados**, por admitirme y permitirme incrementar mi formación académica y sobre todo crecer como persona.

A los **ciudadanos mexicanos** que por medio del **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACyT), me dieron el respaldo económico para realizar mis estudios de doctorado (No. Becario 98895).

A **Fondos Mixtos de CONACyT y Gobierno del Estado de Sinaloa** por el apoyo económico otorgado para la realización del trabajo de campo, mediante el financiamiento del proyecto SIN-2006-CO1-37439.

Al **Programa de Mejoramiento del Profesorado** (PROMEP) por la beca económica que me proporcionó por conducto de la Universidad Autónoma de Sinaloa como apoyo complementario para efectuar mis estudios doctorales.

A la **Universidad Autónoma de Sinaloa**, a través de la **Escuela Superior de Agricultura del Valle del Fuerte** y a la **Universidad de Occidente**, Unidad Los Mochis, mediante el **Departamento Académico de Ciencias Biológicas**, por las facilidades brindadas para la realización de esta tesis.

Al personal del **Laboratorio de Ingeniería de Riego y Drenaje**, Distrito de Riego No. 075-Río Fuerte de la Comisión Nacional del Agua, Los Mochis, Sinaloa; asimismo se agradece a los miembros del **Laboratorio Agrícola IBC Analytic México, S. A. de C. V.**, con instalaciones en la Universidad de Occidente, Unidad Los Mochis, Los Mochis, Sinaloa, por la realización de los análisis de la fertilidad y textura del suelo de las islas.

A los integrantes de mi **Consejo Particular** conformado por los doctores Edmundo García Moya, Álvaro Reyes Olivas, Angélica Romero Manzanares, Ebandro Uscanga Mortera y Rito Vega Aviña, quienes con paciencia y sabiduría me han expresado y reiterado su confianza; asimismo han realizado un papel fundamental en mi formación académica y como ser humano durante la elaboración de esta investigación.

A todos **mis amigos** que con consejos y valioso apoyo, me motivan a mejorar como ser humano y respaldar mi formación académica.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | Página |
|--|--------|
| ÍNDICE DE CONTENIDO. | viii |
| LISTA DE CUADROS. | xi |
| LISTA DE FIGURAS. | xii |
| INTRODUCCIÓN GENERAL. | 1 |
| Literatura citada. | 7 |
| CAPÍTULO I. ASPECTOS RELEVANTES DE LA TEORÍA DEL EQUILIBRIO DE BIOGEOGRAFÍA DE ISLAS. | 12 |
| Resumen. | 12 |
| Abstract. | 12 |
| Introducción. | 12 |
| Modelos matemáticos en biogeografía insular. | 13 |
| Fundamento de la teoría. | 14 |
| Limitaciones de la teoría. | 16 |
| Aplicaciones de la teoría en islas continentales de Sinaloa, México. | 20 |
| Conclusión. | 21 |
| Literatura citada. | 21 |
| CAPÍTULO II. COMPARACIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS DE RIQUEZA VEGETAL EN ISLAS DE LA COSTA DE SINALOA, MÉXICO. | 25 |
| Resumen. | 25 |
| Abstract. | 25 |
| Introducción. | 26 |
| Materiales y métodos. | 30 |
| Descripción del área de estudio. | 30 |
| Acopio de datos. | 32 |
| Análisis de datos. | 32 |
| Resultados. | 33 |
| Discusión. | 37 |

| | Página |
|---|--------|
| Conclusión. | 39 |
| Agradecimientos. | 40 |
| Literatura citada. | 40 |
| CAPÍTULO III. GRADIENTES AMBIENTALES EN LA VEGETACIÓN DE ISLAS DE LA COSTA DE SINALOA, MÉXICO. ... | 45 |
| Resumen. | 45 |
| Abstract. | 45 |
| Introducción. | 46 |
| Materiales y métodos. | 49 |
| Descripción del área de estudio. | 49 |
| Trabajo de campo. | 52 |
| Trabajo de laboratorio. | 54 |
| Identificación de especies. | 54 |
| Análisis de datos. | 54 |
| Resultados. | 56 |
| Identificación de especies. | 56 |
| Cobertura vegetal y frecuencia de especies. | 59 |
| Clasificación. | 62 |
| Ordenación indirecta. | 65 |
| Ordenación directa. | 67 |
| Discusión. | 74 |
| Conclusión. | 77 |
| Agradecimientos. | 78 |
| Literatura citada. | 78 |
| DISCUSIÓN GENERAL. | 87 |
| Literatura citada. | 89 |
| CONCLUSIONES GENERALES. | 92 |
| ANEXOS. | 94 |
| Anexo 1. | 94 |

| | Página |
|---------------|--------|
| Anexo 2. | 95 |
| Anexo 3. | 96 |
| Anexo 4. | 99 |
| Anexo 5. | 100 |

LISTA DE CUADROS

| CUADRO | | Página |
|--------|--|--------|
| 1 | Número promedio de especies registradas en cada unidad de muestreo y las esperadas por hectárea, con base en los términos de la ecuación exponencial modificada en área [$S = \ln k + z (\ln A)^2$]. | 35 |
| 2 | Verificación por comparación, del número de especies vegetales registradas en campo con las estimadas [$S = \ln k + z (\ln A)^2$]. | 35 |
| 3 | Especies agrupadas por familia, registradas en las unidades de muestreo y acrónimos utilizados en el análisis de clasificación y ordenación con PC-ORD versión 6.0 y CANOCO versión 4.5 (McCune y Mefford, 2011; ter Braak y Šmilauer, 2002). | 58 |
| 4 | Riqueza de especies vegetales en 57 sitios localizados en cuatro exposiciones y en la cima de 16 islas de la costa de Sinaloa. | 59 |
| 5 | Resultados del análisis de correspondencia linearizado para los datos de 29 especies vegetales y 57 sitios en 16 islas de la costa de Sinaloa. | 65 |
| 6 | Resultados del análisis de correspondencia canónica entre variables del medio y datos de comunidades vegetales de 16 islas de la costa de Sinaloa. Los asteriscos representan el grado de significancia estadística según la prueba de Monte Carlo con $P < 0.05$ | 67 |
| 7 | Resultados de las correlaciones entre 15 variables ambientales y los tres primeros ejes del análisis de correspondencia canónica. Los asteriscos representan el grado de significancia estadística ($P < 0.05$). | 68 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura | | Página |
|--------|--|--------|
| 1 | Modelo redibujado del propuesto en la Teoría del Equilibrio de la Biogeografía de Islas (MacArthur y Wilson, 1963; 1967). Tomado de: Fernández-Palacios (2004). Donde: I = tasa de inmigración, E = tasa de extinción y P = fuente de especies colonizadoras. | 16 |
| 2 | Modelo tridimensional de la biogeografía de islas, basado en los tres procesos biogeográficos fundamentales (inmigración, extinción y evolución), dependientes de las características de la isla en cuestión. a) moderada o relativamente alta riqueza específica, baja endemividad y bajo recambio de especies; b) moderada a relativamente alta riqueza, alta endemividad y bajo recambio de especies; c) de moderada a baja riqueza, baja endemividad y alto recambio de especies; y d) islas pobres (Figura redibujada y traducida por Fernández-Palacios, 2004). | 19 |
| 3 | Localización geográfica de las bahías de Ohuira y Mazatlán en la costa de Sinaloa. | 31 |
| 4 | Relación lineal de la distancia al continente (a) y del área o superficie de la isla (b) con respecto al número de especies vegetales en las cinco islas de la costa de Sinaloa. | 34 |
| 5 | Ajuste del modelo $[S = \ln k + z (\ln A)^2]$ de la curva de especies-área en cinco islas de Sinaloa como estimador de la riqueza de especies vegetales. La superficie real en las gráficas es equivalente a (e^x) de cualquier número de la escala logarítmica. Valores registrados (\diamond) y valores esperados (\square). | 36 |

| Figura | | Página |
|--------|---|--------|
| 6 | Localización de los sistemas lagunares de Sinaloa: A) Ubicación de la entidad, B) Bahía de Mazatlán, C) Altata-Ensenada Pabellones, D) Bahía Santa María-La Reforma, E) Navachiste-Macapule, F) Bahía de Ohuira. | 50 |
| 7 | Riqueza específica de las islas de Sinaloa. Los nombres corresponden a sitios de muestreo definidos por número y letra. El número pertenece al nombre de la isla (1 = Tesobiate, 2 = Guasayeye, 3 = Huitussera, 4 = Alta Blanca, 5 = Cardo, 6 = Mazocahui, 7 = Tunosa, 8 = Bledos, 9 = Patos, 10 = Talchichilte, 11 = Saliaca, 12 = Altamura, 13 = Iguanas, 14 = Venados, 15 = Pájaros y 16 = Lobos) y la letra describe su localización (n = norte, e = este, s = sur, o = oeste y c = cima). | 57 |
| 8 | Especies vegetales de algunos sitios de muestreo: A) Al fondo se muestra <i>Bursera laxiflora</i> y debajo de sus doseles se advierte la presencia de <i>Opuntia</i> spp. en Isla Huitussera; B) Se diferencian tres estratos en Isla Lobos: el primero compuesto por <i>Ficus petiolaris</i> , el segundo por <i>Plumeria rubra</i> fo. <i>acutifolia</i> y el tercero por <i>Agave angustifolia</i> | 60 |
| 9 | Relación de las 29 especies vegetales registradas en las líneas de Canfield y su frecuencia en 57 sitios de muestreo de 16 islas de la costa de Sinaloa. | 62 |
| 10 | Dendrograma de los agrupamientos de 57 sitios de muestreo de la vegetación de 16 islas de la costa de Sinaloa con el análisis de conglomerados. Al cuarto nivel se tiene un corte menor de 30% de la información retenida. Disponible en PC-ORD, versión 6.0. | 64 |

| Figura | | Página |
|--------|--|--------|
| 11 | Diagrama de ordenación de los dos primeros ejes del análisis de correspondencia linearizado de 57 sitios de muestreo con 29 especies vegetales, incluidos en 16 islas de la costa de Sinaloa. | 66 |
| 12 | Diagrama de ordenación de los sitios de muestreo y especies vegetales con base en el análisis de correspondencia canónica. Las abreviaturas de los 57 sitios son las mismas que en la Figura 3.1, mientras que los acrónimos de las 29 especies se indican en el Cuadro 3.2. Arena = porcentaje de arena, Limo = porcentaje de limo, CR = cobertura rocosa, Pen = pendiente del suelo, Prof = profundidad del suelo, MO = materia orgánica, pH = pH del suelo, Ca = Calcio, K = Potasio, Nitratos = Nitratos y P = Fosfatos. | 69 |
| 13 | Ejemplos de islas de la costa de Sinaloa que proveen sitios favorables para la reproducción, anidación y percha de aves marinas: A) Vista panorámica de Bledos, Bahía de Ohuira; B) Población de nopales (<i>Opuntia</i> spp.) en ladera norte de Bledos; C) Isla Patos, Bahía de Ohuira, fotografiada a una distancia aproximada de 1.5 km; D) Nopaleras dominantes en la comunidad vegetal de Patos; E) Ladera norte de Pájaros, Bahía de Mazatlán; F) Aves perchando sobre <i>Plumeria rubra</i> fo. <i>acutifolia</i> , especie dominante en Pájaros, junto con <i>Crateva tapia</i> y <i>Ficus petiolaris</i> | 71 |
| 14 | Tres islas de origen volcánico con alto porcentaje de piedras: A) Vista panorámica de Mazocahui, Bahía de Ohuira; B) Ladera norte de Mazocahui; C) Ladera norte de Tesobiate, Bahía de Navachiste; D) Comunidad | |

| Figura | | Página |
|--------|---|--------|
| | vegetal en época de lluvia al oeste de Tesobiate; E) Islas Lobos y Venados, Bahía de Mazatlán; F) Vista de la cima y ladera este de Lobos y Venados donde se aprecian los acantilados y formaciones rocosas. | 72 |
| 15 | Islas arenosas: A) Vista general de Saliaca, Complejo Playa Colorada-Bahía de Santa María-La Reforma; B) Ladera norte de Saliaca; C) Ladera norte de Altamura, Complejo Playa Colorada-Bahía de Santa María-La Reforma; D) Comunidad vegetal compuesta principalmente por <i>Jatropha cinerea</i> en Altamura; E) Isla Iguanas, Sistema Altata-Ensenada Pabellones, se caracteriza por ser plana y alcanzar no más de 1 m de altura; F) Vista de la vegetación de Iguanas. | 73 |

INTRODUCCIÓN GENERAL

Una isla, de manera clásica, se refiere a una extensión de tierra firme de tamaño variable, que está rodeada por agua y que se localiza en ríos, lagos, mares y océanos. Análogamente, la definición de isla se extiende para expresar fragmentos dentro de una matriz de sustrato como un lago o conjunto de lagos en una matriz continental o las cimas de una cadena montañosa separadas por valles, o a los remanentes de un bosque que en el pasado presentó una distribución continua y que ahora se sitúan inmersos en una matriz agrícola (Fernández-Palacios, 2004). Las islas reales representan el 5% de la superficie terrestre, en las cuales se encuentran cerca de 70,000 especies de plantas vasculares endémicas (Kreft *et al.*, 2008).

Una propuesta clásica de los tipos de islas la realizó Alfred Russel Wallace - padre de la Biogeografía Insular- a finales del siglo XIX, quien propone en su obra magna "Island Life" (1881) una división de estos sistemas con base en su origen geológico. Con este antecedente, Fernández-Palacios (2004) hace la tipificación y descripción de los tipos insulares reales en: 1) *Islas oceánicas*, las que surgen del fondo del mar producto de la actividad volcánica; por lo general situadas lejos de los continentes y separadas de éstos por grandes profundidades. La biota de estos ambientes es distintiva, caracterizada por la presencia de especies de dispersión a corta distancia. Ejemplos de estas islas son: Aleutianas, Cabo Verde, Canarias, Galápagos, Hawaii, Islandia, entre otras. 2) *Islas continentales recientes*, o bien islas continentales, incluidas en la plataforma continental, pero separadas en la actualidad de ésta por brazos de mar poco profundos y estrechos; la biota es semejante a la del continente más cercano. Ejemplos de este tipo de islas son: Borneo, Java, las Británicas, Nueva Guinea, Sri Lanka Tasmania, Terranova, y Tierra del Fuego. 3) *Islas continentales antiguas*, hoy mejor llamadas fragmentos continentales o microcontinentes, localizadas lejos de los continentes pese a su litología ígnea-granítica y contienen biota característica, en lo especial su fauna. Ejemplos de micro-continentes lo

constituyen: Antillas mayores, Baleares, Córcega-Cerdeña, Madagascar, Nueva Zelanda, Nueva Caledonia y Seychelles, 4) *Islas de origen mixto*, grupo difícil de encuadrar entre los tres primeros. Su origen es continental con una importante actividad volcánica que ha renovado el territorio o incluso creado nuevas islas, como sería el caso del Archipiélago Nipón, Fidji y Filipinas. Las características biogeográficas más sobresalientes para cada tipo de islas son: origen, desaparición, aislamiento, tamaño, longevidad, litología, biota original, especiación, endemidad, entre otras (Anexo 1).

El papel de las islas ha sido crucial en el avance de disciplinas científicas como la Biogeografía, Ecología y Evolución. Esto es, científicos como Charles Robert Darwin y Alfred Russel Wallace a la cabeza, así como las peculiaridades de la flora y fauna insulares, han motivado la imaginación de los investigadores durante los últimos 150 años, al generar conocimiento fundamental acerca de las relaciones entre patrones geográficos y procesos biológicos (Fernández-Palacios, 2004). El aporte científico más importante desarrollado a raíz de estudiar las islas es la Teoría del Equilibrio de la Biogeografía de Islas propuesta por MacArthur y Wilson (1967).

Las islas integran un universo más homogéneo y sencillo que los continentes, de tal forma que pueden evidenciar fenómenos biológicos con bastante claridad (MacArthur y Wilson, 1967). Además, ofrecen la ventaja adicional de ser más numerosas que los continentes y océanos, aunado a sus formas variadas, los distintos grados de aislamiento, la diversidad de condiciones geológicas, topográficas, climáticas y biológicas, criterios suficientes para observarlas en “experimentos naturales”, que intentan probar hipótesis evolutivas (MacArthur y Wilson, 1967; Whittaker y Fernández-Palacios, 2007).

Los factores biogeográficos (distancia de la isla al continente y tamaño de la isla) son las variables más estudiadas implícitas en la relación especies-área (Connor y McCoy, 1979; Rosenzweig, 1995; Whittaker y Fernández-Palacios, 2007); el patrón general es que las islas con mayor superficie tienen mayor número de especies que las islas pequeñas (MacArthur y

Wilson, 1967). Sin embargo, también se ha demostrado que están presentes otros atributos de la isla que influyen en el número y composición de especies, por ello se han planteado distintas hipótesis complementarias a la relación especies-área con la intención de explicar los patrones de diversidad de especies en sistemas insulares, entre las que destacan: a) la relación de especies-energía (Wright, 1983), b) la relación especies-área-energía (Storch *et al.*, 2005), c) la heterogeneidad ambiental (Ricklefs y Lovette, 1999; Báldi, 2008), d) las islas pequeñas (menores de 300 ha) (Preston, 1962; Lomolino, 2000; Lomolino y Weiser, 2001), e) los recursos alóctonos (Anderson y Wait, 2001), y f) el mutualismo planta-animal (Nogales *et al.*, 2001, 2007).

Las diferencias entre islas en cuanto a condiciones ambientales como geología, topografía o clima evidencian que hay una gran cantidad de factores del medio potencialmente determinantes en la estructura y composición de las comunidades vegetales que las habitan. Por lo tanto, el enfoque de estudio de los factores ambientales, así como de las comunidades en las islas, es multivariable; cada sitio se puede describir por la membresía y abundancia de un conjunto de especies, cuyas proporciones cambian en función de las variables ambientales y sus interacciones. Así, un enfoque matemático reciente que ha adquirido gran importancia y cuyo propósito es tratar los datos como un todo para resumirlos y revelar su estructura, son los métodos de análisis multivariable (Gauch, 1982). Los propósitos básicos del análisis multivariable en el análisis de comunidades ecológicas son: (a) sintetizar conjuntos de datos grandes y complejos, (b) ayudar a la interpretación ambiental y en la generación de hipótesis acerca de la variación de la comunidad, y (c) afinar modelos de la estructura de la comunidad.

Los métodos multivariados se conceptualizan bajo dos perspectivas: 1) clasificación y 2) ordenación, las que a su vez son complementarias. La clasificación consiste en agrupar o separar conjuntos semejantes y formar entidades discretas (asociaciones u otras unidades) (Barbour *et al.*, 1987).

La ordenación incluye una serie de técnicas para arreglar objetos (muestras o especies) a lo largo de ejes abstractos construidos sobre la base de la composición de especies. Los ejes de la ordenación tienen una interpretación ambiental y de hecho se consideran variables ambientales “latentes”. La interpretación se apoya con datos ambientales externos a través del análisis de correlación y regresión, un enfoque de dos pasos designado por ter Braak y Prentice (1988) como análisis de gradiente indirecto. El producto final es una gráfica, por lo general bidimensional, en la cual se aprecian las semejanzas ecológicas de las muestras o especies por su distancia (ter Braak, 1987; Huerta-Martínez y Guerrero-Vázquez, 2004). El diagrama de ordenación generado por el análisis canónico de correspondencia (CCA, por sus siglas en inglés), una técnica multivariable de análisis de gradiente directo (ter Braak, 1987), visualiza no solo un patrón de variación de la comunidad, como sucede en una ordenación estándar, sino también los rasgos principales de la distribución de especies en relación con las variables ambientales.

El reemplazo de las especies a lo largo de gradientes ambientales es gradual de acuerdo con la hipótesis del continuum (Austin, 1985; Austin, 1999; Pausas y Austin, 2001). Los análisis multivariados ayudan a clarificar cuáles factores ambientales contribuyen en el reemplazo de las especies y la estructura de la comunidad. Por ejemplo, los estudios realizados en ambientes secos y muy secos demuestran que los factores de mayor relevancia son: el relieve (Montaña, 1990; Valverde *et al.*, 1996), clima (Aguado-Santacruz *et al.*, 1996; Aguado-Santacruz y García-Moya, 1998), topografía del terreno y las propiedades del suelo (Parker, 1991; Abd El-Ghani y Amer, 2003; Li *et al.*, 2009). En sistemas insulares se han aplicado técnicas de clasificación y ordenación al análisis de comunidades vegetales para identificar factores correlacionados con la estructura y composición de la comunidad, tales como: material parental, exposición de ladera, altitud, precipitación y fertilidad del suelo (Fernández-Palacios y de Nicolás, 1995; Otto *et al.*, 2001; Smith y Steenkamp, 2001; Duarte *et al.*, 2005).

Los sistemas isleños de mayor relevancia en México se localizan en el noroeste, particularmente en el Golfo de California, con alrededor de 900 islas e islotes ubicados desde las cercanías de la desembocadura del río Colorado hasta el sur de Sinaloa (Case *et al.*, 2002; CONANP, 2008; 2009). De las 900 islas, en 250 se han realizado investigaciones científicas, ya que se caracterizan por tener baja perturbación antropógena, alta riqueza de especies, endemismo, refugio de grandes colonias de aves marinas, entre otras características biológicas y servicios ambientales (Case *et al.*, 2002). En la costa de Sinaloa existen cerca de 400 cuerpos insulares representados por islas, islotes, rocas, cayos, farallones y arrecifes (Flores-Campaña *et al.*, 2003), las cuales se caracterizan por una variedad de tamaños, formas, materiales de origen, altitudes, flora, fauna y belleza escénica. Aunque falta investigación para conocer los recursos de las islas de Sinaloa, se reconoce la importancia biológica de las mismas por contar con especies endémicas, ser zonas de refugio, percha, anidación y reproducción de aves marinas y terrestres de la región y migratorias. Se han hecho inventarios de la flora y descripción de la vegetación en islas de la Bahía de Mazatlán (Flores-Campaña *et al.*, 1996; Vega-Aviña *et al.*, 2001), en islas de las bahías de Navachiste y Macapule (Díaz, 2008) y en islas de la Bahía de Ohuira (Reyes-Olivas, 2002; Reyes-Olivas *et al.*, 2008) (Anexo 2). Otras investigaciones (Sánchez-Soto y Nolasco-Sánchez, 1999; Reyes-Olivas, 2002; Reyes-Olivas *et al.*, 2002) han abordado la estructura y biología de las comunidades vegetales de las islas, en particular las interacciones arbusto-nodriza; la germinación (Sánchez-Soto, 2003; Sánchez-Soto *et al.*, 2005; Urias-Castillo, 2005; Sánchez-Soto *et al.*, 2010); la mortalidad de cactáceas (Lugo-García, 2005) y la distribución y consumo de semillas (Valdez-Manzanares, 2009).

Esta investigación tiene como objetivo general, esclarecer el efecto de los factores biogeográficos y del medio sobre la estructura y composición de las comunidades vegetales, en 16 islas de la costa de Sinaloa, México. En particular se pretende: 1) Ajustar modelos especies-área para evaluar la

importancia de las variables biogeográficas, área y distancia al continente, en la predicción de la riqueza de especies vegetales, y 2) Dilucidar mediante análisis multivariados de clasificación y ordenación, cuáles son los factores del medio que explicarían la composición y estructura de las comunidades vegetales de los sistemas insulares sinaloenses.

Se parte de dos hipótesis: 1) Los modelos tradicionales de biogeografía de islas como el modelo exponencial y la función potencial proporcionarían ajustes robustos en la curva de especies-área en el sistema insular de Sinaloa, al tiempo que permitirían predecir de manera eficaz la riqueza de especies, y 2) Los factores del medio, en su mayoría, los relacionados con geomorfología y edafología condicionarían la estructura de las comunidades vegetales de las islas continentales seleccionadas para el estudio.

La información contenida en esta tesis se estructura de la siguiente manera:

El capítulo 1 esboza la Teoría del Equilibrio de Biogeografía Insular, fundamento, aplicación, limitaciones o críticas.

El capítulo 2 hace una comparación de los modelos tradicionales de biogeografía de islas con un tercer modelo propuesto en esta investigación para predecir el número de especies vegetales en sistemas isleños de la costa de Sinaloa.

El capítulo 3 considera métodos multivariados para clasificar y ordenar las comunidades vegetales en islas de Sinaloa, con base en los factores del medio que podrían ser determinantes en la distribución vegetal de los sistemas insulares.

El capítulo 4 presenta una discusión general de los temas centrales de la investigación, así como los hallazgos de esta investigación.

El capítulo 5 presenta las conclusiones generales.

Literatura citada

- Abd El-Ghani M.M. y Amer W.M. 2003. Soil-vegetation relationships in a coastal desert plain of southern Sinai, Egypt. *Journal of Arid Environments* **55**:607-628.
- Aguado-Santacruz G.A., García-Moya E., Velasco-González C. y Flores-Flores J.L. 1996. Importancia de los elementos climáticos en la variación florística temporal de pastizales semidesérticos. *Acta Botánica Mexicana* **35**:65-81.
- Aguado-Santacruz G.A. y García-Moya E. 1998. Environmental factors and community dynamics at the southernmost part of the North American Graminetum: I. On the contribution of climatic factors to temporal variation in species composition. *Plant Ecology* **135**:13-29.
- Anderson W.B. y Wait D.A. 2001. Subsidized island biogeography hypothesis: another new twist on an old theory. *Ecology Letters* **4**:289-291.
- Austin M.P. 1985. Continuum concept, ordination methods, and niche theory. *Annual Review of Ecology and Systematics* **16**:39-61.
- Austin M.P. 1999. The potential contribution of vegetation ecology to biodiversity research. *Ecography* **22**:465-484.
- Báldi A. 2008. Habitat heterogeneity overrides the species-area relationship. *Journal of Biogeography* **35**: 675-681.
- Barbour M.G., Burk J.H. y Pitts W.D. 1987. *Terrestrial plant ecology*. The Benjamin/Cummings Publishing Company Inc. Menlo Park, California. EE.UU. 634 pp.
- Case T.J., Cody M.L. y Ezcurra E. 2002. *A New Island Biogeography in the Sea of Cortés*. 2da. Ed. Oxford University Press Inc. New York, New York. EE.UU. 669 pp.
- CONANP. 2008. *Programa de Manejo: Área de Protección de Flora y Fauna "Islas del Golfo de California"*. CONANP-SEMARNAP. México, D.F.
- CONANP. 2009. *Área de Protección de Flora y Fauna "Islas del Golfo de California"*. <http://islasgc.conanp.gob.mx/>.
- Connor E.F. y McCoy E.D. 1979. The statistics and biology of the species-area relationship. *The American Naturalist* **113**:791-833.
- Díaz J.S. 2008. Diversidad florística y estructura de la vegetación de las islas de los sistemas lagunares Navachiste y Macapule, del norte de Sinaloa. Tesis de Maestría, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa-IPN, Guasave, Sinaloa, México. 132 pp.

- Duarte M.C., Rego F. y Moreira I. 2005. Distribution patterns of plant communities on Santiago Island, Cape Verde. *Journal of Vegetation Science* **16**:283-292.
- Fernández-Palacios J.M. y de Nicolás J.P. 1995. Altitudinal pattern of vegetation variation on Tenerife. *Journal of Vegetation Science* **6**:183-190.
- Fernández-Palacios J.M. 2004. Introducción a las islas. En: Fernández-Palacios J.M. y Morici C. Eds. *Ecología insular/ Island ecology*, pp. 21-55, Asociación Española de Ecología Terrestre (AEET)-Cabildo Insular de La Palma. Madrid, España.
- Flores-Campaña L.M., Vega-Aviña R., Benítez-Pardo D. y Hernández-Aguilera F. 1996. Flora de la isla Venados de la bahía Mazatlán, Sinaloa, México. *Anales del Instituto de Biología de la UNAM, Serie Botánica* **67**:283-301.
- Flores-Campaña L.M., Ortiz-Arellano M.A. y Arzola-González J.F. 2003. Islas e islotes de Sinaloa. En: Cifuentes-Lemus J.L. y Gaxiola-López J. Eds. *Atlas de los Ecosistemas de Sinaloa*, pp. 111-126, El Colegio de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México.
- Gauch H.G. 1982. *Multivariate analysis in community ecology*. Cambridge University Press. New York, New York. EE.UU. 298 pp.
- Huerta-Martínez F.M. y Guerrero-Vázquez S. 2004. *Ecología de comunidades*. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara. Zapopan, Jalisco. México. 124 pp.
- Kreft H., Jetz W., Mutke J., Kier G. y Barthlott W. 2008. Global diversity of island floras from a macroecological perspective. *Ecology Letters* **11**:116-127.
- Li X., Tan H., He M., Wang X. y Li X. 2009. Patterns of shrub species richness and abundance in relation to environmental factors on the Alxa Plateau: prerequisites for conserving shrub diversity in extreme arid desert regions. *Science in China Series D: Earth Sciences* **52**:669-680.
- Lomolino M.V. 2000. Ecology's most general, yet protean¹ pattern: the species-area relationship. *Journal of Biogeography* **27**:17-26.
- Lomolino M.V. y Weiser M.D. 2001. Towards a more general species-area relationship: diversity on all islands, great and small. *Journal of Biogeography* **28**:431-445.
- Lugo-García G.A. 2005. Mortalidad de cactáceas causada por herbívoros en una isla de Topolobampo, Sinaloa. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Sinaloa, Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México. 61 pp.

- MacArthur R.H. y Wilson E.O. 1967. *The theory of island biogeography*. Princeton University Press. Princeton, New Jersey. EE.UU. 203 pp.
- Montaña C. 1990. A floristic-structural gradient related to land forms in the southern Chihuahuan Desert. *Journal of Vegetation Science* **1**:669-674.
- Nogales M., Medina F.M., Quilis V. y González-Rodríguez M. 2001. Ecological and biogeographical implications of yellow-legged gulls (*Larus cachinnans* Pallas) as seed dispersers of *Rubia fruticosa* Ait. (Rubiaceae) in the Canary islands. *Journal of Biogeography* **28**:1137-1145.
- Nogales M., Padilla D.P., Nieves C., Illera J.C. y Traveset A. 2007. Secondary seed dispersal systems, frugivorous lizards and predatory birds in insular volcanic badlands. *Journal of Ecology* **95**:1394-1403.
- Otto R., Fernández-Palacios J.M. y Krüsi B.O. 2001. Variation in species composition and vegetation structure of succulent scrub on Tenerife in relation to environmental variation. *Journal of Vegetation Science* **12**:237-248.
- Parker K.C. 1991. Topography, substrate, and vegetation patterns in the northern Sonoran Desert. *Journal of Biogeography* **18**:151-163.
- Pausas J.G. y Austin M.P. 2001. Patterns of plant species richness in relation to different environments: an appraisal. *Journal of Vegetation Science* **12**:153-166.
- Preston F.W. 1962. The canonical distribution of commonness and rarity: Part I. *Ecology* **43**:185-215.
- Reyes-Olivas A. 2002. Patrones espaciales de cactáceas en el desierto costero de Topolobampo. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México, México. 184 pp.
- Reyes-Olivas A., García-Moya E. y López-Mata L. 2002. Cacti-shrub interactions in the coastal desert of northern Sinaloa, Mexico. *Journal of Arid Environments* **52**:431-445.
- Reyes-Olivas A., Apodaca-Ovalle V., Cota-Sánchez J.H. y Casillas-Álvarez P. 2008. Relación del suelo y la topografía con la diversidad y la estructura de la vegetación insular en el desierto costero de Sinaloa, México. En: Flores-Campaña L.M. Ed. *Estudios de las Islas del golfo de California*, pp. 53-66, Universidad Autónoma de Sinaloa-Gobierno del Estado de Sinaloa-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México.
- Ricklefs R.E. y Lovette I.J. 1999. The roles of island area *per se* and habitat diversity in the species-area relationships of four Lesser Antillean faunal groups. *Journal of Animal Ecology* **68**:1142-1160.
- Rosenzweig M.L. 1995. *Species diversity in space and time*. Cambridge University Press. New York, New York. EE.UU. 436 pp.

- Sánchez-Soto B.H. 2003. Germinación de semillas de cinco especies de cactáceas del desierto costero de Topolobampo, Ahome, Sinaloa. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de México, México. 90 pp.
- Sánchez-Soto B.H. y Nolasco-Sánchez M.J. 1999. Relación de *Echinocereus sciurus* var. *floresii* (Backeb.) N. P. Taylor (Cactaceae) con arbustos y rocas en el desierto costero de Topolobampo, Ahome, Sinaloa. Tesis de licenciatura, Universidad de Occidente, Los Mochis, Sinaloa, México. 61 pp.
- Sánchez-Soto B.H., García-Moya E., Terrazas T. y Reyes-Olivas A. 2005. Efecto de la hidratación discontinua sobre la germinación de tres cactáceas del desierto costero de Topolobampo, Ahome, Sinaloa. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas* **50**:4-14.
- Sánchez-Soto B.H., Reyes-Olivas A., García-Moya E. y Terrazas T. 2010. Germinación de tres cactáceas que habitan la región costera del noroeste de México. *Interciencia* **35**:299-305.
- Smith V.R. y Steenkamp M. 2001. Classification of the terrestrial habitats on Marion Island based on vegetation and soil chemistry. *Journal of Vegetation Science* **12**:181-198.
- Storch D., Evans K.L. y Gaston K.J. 2005. The species-area-energy relationship. *Ecology Letters* **8**:487-492.
- ter Braak C.J.F. 1987. The analysis of vegetation-environment relationships by canonical correspondence analysis. *Vegetatio* **69**:69-77.
- ter Braak C.J.F. y Prentice I.C. 1988. A theory of gradient analysis. *Advances in Ecological Research* **34**:235-282.
- Urias-Castillo J. 2005. Ecología de la germinación de *Ferocactus herrerae* J.G. Ortega, una cactácea endémica de la costa noroccidental de México. Tesis de licenciatura, Universidad de Occidente, Los Mochis, Sinaloa, México. 58 pp.
- Valdez-Manzanares A.E. 2009. Distribución y consumo de semillas de cactáceas en el desierto costero de Topolobampo. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Sinaloa, Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México. 74 pp.
- Valverde P.L., Zavala-Hurtado J.A., Montaña C. y Escurra E. 1996. Numerical analyses of vegetation based on environmental relationships in the southern Chihuahuan Desert. *The Southern Naturalist* **41**:424-433.
- Vega-Aviña R., Benítez-Pardo D., Flores-Campaña L.M. y Hernández-Álvarez F. 2001. Vegetación y flora de la isla Pájaros e isla Lobos de la bahía de Mazatlán, Sinaloa. *Listados Florísticos de México* **21**:1-19.

Wallace A.R. 1881. *Island Life*. Londres: Macmillan and Company.

Whittaker R.J. y Fernández-Palacios J.M. 2007. *Island bio-geography: ecology, evolution, and conservation*. Oxford University Press. Oxford. Reino Unido. 412 pp.

Wright D.H. 1983. Species-energy theory: an extension of species-area theory. *Oikos* **41**:496-506.

CAPÍTULO I. ASPECTOS RELEVANTES DE LA TEORÍA DEL EQUILIBRIO DE BIOGEOGRAFÍA DE ISLAS.

Resumen

Se realizan atisbos de la Teoría del Equilibrio de Biogeografía Insular, entre ellos, fundamento, aplicación y limitaciones. Se indican los modelos biogeográficos tradicionales, modelo exponencial y función potencial, los cuales explican la distribución de especies en función del tamaño y la distancia al continente de la isla.

Palabras clave: Teoría del Equilibrio de Biogeografía de Islas, modelo exponencial, función potencial, islas de Sinaloa, Alfred Russel Wallace, MacArthur y Wilson.

Abstract

Comments of the Theory of Island Biogeography, including foundation, application and limitations. The traditional biogeographic models exponential and power function, which explain the distribution of species in terms of area and distance to the mainland of the island.

Key words: Theory of island biogeography, model exponential, power function, islands of Sinaloa, Alfred Russel Wallace, MacArthur y Wilson.

Introducción

Las islas y los recursos bióticos insulares, han tenido, a lo largo de la historia, gran interés para biogeógrafos, ecólogos, taxónomos, genetistas, y conservacionistas, debido a que proporcionan información sobre los procesos evolutivos y ecológicos, en tiempo y espacio (Pozo y Llorente-Bousquets, 2002). Las aportaciones de mayor relevancia en el análisis de las propiedades biológicas de las islas fueron realizadas por cuatro personajes: los naturalistas británicos Alfred Russel Wallace (1823-1913) y Charles Robert Darwin (1809-1882) y los estadounidenses Robert Helmer MacArthur (1930-1972) y Edward Osborne Wilson. Wallace trabajó en isla

Ternate (pequeña isla volcánica localizada al noreste de Indonesia) y en otras islas del archipiélago Malayo (ubicado entre la parte continental del sudeste de Asia y Australia, entre los océanos Índico y Pacífico, y que cuenta con más de 25,000 islas), cuyas investigaciones lo consolidaron como el fundador de la Biogeografía Evolutiva y pionero de la Biogeografía Insular. Darwin se centró en la fauna del archipiélago de Colón (antes llamadas islas Galápagos, 126 unidades insulares que se sitúan en el océano Pacífico a 972 km de la costa de Ecuador), para formular la teoría de la evolución. MacArthur y Wilson, el primero ecólogo y el segundo entomólogo, propusieron la Teoría del Equilibrio de la Biogeografía de Islas (TEBI) (MacArthur y Wilson, 1963; 1967), un concepto novedoso en su tiempo, de gran interés biológico y aún vigente. La TEBI contribuyó a cambiar a la biogeografía, de una ciencia cualitativa y descriptiva, a cuantitativa y predictiva (Fernández-Palacios, 2004). Es importante destacar que durante las siguientes décadas de la generación de la TEBI, las islas fueron objeto de numerosas investigaciones para obtener evidencias que pudieran confirmar o rechazar sus hipótesis (Whittaker, 1998), al mismo tiempo, el conocimiento que generaba sirvió para sentar las bases teóricas de la biología de la conservación, particularmente sobre el diseño de reservas (Diamond, 1975; Simberloff y Abele, 1976; Shafer 1990; Soberón, 1992).

Modelos matemáticos en biogeografía insular

En el siglo XIX se realizaron los primeros planteamientos sobre la relación que existe entre el tamaño de una área determinada y el número de especies que se encuentran en ella (Watson, 1835 en Johnson y Simberloff, 1974; de Candolle, 1855 en McGuinness, 1984), pero fue hasta los años veinte del siglo XX cuando se propusieron los dos primeros modelos matemáticos, por cierto los de mayor aplicación, para describir la relación especies-área (Arrhenius, 1921; Gleason, 1922). 1) La función potencial que Arrhenius (1921) describe como: $S = k A^z$, equivale a una transformación

logarítmica doble: $\log S = \log k + z \log A$, y 2) El modelo exponencial o semi-logarítmico propuesto por Gleason (1922), el cual considera la transformación logarítmica del área: $S = \log k + z \log A$; donde: S es el número de especies, A el área, z el coeficiente de la pendiente en la regresión lineal (la cual varía muy poco entre los taxones o en un taxón dado en diferentes partes del mundo) y k, una constante relacionada con el intercepto, cuya variación es dependiente del taxón y de la región biogeográfica (Connor y McCoy, 1979; Rosenzweig, 1995). La aplicación de estos modelos matemáticos ha sido de interés para biogeógrafos, biólogos, ecólogos y conservacionistas, quienes las han empleado para estudiar diversos taxones vegetales, aves, insectos, mamíferos y peces, en su mayoría, de zonas templadas y tropicales (Rosenzweig, 1995; Lomolino *et al.*, 2010; Ladle y Whittaker, 2011), con la finalidad de diseñar reservas naturales, predecir extinciones durante colapsos bióticos por reducción de hábitats (Diamond, 1975; Ney-Nifle y Mangel, 2000; Drakare *et al.*, 2006), o cuando se requiere hacer la comparación entre regiones geográficas (Martínez-Salazar y González-Bernal, 2008). Es importante mencionar que existe una abundante literatura que analiza la relación especies-área de diferentes grupos taxonómicos, donde destacan Cain (1938), Connor y McCoy (1979), McGuinness (1984), Lomolino (1989), He y Legendre (1996), Lomolino (2000a), Scheiner (2003), Tjørve (2003), Dengler (2009), Tjørve (2009), Triantis *et al.* (2012), Whittaker y Triantis (2012), entre otros.

Fundamento de la teoría

La base de la Teoría del Equilibrio de la Biogeografía de Islas (MacArthur y Wilson, 1963; 1967) consiste en atribuir la riqueza biológica hipotéticamente a dos parámetros geográficos inherentes a la misma: 1) *distancia al continente*, ya que solo una fracción de las especies continentales podrán superar la barrera marina y alcanzar la isla, situación que controla la tasa de inmigración; la hipótesis establecería que la inmigración tenderá a disminuir a medida que aumenta la distancia entre

la isla y el continente, y 2) *superficie*, la variable que determinaría el tamaño poblacional que podría mantener a las especies insulares, bajo el supuesto de que la superficie de la isla controlaría la tasa de extinción: la hipótesis relacionada con la superficie de la isla sería que la extinción de las especies tendería a aumentar, si el tamaño de la isla es pequeño.

La aportación crucial del modelo (debido a que la extinción *in situ* y la inmigración están operando con el paso del tiempo), es su valor predictivo, porque permite suponer y por lo tanto, calcular, con procedimientos complementarios, cuál será la riqueza específica esperada en función del tamaño de la isla y la distancia al continente. Sin embargo hace abstracción de las especies y no resuelve cuáles serán las que se extinguirán, ya que en este caso están implícitas las respuestas de cada especie según sus habilidades competitivas y las propias historias de vida.

Combinando las hipótesis de la TEBI, Fernández-Palacios (2004) reitera que existirán dos situaciones extremas, donde la inmigración y extinción se relacionan de manera inversa: islas cercanas y grandes tienen más inmigración y menos extinción, lo que resultaría en una biota rica, semejante a la del continente; en contraste, islas alejadas y pequeñas, se caracterizarán por tasa baja de inmigración y tasa alta de extinción, con escaso reemplazo temporal de especies.

La virtud más importante de la teoría, es el acierto de sus autores al encontrar un sencillo esquema explicatorio del proceso de reemplazo de especies basado en tan solo dos atributos (inmigración, extinción) y dos variables (distancia al continente y superficie de la isla). Con el transcurso del tiempo, este modelo denominado TEBI (Figura 1) ha adquirido fuerza para decidir en asuntos de conservación de especies.

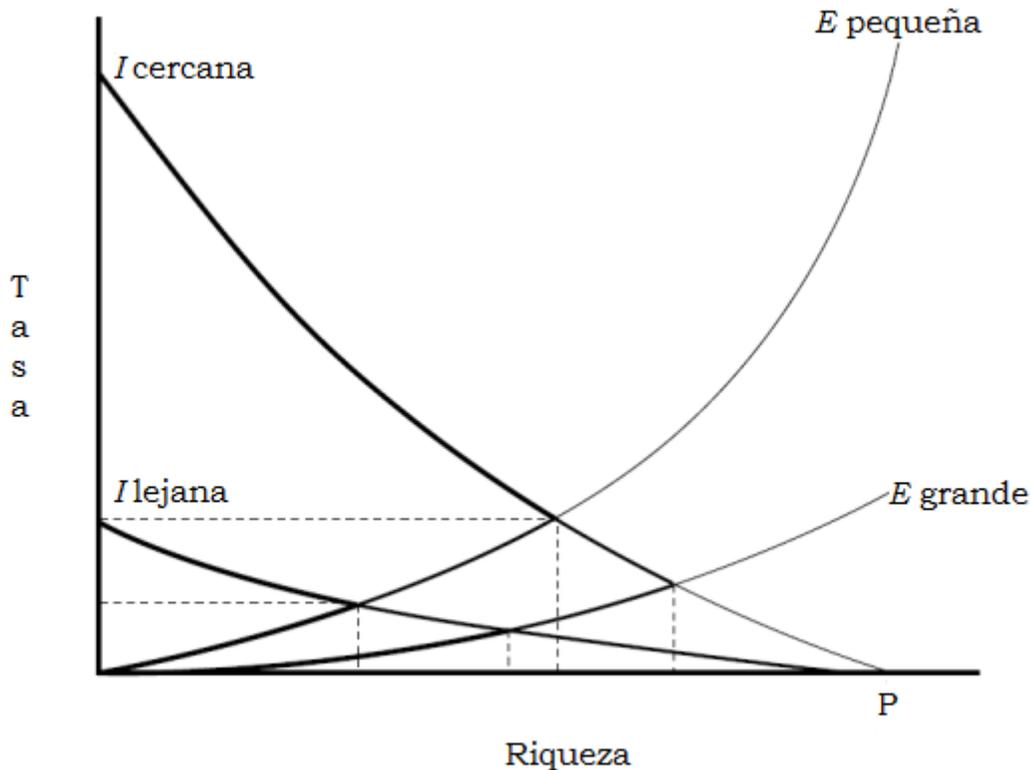


Figura 1. Modelo redibujado del propuesto en la Teoría del Equilibrio de la Biogeografía de Islas (MacArthur y Wilson, 1963; 1967). Tomado de: Fernández-Palacios (2004). Donde: I = tasa de inmigración, E = tasa de extinción y P = fuente de especies colonizadoras.

Limitaciones de la teoría

Los primeros estudios trataban de apoyar la TEBI pero a medida que se incrementaba el número de investigaciones para comprobarla, surgieron complicaciones al encontrarse situaciones en las que el modelo no se cumplía (Pozo y Llorente-Bousquets, 2002). Estos autores clasifican las críticas a la teoría en dos grupos, las que afirman que no se consideran diversos aspectos biológicos y las que presentan problemas de análisis estadísticos, siendo los aspectos más criticados los siguientes:

- 1) El modelo supone que las características particulares de las especies pueden ser ignoradas. Sin embargo, es claro que las poblaciones no presentan las mismas tasas de colonización.

- 2) El modelo ignora mecanismos ecológicos como las interacciones de las especies, en particular competencia y aspectos coevolutivos.
- 3) Los fenómenos de colonización y extinción se tratan como si fuesen procesos independientes, cuando pudieran ser un continuo o interdependientes.
- 4) El modelo propone que las especies existentes en una isla provienen de continentes o de islas cercanas, es decir, que no existen especies insulares derivadas por especiación anulándose el principio del fundador y la deriva génica.
- 5) El número de especies está íntimamente relacionado con la diversidad de hábitats (heterogeneidad ambiental).
- 6) El punto de vista estadístico que apunta hacia errores de distinta índole, en lo particular, relacionados con el esquema del muestreo, o del diseño de experimentos, que hacen que exista contradicción.

Lomolino (2000b) examina tres limitaciones fundamentales de la teoría:

- 1) A medida de que se amplían las escalas espacial y temporal se hace cada vez más claro que la mayoría de los sistemas no sólo son dinámicos en la composición de especies, sino que rara vez se puede alcanzar un número de especies en equilibrio. Esto es porque aunque la mayoría de los sistemas pueden inducir a la especiación, los principales eventos geológicos y climáticos, o perturbaciones antropógenas modificarían la fuente de especies o alterarían las tasas de inmigración y extinción antes de que el equilibrio se logre.
- 2) La teoría supone que los hábitats insulares y los filtros de inmigración (intervención de paisajes terrestres o marinos) son homogéneos dentro y entre archipiélagos. Por el contrario, gran parte de la variación observada en la composición de las especies insulares y la riqueza dentro de los archipiélagos puede resultar de la variación previsible en el hábitat y otras condicionantes ambientales entre las islas (por ejemplo, islas más grandes tienden a incluir una mayor diversidad de hábitats). Del mismo modo, las diferencias en los patrones de la

estructura de la comunidad entre los archipiélagos puede atribuirse a: diferencias en los filtros de inmigración (por ejemplo, los cuerpos de agua con y sin fuertes corrientes); la intervención de los paisajes dominados por diferentes hábitats, o bien a otros factores que varían en escalas geográficas, por ejemplo, temperatura y productividad a lo largo de gradientes latitudinales).

- 3) La teoría es neutral, es decir, asume que todas las especies son independientes y funcionalmente equivalentes (ignora la composición de especies y las interacciones bióticas). Sin embargo, como en muchos otros sistemas complejos, la estructura y dinámica de las comunidades insulares también se ven influidas por la retroalimentación ecosistémica. Fernández-Palacios (2009) critica que el aislamiento sea considerado el único factor que dicta la inmigración. Se ha demostrado que el aislamiento de una isla también juega un papel importante en la determinación de las tasas de extinción mediante el fenómeno conocido como *efecto de rescate*: reducción en la tasa de extinción en islas cercanas *versus* la de islas alejadas o inmigración suplementaria en islas cercanas (Brow y Kodric-Brown, 1977). Además, Whittaker (1998) cita otros elementos ignorados pero relacionados al efecto de rescate, como el pseudorecambio y el criptorecambio, la extinción asimétrica, o la falta de consideración de situaciones en desequilibrio.

Lomolino (2000b) y Fernández-Palacios (2004; 2009) destacan que el defecto mayor de la Teoría de la Biogeografía de Islas es haber ignorado el tercer proceso biogeográfico, *la especiación*, elemento de cambio que consideran, inclusive, como probablemente más importante que las variables originalmente planteadas: distancia al continente y el tamaño de la isla. Desde éste último supuesto, Lomolino (2000b) propone un nuevo modelo incluyente de este tercer proceso (Figura 2).

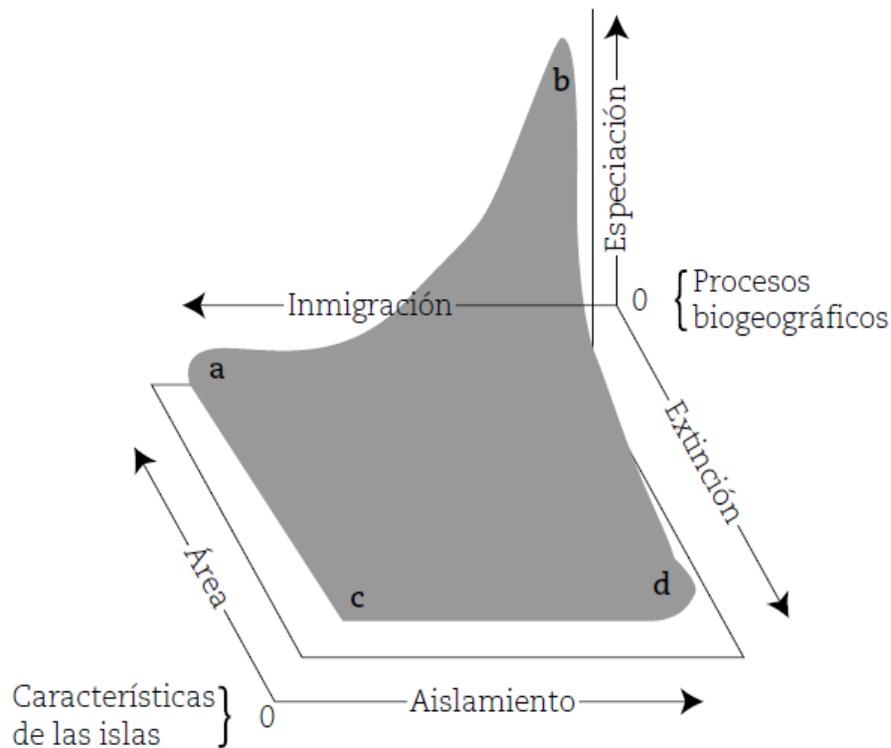


Figura 2. Modelo tridimensional de la biogeografía de islas, basado en los tres procesos biogeográficos fundamentales (inmigración, extinción y evolución), dependientes de las características de la isla en cuestión. a) moderada o relativamente alta riqueza específica, baja endemicidad y bajo recambio de especies; b) moderada a relativamente alta riqueza, alta endemicidad y bajo recambio de especies; c) de moderada a baja riqueza, baja endemicidad y alto recambio de especies; y d) islas pobres (Figura redibujada y traducida por Fernández-Palacios, 2004).

El modelo indicaría que:

- a) las tasas de inmigración pueden incrementarse conforme se aproximan a la región fuente y de manera equivalente con la capacidad de desplazamiento de las especies de interés.
- b) las tasas de extinción pueden reducirse a medida que el tamaño de la isla aumenta, o pudiesen incrementarse, a medida que aumentan los requerimientos de las especies de interés.
- c) la especiación puede ser más importante cuando las tasas de extinción e inmigración son menores, por lo tanto, la probabilidad de especiación

aumentaría con el tamaño de la isla y su aislamiento, pero disminuiría al incrementar los requerimientos y vagilidad (rapidez con que las poblaciones se dispersan para evitar el hacinamiento) de las especies involucradas.

- d) El área oscura de la Figura 2 indica los niveles relativos de riqueza específica.

Aplicación de la teoría en islas continentales de Sinaloa, México

La teoría de la biogeografía de islas no ha sido probada en las islas continentales mexicanas, pero hay cierto interés por estimar en algunas de las 400 islas cercanas a Sinaloa, México (Flores-Campaña *et al.*, 2003), el número probable de especies esperado, a partir de las variables originalmente implícitas en el modelo de MacArthur y Wilson, la distancia al continente y el tamaño de las islas.

La razón es que florísticamente, solo se tiene el conocimiento y la descripción de la flora y los tipos de vegetación de 23 islas de las bahías de Mazatlán (Flores-Campaña *et al.*, 1996; Vega-Aviña *et al.*, 2001), Navachiste-Macapule (Díaz, 2008) y Ohuira (Reyes-Olivas, 2002; Reyes-Olivas *et al.*, 2008) y se considera que, muestrear el total de islas sinaloenses para trabajos florísticos, sería un trabajo que demandaría gran cantidad de recursos humanos, de infraestructura y económicos. Antes de invertir para lograr los diferentes listados florísticos, sería conveniente predecir el número esperado de especies de acuerdo con el tamaño de las islas y su distancia del continente, como primer paso para un acercamiento a la definición de la posible riqueza de especies a registrar, pero también tendríamos previamente que probar, si las hipótesis que sustentan la teoría se cumplen en algunas islas seleccionadas, como muestra de la eficacia de las proyecciones matemáticas.

Esta propuesta de estudio en parte teórica y con objetivos prácticos a futuro, será puesta a investigación y discusión en el siguiente capítulo.

Conclusión

La revisión pretende dar un panorama general de los aspectos relevantes de la Teoría del Equilibrio de Biogeografía de Islas. La teoría ha sido ampliamente adoptada por biogeógrafos, biólogos, ecólogos y conservacionistas, ya que generó una revolución en el pensamiento geográfico y ecológico desde su inicio hasta nuestros días, al motivar investigaciones aplicadas a gran variedad de medios insulares y distintos taxa, con la finalidad, inicialmente, de apoyarla o contradecirla. La teoría se fundamenta en un enfoque cuantitativo diseñado para construir y probar modelos generales basados en procesos ecológicos, en los que el número de especies que habitan en una isla, representa un equilibrio entre tasas opuestas de extinción y colonización, y que estos procesos son función del tamaño de la isla y de su distancia a la fuente de colonizadores. El modelo en el que se fundamenta la TEBI, ha sido criticado desde la perspectiva biológica y estadística, resaltando además, la ausencia de la especiación como otro proceso biogeográfico, cuestión que recientemente fue resuelta por Lomolino (2000b), modificando la imagen de un sistema de coordenadas bidimensional a uno tridimensional. Por último, se considera interesante aplicar las variables implícitas en el modelo de MacArthur y Wilson, combinando con algunas ecuaciones de regresión (las típicas: Arrhenius y Gleason u otras) en islas de la costa de Sinaloa, México, en conjunto con hipótesis complementarias que contribuyan a estimar la riqueza específica en estos entornos como un indicador del trabajo potencial a efectuar, en el caso de acudir a las islas para realizar colectas botánicas y hacer análisis florísticos.

Literatura citada

- Arrhenius O. 1921. Species and area. *Journal of Ecology* **9**:95-99.
- Brown J.H. y Kodric-Brown A. 1977. Turnover rates in insular biogeography: effect of immigration on extinction. *Ecology* **58**: 445-449.

- Cain S.A. 1938. The species-area curve. *American Midland Naturalist* **19**:573-581.
- Connor E.F. y McCoy E.D. 1979. The statistics and biology of the species-area relationship. *The American Naturalist* **113**:791-833.
- Dengler J. 2009. Which function describes the species-area relationship best? A review and empirical evaluation. *Journal of Biogeography* **36**:728-744.
- Diamond J.M. 1975. The island dilemma: lessons of modern biogeographic studies for the design of natural reserves. *Biological Conservation* **7**:129-146.
- Díaz J.S. 2008. Diversidad florística y estructura de la vegetación de las islas de los sistemas lagunares Navachiste y Macapule, del norte de Sinaloa. Tesis de Maestría, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa-IPN, Guasave, Sinaloa, México. 132 pp.
- Drakare S., Lennon J.J. y Hillebrand H. 2006. The imprint of the geographical, evolutionary and ecological context on species-area relationships. *Ecology Letters* **9**:215-227.
- Fernández-Palacios J.M. 2004. Introducción a las islas. En: Fernández-Palacios J.M. y Morici C. Eds. *Ecología insular/ Island ecology*, pp. 21-55, Asociación Española de Ecología Terrestre (AEET)-Cabildo Insular de La Palma. Madrid, España.
- Fernández-Palacios J.M. 2009. Theory of island biogeography. En: Gillespie R.M. y Clague D. Eds. *Encyclopedia of Islands*. pp: 486-490. University of California Press. Berkeley, California. EE.UU.
- Flores-Campaña L.M., Ortiz-Arellano M.A. y Arzola-González J.F. 2003. Islas e islotes de Sinaloa. En: Cifuentes-Lemus J.L. y Gaxiola-López J. Eds. *Atlas de los Ecosistemas de Sinaloa*, pp. 111-126, El Colegio de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México.
- Flores-Campaña L.M., Vega-Aviña R., Benítez-Pardo D. y Hernández-Aguilera F. 1996. Flora de la isla Venados de la bahía Mazatlán, Sinaloa, México. *Anales del Instituto de Biología de la UNAM, Serie Botánica* **67**:283-301.
- Gleason H.A. 1922. On the relationship between species and area. *Ecology* **3**:158-162.
- He F. y Legendre P. 1996. On species-area relations. *The American Naturalist* **148**:719-737.
- Johnson M.P. y Simberloff D.S. 1974. Environmental determinants of island species numbers in the British Isles. *Journal of Biogeography* **1**:149-154.

- Ladle R.J. y Whittaker R.J. (Eds.). 2011. *Conservation biogeography*. Wiley-Blackwell. Oxford. Reino Unido. 301 pp.
- Lomolino M.V. 1989. Interpretations and comparisons of constants in the species-Area relationship: an additional caution. *The American Naturalist* **133**:277-280.
- Lomolino M.V. 2000a. Ecology's most general, yet protean¹ pattern: the species-area relationship. *Journal of Biogeography* **27**:17-26.
- Lomolino M.V. 2000b. A call for a new paradigm of island biogeography. *Global Ecology and Biogeography* **9**:1-6.
- Lomolino M.V. Riddle B.R. Whittaker R.J. y Brown J.H. 2010. *Biogeography*. Sinauer. Sunderland, Massachusetts. EE.UU. 878 pp.
- MacArthur R.H. y Wilson E.O. 1963. An equilibrium theory of insular zoogeography. *Evolution* **17**:373-387.
- MacArthur R.H. y Wilson E.O. 1967. *The theory of island biogeography*. Princenton University Press. Princeton, New Jersey. EE.UU. 203 pp.
- Martínez-Salazar E.A. y González-Bernal E.L. 2008. Recursos computacionales en biogeografía ecológica. Práctica 41. En: Martínez A.L., Castañeda-Sortibrán A.N., Morrone J.J. y Llorente-Bousquets J. Eds. *Manual de prácticas de biogeografía*, pp. 131-134, Las Prensas de Ciencias, UNAM, México.
- McGuinness K.A. 1984. Equations and explanations in the study of species-area curves. *Biological Reviews* **59**:423-440.
- Ney-Nifle M. y Mantel M. 2000. Habitat loss and changes in the species-area relationship. *Conservation Biology* **14**:893-898.
- Pozo C. y Llorente-Bousquets J. 2002. La teoría del equilibrio insular en biogeografía y conservación. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* **26**:321-339.
- Reyes-Olivas A. 2002. Patrones espaciales de cactáceas en el desierto costero de Topolobampo. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México, México. 184 pp.
- Reyes-Olivas A., Apodaca-Ovalle V., Cota-Sánchez J.H. y Casillas-Álvarez P. 2008. Relación del suelo y la topografía con la diversidad y la estructura de la vegetación insular en el desierto costero de Sinaloa, México. En: Flores-Campaña L.M. Ed. *Estudios de las Islas del golfo de California*, pp. 53-66, Universidad Autónoma de Sinaloa-Gobierno del Estado de Sinaloa-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México.
- Rosenzweig M.L. 1995. *Species diversity in space and time*. Cambridge University Press. New York, New York. EE.UU. 436 pp.
- Scheiner S.M. 2003. Six types of species-area curves. *Global Ecology and Biogeography* **12**: 441-447.

- Shafer C.L. 1990. *Nature reserves: island theory and conservation practice*. Smithsonian Institution Press, Washington, DC. EE.UU. 189 pp.
- Simberloff D.S. y Abele. L.G. 1976. Island biogeography and conservation: strategy and limitations. *Science* **193**:1032.
- Soberón J.M. 1992. Island biogeography and conservation practice. *Conservation Biology* **6**:161.
- Tjørve E. 2003. Shapes and functions of species-area curves: a review of possible models. *Journal of Biogeography* **30**:827-835.
- Tjørve E. 2009. Shapes and functions of species-area curves (II): a review of new models and parameterizations. *Journal of Biogeography* **36**:1435-1445.
- Triantis K.A., Guilhaumon F. y Whittaker R.J. 2012. The island species-area relationship: biology and statistics. *Journal of Biogeography* **39**: 215-231.
- Vega-Aviña R., Benítez-Pardo D., Flores-Campaña L.M. y Hernández-Álvarez F. 2001. Vegetación y flora de la isla Pájaros e isla Lobos de la bahía de Mazatlán, Sinaloa. *Listados Florísticos de México* **21**:1-19.
- Whittaker R.J. 1998. *Island Biogeography: Ecology, Evolution, and Conservation*. Oxford University Press. Oxford. Reino Unido. 285 pp.
- Whittaker R.J. y Triantis K.A. 2012. The species-area relationship: an exploration of that 'most general, yet protean pattern. *Journal of Biogeography* **39**: 623-626.

CAPÍTULO II. COMPARACIÓN DE MODELOS PREDICTIVOS DE RIQUEZA VEGETAL EN ISLAS DE LA COSTA DE SINALOA, MÉXICO.

Resumen

El conocimiento de la riqueza vegetal de las islas de Sinaloa es incipiente comparado con el de otras islas del Golfo de California, donde las investigaciones son diversas y existen inventarios de sus recursos bióticos. Con base en muestreo de campo y datos publicados de la composición florística de cinco islas de Sinaloa, se ajustaron modelos especies-área para evaluar la importancia de las variables biogeográficas en la predicción de la riqueza de especies vegetales. Los modelos clásicos de predicción de riqueza, modelo exponencial y función potencial, arrojaron valores de R^2 entre 0.20 y 0.25. La búsqueda de un mejor ajuste, nos indujo a modificar el modelo exponencial ($S = \ln k + z (2 \ln A)$) mediante extrapolación al cuadrado del logaritmo del área [$S = \ln k + z (\ln A)^2$], que resultó apropiado para las islas estudiadas por mostrar un poder predictivo del 96 a 98% y error comprobado al comparar el número observado de especies *versus* el esperado menor al 3% en el número de especies. Se concluye que la ecuación del modelo exponencial modificada en área [$S = \ln k + z (\ln A)^2$] puede ser utilizada para predecir la riqueza de plantas en islas vecinas cercanas al estado de Sinaloa, suponiendo que éstas presentan características biofísicas semejantes a los sistemas insulares analizados en esta investigación.

Palabras clave: Biogeografía, relación especies-área, predicción, isla, riqueza vegetal.

Abstract

Plant species richness in the islands of Sinaloa is poorly understood compared to other islands in the Gulf of California, where research is diverse and biological resource inventories have been carried out. Based on field sampling and previously published data about plant communities on the five islands of the coast of Sinaloa, species-area models were developed in order

to evaluate the importance of biogeographical variables in predicting plant species richness. The two basic models, exponential and power function, provided R^2 values between 0.20 and 0.25. Looking for a better fit, we modify the exponential model ($S = \ln k + z (2 \ln A)$) by extrapolating the square of the logarithm of the area [$S = \ln k + z (\ln A)^2$]; which rendered appropriate for the islands studied, since it showed a predictive power of 96-98%, with an error found when comparing the number of species observed *versus* expected, less than 3% in the number of species. We conclude that the equation modified exponential model in the term area, as $S = \ln k + z (\ln A)^2$ can be used to predict the plants species richness in neighboring islands nearest to Sinaloa mainland, assuming that there are biophysical characteristics similar to island systems analyzed in this research.

Key words: Biogeography, species-area relationship, prediction, island, plant species richness.

Introducción

El conocimiento científico de la riqueza vegetal de las islas de Sinaloa es incipiente, al compararlo con el de otras islas del Golfo de California (Cody *et al.*, 2002; Wilder *et al.*, 2008; Vanderplank y Mata, 2010), donde los estudios científicos son amplios. En la actualidad, se ha descrito la flora y vegetación de 23 de 400 islas (5.8%), aledañas a la costa de Sinaloa: Isla Venados, Pájaros y Lobos en Bahía de Mazatlán, Puerto de Mazatlán (Flores-Campaña *et al.*, 1996; Vega-Aviña *et al.*, 2001), de las 18 islas del sistema lagunar Navachiste-Macapule, Municipio de Guasave (Díaz, 2008) y la de las islas Mazocahui y Patos en Bahía de Ohuira, Puerto de Topolobampo (Reyes-Olivas, 2002; Reyes-Olivas *et al.*, 2008).

El conocimiento de la riqueza de las comunidades isleñas ha supuesto, desde hace tiempo, que el número de especies de una comunidad tiende a incrementarse en la medida que aumenta el área (Arrhenius, 1921; Gleason, 1922). La relación especies-área es una de las estimaciones empíricas más utilizadas para determinar el aumento en el número de especies conforme se

incrementa la superficie del área en estudio. En las islas, la superficie es variable por la intermitencia de aguas hacia terrenos no sumergidos, como consecuencia de las fluctuaciones del nivel del mar; de igual manera, la riqueza biológica cambia, en razón de circunstancias como vulnerabilidad ante la inundación e inclusive, por efecto de distintas profundidades, la sequía o la salinidad. También influye sobre la riqueza biológica, el flujo de especies, de modo que la inmigración, resulta favorable al proceso de colonización y persistencia de especies, mientras que la emigración afectaría la extinción.

Los cambios tanto de área como del número de especies, ya sea en islas oceánicas (Whittaker *et al.*, 2008; Fattorini, 2009) o en islas de fertilidad y vegetación en ambientes terrestres (García y McKell, 1970; González-Ruiz *et al.*, 2008; García-Sánchez *et al.*, 2012), generan una relación entre ambas variables cuya forma es curva más que lineal. Para explicar la relación especies-área se han utilizado diversos modelos de regresión. La función potencial (Arrhenius, 1921) descrita como: $S = k A^z$, la cual equivale a una doble transformación logarítmica: $\log S = \log k + z \log A$ y el modelo exponencial o semi-logarítmico (Gleason, 1922) que considera la transformación logarítmica del área, esto es $S = \log k + z \log A$; donde: S es el número de especies, A el área, z el coeficiente de la pendiente en la regresión lineal y k, una constante relacionada con el intercepto. Lozano-Zambrano *et al.* (2009) explican que la pendiente de la relación especies-área, representa el poder de escala entre las dos variables, al margen de la superficie de muestreo.

Soberón-Mainero y Llorente-Bousquets (1993) y Ávalos-Hernández (2008) señalan que el uso predictivo de las curvas de especies-área tiene sus condiciones:

- a) la curva exponencial se sugiere para taxones poco diversos o para áreas pequeñas, donde es posible recolectar todas las especies, ya que la probabilidad de añadir una especie nueva al listado disminuye conforme el tamaño del inventario aumenta y, que, en cuanto a la capacidad

predictiva, el modelo exponencial es asintótico, de manera que a partir de la ordenada al origen y la pendiente de la curva, es posible estimar el total de especies del área muestreada.

- b) la curva logarítmica debe utilizarse donde el área de la región es grande o donde existen taxones diversos, ya que la probabilidad de añadir una especie al inventario disminuye exponencialmente, sin importar el tamaño de la isla; además, debido a que el modelo logarítmico no es asintótico, no puede estimar el total de especies.

En cuanto al número de individuos, Lozano-Zambrano *et al.* (2009), apoyados en Hanski (1994) y Connor *et al.* (2000) afirman que la teoría de biogeografía de islas supone bajo el modelo logarítmico, que la densidad de especies permanece constante con el incremento del área y, dado que la riqueza de especies es una función positiva del área, implicaría que la densidad de un grupo de especies tiende a incrementarse en áreas grandes.

La función potencial y la exponencial han sido las ecuaciones más frecuentemente utilizadas para estimar riqueza de especies vegetales, de aves, insectos, mamíferos y peces, en su mayoría de zonas templadas y tropicales (Rosenzweig, 1995; Storch *et al.*, 2005; Frick *et al.*, 2008).

La aplicación de las ecuaciones de regresión que relacionan especies-área, ha sido tarea de interés para biogeógrafos, biólogos, ecólogos y conservacionistas (Lomolino *et al.*, 2010; Ladle y Whittaker, 2011), quienes tienen la encomienda de diseñar reservas naturales, predecir extinciones durante colapsos bióticos, explicar la reducción de hábitats (Lomolino, 2000; Ney-Nifle y Mangel, 2000; Drakare *et al.*, 2006), o cuando se requiere hacer la comparación entre regiones geográficas (Martínez-Salazar y González-Bernal, 2008). No obstante, hay mecanismos de respuesta a factores promotores e inhibidores para el establecimiento y persistencia o desaparición de las especies, y que en cierta forma, obliga a particularizar, según sea el caso, cuando se trata de explicar por extrapolación el número de especies. En este contexto, se han planteado distintas hipótesis que contribuyen al esclarecimiento de los patrones de riqueza de especies en los

sistemas insulares. Entre ellas: la relación de especies-energía (Wright, 1983), especies-área-energía (Storch *et al.*, 2005), heterogeneidad ambiental (Ricklefs y Lovette, 1999; Fox y Fox, 2000; Báldi, 2008), efecto de islas pequeñas (islas menores a 300 ha, donde la riqueza específica puede variar de manera independiente del área de la isla, debido a las características intrínsecas de las mismas) (Lomolino, 2000; Lomolino y Weiser, 2001; Triantis *et al.*, 2006), recursos alóctonos (Anderson y Wait, 2001) y mutualismo planta-animal (Nogales *et al.*, 2001, 2007).

Con base en el antecedente y con la finalidad de estimar la riqueza del sistema insular de Sinaloa mediante líneas de predicción, se buscó la relación especies-área para cinco islas de las 11 existentes en las bahías de Ohuira y Mazatlán. La intención de estas predicciones es optimizar recursos humanos, económicos y tiempo, para el registro de la riqueza vegetal de las islas, como anticipo al trabajo y solución de requerimientos para futuros estudios florísticos o de otra índole.

En consecuencia, los objetivos planteados para los cinco sistemas isleños elegidos son:

1. Probar las ecuaciones de especies-área potencial y logarítmica e introducir nuevas regresiones curvilíneas hasta obtener el mejor método de predicción de la riqueza de especies vegetales y,
2. Verificar que las variables área de islas y distancia al continente, bajo el modelo considerado estadísticamente de mejor ajuste como predictor de la riqueza esperada de especies vegetales, corresponda con el número de especies inventariadas en campo.

Se esperaría que el sistema insular de Sinaloa trabajado por diversos métodos de predicción, ajustase mejor a la curva de especies-área exponencial, y que entre el número de especies esperado y el observado haya equivalencia.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio. Las islas consideradas en esta investigación se localizan en dos de los cinco principales sistemas lagunares que existen en Sinaloa, México (Figura 3). En Bahía de Mazatlán, ubicadas frente al Puerto de Mazatlán entre los 23° 13' y 23° 15' Norte y los 106° 27' y 106° 28' Oeste, se muestrearon islas Pájaros, Venados y Lobos. En Bahía de Ohuira, municipio de Ahome, entre los 25° 32' y 25° 36' Norte y los 109° 03' y 109° 08' Oeste, se consideraron Patos y Mazocahui I.

Las islas de Bahía de Mazatlán están constituidas por rocas volcánicas que datan del Terciario Inferior (Alba-Cornejo *et al.*, 1979). Sin embargo, en Isla Pájaros y Venados existen áreas de antiguos aluviones y pie de monte, en donde, se han formado capas delgadas de suelo tipo chernozem, característico de zona húmeda (Flores-Campaña *et al.*, 1996). Las islas de Bahía de Ohuira surgieron hace seis a siete mil años (Phleger y Ayala-Castañares, 1969), pero su material parental ígneo data del Pleistoceno (López-Ramos, 1981). Las condiciones topográficas de las cinco islas bajo estudio es variable; por ejemplo, existen diferencias en: área, distancia al continente, altitud, cobertura rocosa; asimismo contrastan en propiedades edáficas como textura y nutrimentos.

Las condiciones climatológicas de Bahía de Mazatlán son del tipo Aw, tropical y subtropical, con temperatura mínima promedio de 19.7°C, máxima promedio de 28°C y media anual de 24.1°C. La precipitación media anual es de 800 mm, marzo y abril son los meses más secos mientras que agosto y septiembre son los más lluviosos. El clima de la Bahía de Ohuira es seco, con precipitación anual de 240 mm y temperatura promedio de 25°C. Las temperaturas mínimas extremas son de 5 a 13°C y las máximas extremas pueden alcanzar los 43°C (García, 1988).

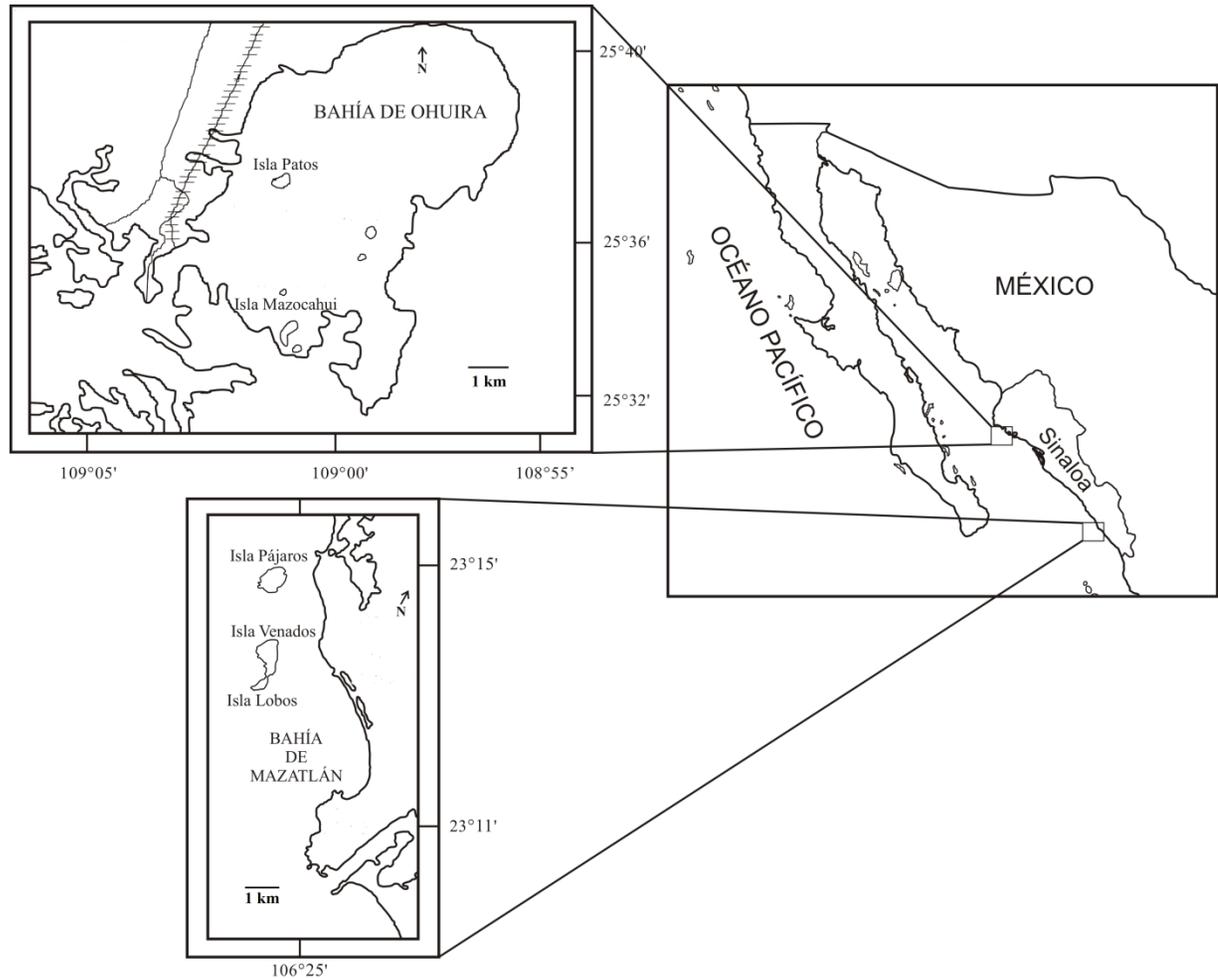


Figura 3. Localización geográfica de las bahías de Ohuira y Mazatlán en la costa de Sinaloa.

En Bahía de Mazatlán, los tipos de vegetación que cubren la Isla Pájaros son pastizal, bosque espinoso y vegetación halófito; en Isla Lobos existe matorral xerófito en baja densidad, pastizal y pastizal con matorral xerófito (Vega-Aviña *et al.*, 2001). La carpeta vegetal de Isla Venados corresponde al bosque espinoso, pastizal, matorral xerófito, asociaciones pastizal-matorral y vegetación halófito (Flores-Campaña *et al.*, 1996). En Bahía de Ohuira se ha registrado la vegetación en dos de sus seis islas; las especies vegetales en la Isla Patos conforman al tipo matorral xerófito con predominio de cactus (*Opuntia* spp.) en codominancia con *Bursera laxiflora* S. Watson, *Agave*

angustifolia Haw. y *Ziziphus pedunculata* (Brandege) Standl. (Reyes-Olivas *et al.*, 2008). En la Isla Mazocahui, el matorral incluye elementos del desierto y el bosque espinoso (Shreve, 1937), caracterizado por 16 cactus y algunas euphorbias y leguminosas (Reyes-Olivas, 2002).

Acopio de datos. El área de las islas, la distancia al continente y el número total de especies vegetales procede de cuatro publicaciones científicas acerca de la riqueza florística y tipos de vegetación de cinco islas del estado de Sinaloa: en Bahía de Ohuira: Mazocahui y Patos (Reyes-Olivas, 2002; Reyes-Olivas *et al.*, 2008), mientras que en Bahía de Mazatlán: Lobos, Pájaros y Venados (Flores-Campaña *et al.*, 1996; Vega-Aviña *et al.*, 2001). Los muestreos de riqueza de especies de plantas se realizaron en tres conjuntos (repeticiones) de unidades de muestro jerárquicas, de 1 x 1 m, 2 x 5 m, 10 x 10 m y 20 x 50 m. Las unidades de muestreo se delimitaron con cuerdas y se ubicaron en laderas expuestas al norte, sur, este, oeste y en la cima, y en todos los casos, sobre la parte media de la pendiente de la isla. Las especies consideradas en el inventario fueron las vasculares. El número de especies registrado se fue sumando por cada unidad de muestreo para producir una curva acumulada de especies-área por cada isla. El procedimiento permite trabajar una regresión entre el número de especies encontradas en cada una de las sub-unidades de muestreo (o su promedio cuando son varias) y el área muestreada bajo el supuesto de que la pendiente de la regresión representa la tasa de cambio con la cual se modifica o aproxima, el número de especies estimado según la escala de superficie aplicada.

Análisis de datos. Se aplicaron análisis de regresión lineal entre la distancia al continente y el número de especies; así mismo, entre el área de las islas y el número de especies vegetales. Para la determinación de la relación especies-área en las cinco islas, se utilizaron los modelos originalmente utilizados en biogeografía; el modelo exponencial o semi-logarítmico (Gleason, 1922) que considera la transformación logarítmica del área, $S = \log k + z \log A$, y la función potencial (Arrhenius, 1921) $S = k A^z$, equivalente a

una transformación logarítmica doble: $\log S = \log k + z \log A$. También se modificó el modelo exponencial en el término área, $S = \ln k + z (\ln A)^2$, con la intención de lograr un mejor ajuste estadístico.

Los parámetros de los modelos se describen como: S el número de especies, A el área, z el coeficiente de la pendiente de la regresión, y k una constante relacionada con el intercepto.

Los análisis de regresión se efectuaron con ayuda de los procedimientos NLIN y REG del programa SAS/STAT v. 9.0 (SAS Institute, 2002). El procedimiento NLIN utiliza el método reiterativo Gauss-Newton para estimar los parámetros, mientras que REG emplea el método de mínimos cuadrados.

Resultados

El área de la isla y su distancia al continente no muestran una relación significativa ($P > 0.05$) sobre el número de especies vegetales que habitan en las cinco islas estudiadas (Figura 4); sin embargo, se repiten tendencias ya conocidas, como que a mayor superficie de la isla, mayor número de especies y a mayor distancia al continente, menor número de especies.

Los modelos exponencial o semi-logarítmico y la función potencial o modelo logarítmico, aplicados a las dos variables biogeográficas: el área de las islas y la distancia de cada isla al continente, mostró ajustes pobres (escasa explicación de la varianza), mediante bajos coeficientes de determinación (0.20-0.25).

Para el *área de isla*, el modelo exponencial para la estimación de la riqueza específica está representado por $S = \log 59.15 + 23.23 \log A$ con valores de $R^2 = 0.22$, $F = 0.84$ y $P > 0.05$, mientras que, para la función potencial, la riqueza de especies está representada por $S = 30.27 A^{0.28}$ con un $R^2 = 0.21$, $F = 0.81$ y $P > 0.05$.

Las ecuaciones obtenidas en el análisis de la *distancia al continente* y el número de especies son: en el modelo exponencial $S = \log 4.78 \times 10^{33} - 14.25 \log A$, $R^2 = 0.20$, $F = 0.75$, $P > 0.05$ y, para la función potencial, $S = 72.24 A^{-0.193}$ y $R^2 = 0.25$, $F = 1.01$ y $P > 0.05$.

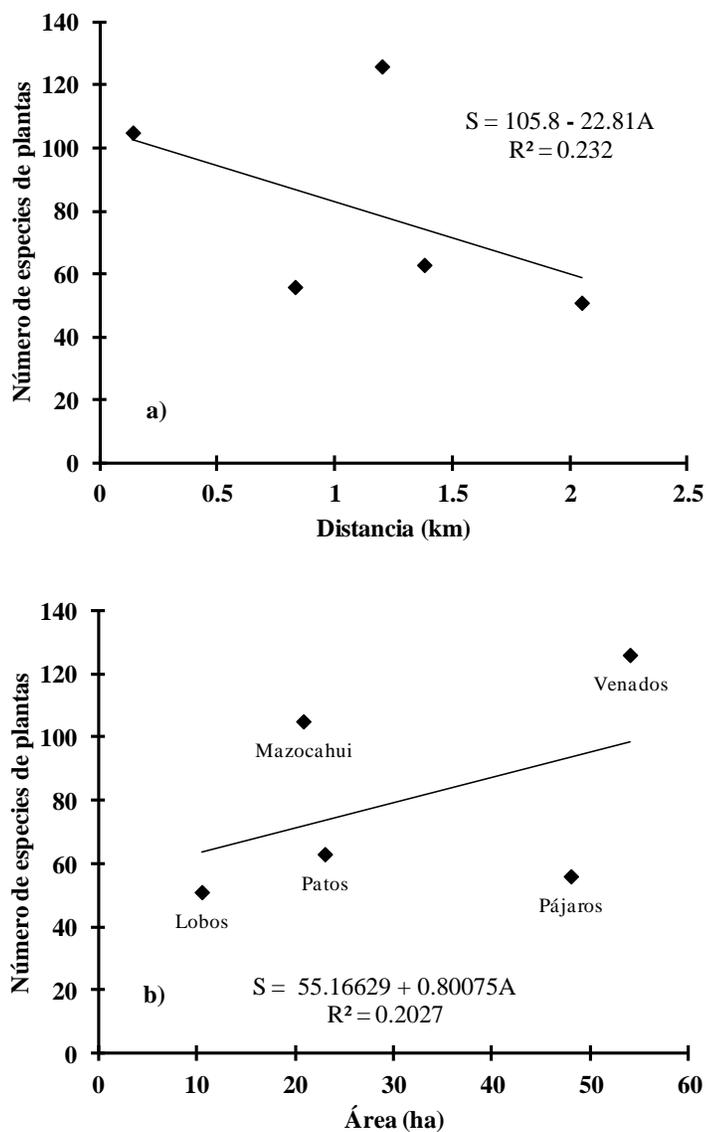


Figura 4. Relación lineal de la distancia al continente (a) y del área o superficie de la isla (b) con respecto al número de especies vegetales en las cinco islas de la costa de Sinaloa.

Al hacer una estimación de la proporción esperada de especies vegetales que hay en un hectárea de superficie de la isla, con base en la ecuación modificada $[S = \ln k + z (\ln A)^2]$, Patos $S = 1.2037 + 0.3875 (9.2103)^2$, Mazocahui $S = 7.3663 + 0.6527 (9.2103)^2$, Lobos $S = 3.2855 + 0.3796 (9.2103)^2$, Venados $S = 1.5297 + 0.6654 (9.2103)^2$ y Pájaros $S = 4.4589 + 0.3179 (9.2103)^2$, se encontró acertadamente, un aumento progresivo entre el número de especies de plantas y la superficie (Cuadro 1).

Cuadro 1. Número promedio de especies registradas en cada unidad de muestreo y las esperadas por hectárea, con base en los términos de la ecuación exponencial modificada en área [$S = \ln k + z (\ln A)^2$].

| Islas | Número promedio de especies | | | | |
|--------------|--|------|------|-------|-----------------------|
| | Observadas por área muestreada (m ²) (n=3) | | | | Esperadas |
| | 1 | 10 | 100 | 1 000 | 10,000 m ² |
| BO Patos | 2.0 | 04.7 | 09.3 | 16.7 | 34.1 |
| BO Mazocahui | 4.7 | 12.3 | 23.3 | 37.7 | 62.7 |
| BM Lobos | 3.0 | 07.0 | 12.3 | 18.0 | 35.5 |
| BM Venados | 4.0 | 10.3 | 16.3 | 22.0 | 58.0 |
| BM Pájaros | 2.4 | 05.8 | 12.8 | 21.0 | 31.4 |

BO= Bahía de Ohuira, BM=Bahía de Mazatlán.

El modelo de ecuación exponencial con área potenciada resultó apropiado con un poder predictivo del 96 al 98% y error menor al 3% en el número real de especies (Cuadro 2). En Isla Mazocahui se obtuvo una diferencia mínima de 0.30 en el número de especies esperadas *versus* las registradas en campo, mientras que, para Isla Venados se observó la mayor diferencia (8.5 especies), 117.5 especies esperadas contra 126 especies registradas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Verificación por comparación, del número de especies vegetales registradas en campo con las estimadas [$S = \ln k + z (\ln A)^2$].

| Isla | Superficie A (ha) | No. especies registradas | No. especies esperadas | k | z | R ² |
|--------------|-------------------|--------------------------|------------------------|------|------|----------------|
| BO Patos | 23.0 | 63 | 60.30 | 1.20 | 0.39 | 0.98 |
| BO Mazocahui | 20.8 | 105 | 105.30 | 7.37 | 0.65 | 0.96 |
| BM Lobos | 10.5 | 51 | 54.03 | 3.29 | 0.38 | 0.97 |
| BM Venados | 54.0 | 126 | 117.5 | 1.53 | 0.67 | 0.97 |
| BM Pájaros | 48.0 | 56 | 58.90 | 4.46 | 0.32 | 0.98 |

BO= Bahía de Ohuira, BM= Bahía de Mazatlán.

En la Figura 5 se muestran las curvas de especies-área generadas por la ecuación $S = \ln k + z (\ln A)^2$, sustituyendo cada término, con los resultados del Cuadro 2, para el caso de cada isla. Tanto la ordenada al origen como el coeficiente de regresión difieren significativamente de cero ($P < 0.0001$; prueba de t de Student), lo que indica que existe una asociación estrecha entre las variables área de la isla y número de especies vegetales esperadas.

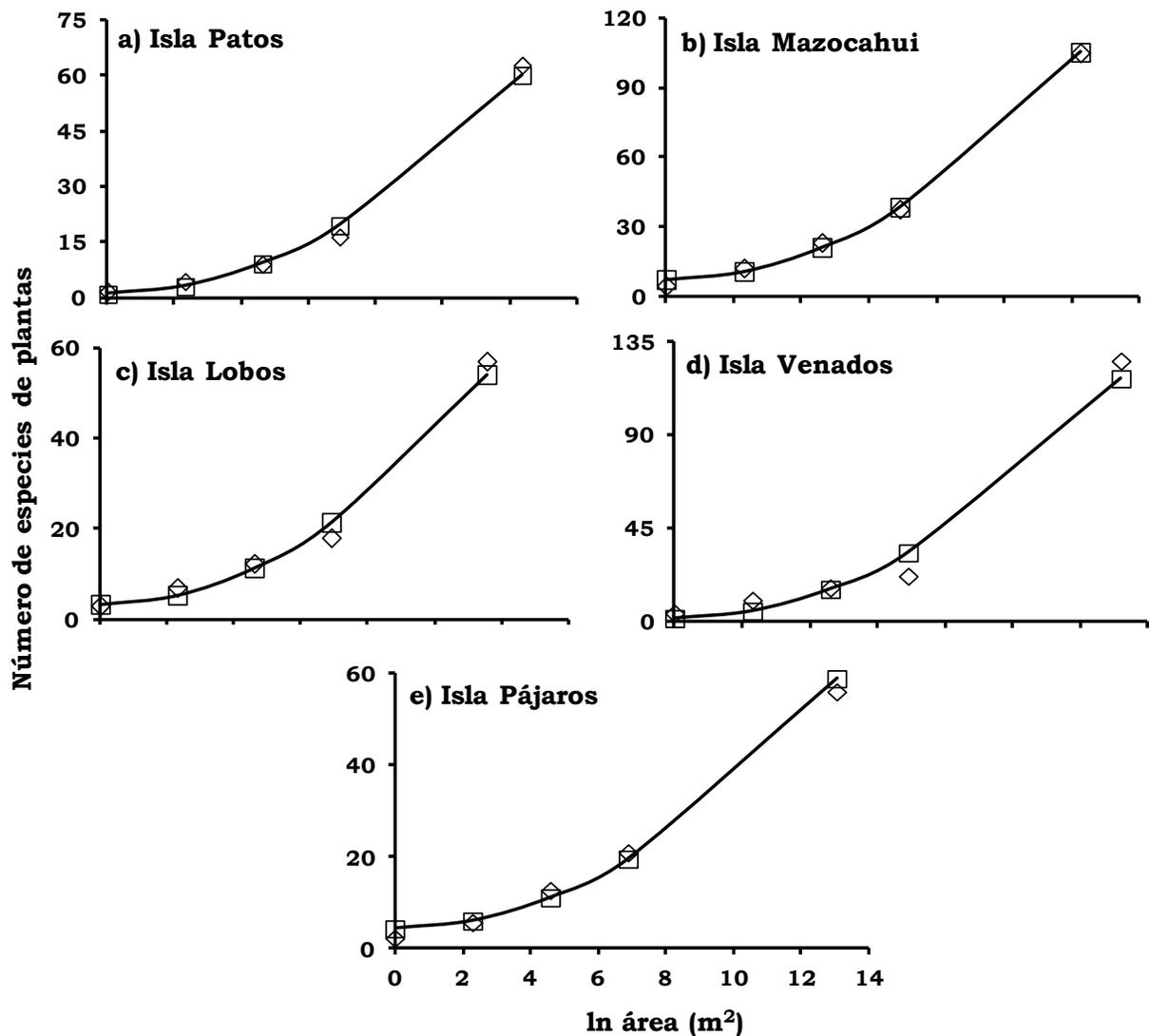


Figura 5. Ajuste del modelo $[S = \ln k + z (\ln A)^2]$ de la curva de especies-área en cinco islas de Sinaloa como estimador de la riqueza de especies vegetales. La superficie real en las gráficas es equivalente a (e^x) de cualquier número de la escala logarítmica. Valores registrados (◇) y valores esperados (□).

Discusión

La predicción del número de especies en las islas de Sinaloa con los modelos exponencial y potencial generaron coeficientes de determinación R^2 muy bajos (0.22), cercanos a los observados para islas del archipiélago del Egeo (0.312) con el modelo exponencial y (0.323) con el modelo potencial (Panitsa *et al.*, 2006). La baja proporción de la varianza explicada en este estudio, implica que los modelos tradicionales de la biogeografía de islas carecen de confiabilidad para explicar la riqueza de especies vegetales de los cinco sistemas insulares estudiados en Sinaloa. Asimismo, Connor y McCoy (1979) analizaron la relación especies-área de 100 bases de datos y observaron que la función potencial no proporcionó el mejor ajuste en 36 de ellas. Lo mismo se observó en plantas del Desierto Sonorense (Stiles y Scheiner, 2007). He y Legendre (1996) hicieron una comparación entre los modelos exponencial, potencial y logístico, al observar sus resultados destacaron al tercer modelo como el mejor para la extrapolación del número de especies. El interés por encontrar la ecuación matemática que explique adecuadamente la curva especies-área, ha generado el desarrollo de otros modelos que se diferencian por el método de muestreo, el análisis de datos y el objetivo del investigador (Scheiner, 2003; Tjørve, 2003; Dengler, 2009). En nuestro caso, la elección del estimador de riqueza a través del modelo exponencial modificado en área $S = \ln k + z (\ln A)^2$ ha permitido extrapolar el número de especies de plantas en islas de Sinaloa con exactitud.

Panitsa *et al.* (2006), Dengler y Boch (2008) y otros más (Fox y Fox, 2000; Anderson y Wait, 2001; Lomolino y Weiser, 2001) han mencionado que no sólo el área y la distancia explican la riqueza de especies en una isla determinada, sino que existen otros factores biofísicos o mecanismos de respuesta que influyen en el número y composición de especies. De hecho, la información obtenida en esta investigación muestra que existen otras variables involucradas en la determinación de la riqueza de especies vegetales en islas de la costa de Sinaloa. Por ejemplo, existe una diferencia de 42 especies en dos islas de tamaño semejante, Mazocahui (20 ha y 105

especies; Reyes-Olivas, 2002) y Patos (23 ha y 63 especies; Reyes-Olivas *et al.*, 2008), que se encuentran en la misma bahía con una separación del continente de 0.14 km y 1.38 km, mientras que entre ellas hay 5 km de distancia. El contraste notorio entre el número de especies de plantas al comparar estas dos islas, es atribuible en un 27% (varianza explicada por el segundo eje en la ordenación polar de la comunidad vegetal) a los aportes de guano (Reyes-Olivas *et al.*, 2008) que depositan 29 especies de aves marinas, constituidas por cerca de 10 mil individuos que residen o visitan la Isla Patos (Guevara-Estrada, 2006). En Isla Patos, el aporte de guano incrementa seis veces el contenido nitrógeno (147.7 ppm), 100 veces más fósforo (3,504 ppm) y cuatro veces más potasio (240 ppm) con respecto a Mazocahui, la isla que carece de enriquecimiento del suelo con fertilizante natural (Reyes-Olivas *et al.*, 2008).

Una respuesta semejante ocurre entre las islas de la Bahía de Mazatlán: Isla Venados tiene un área de 54 ha y registra 126 especies (Flores-Campaña *et al.*, 1996), mientras que Pájaros mide 48 ha y cuenta con 56 especies (Vega-Aviña *et al.*, 2001); la diferencia entre estas dos islas es de seis hectáreas y 70 especies. Las islas tienen una separación del continente de 1.2 km para la primera y 0.82 km para la segunda, la distancia entre ellas es de 1.5 km. La tercer isla denominada Lobos tiene 51 especies y 10.5 ha (Vega-Aviña *et al.*, 2001), un número de especies semejante al de Pájaros pero con una superficie menor (diferencia de 35.5 ha). Sin embargo, esta isla está prácticamente unida a Venados. Una explicación probable a las diferencias entre el número de especies de plantas en las Tres Islas de la Bahía de Mazatlán, es que en Pájaros, las aves marinas en su mayoría pelicanos, las utilizan para reproducción, anidación y percha; en cambio, en las dos islas restantes no hay comunidades aviares.

El efecto de los aportes de guano, en la riqueza de especies vegetales ha sido demostrado por Sánchez-Piñero y Polis (2000), Anderson y Wait (2001) y Wait *et al.* (2005) en las islas del golfo de California. La teoría de biogeografía de islas subsidiadas (Anderson y Wait, 2001) para describir patrones de

riqueza de especies en islas pequeñas (menores de 300 ha) y hábitats fragmentados. Los recursos alóctonos –el guano en islas marinas- ya explicados por Anderson y Wait (2001) condicionan la riqueza de especies, así que en parte, el efecto del área *per se* y sobre todo, calculada por un método de predicción, no necesariamente explica el número de especies que se encuentran en una isla, de ahí la importancia de los cotejos de campo para propósitos más puntuales basados en la riqueza de las especies, como para la determinación de: nuevas especies, endemismos, adaptaciones o diversificación de especies, e inclusive, para explicar interacciones bióticas. La forma exacta en que los aportes de guano alteran la riqueza de especies también depende de la cantidad de excretas depositadas (Anderson y Wait, 2001), ya que la tendencia al equilibrio natural de los ecosistemas es evidente, si contrastamos las observaciones de Sánchez-Piñero y Polis (2000) o Wait *et al.* (2005), quienes han demostrado que concentraciones altas de guano en sistemas insulares están directamente relacionadas con una baja riqueza de especies vegetales; esta respuesta es producto de la toxicidad causada por el alto contenido de nitrógeno o el pH ácido registrado en los suelos. Se sugiere explorar más directamente en campo, el efecto de la heterogeneidad ambiental producto de la presencia o ausencia de guano, diferencias edáficas y topográficas, otras diferencias implícitas en la especificidad de hábitats, impacto de huracanes, con el fin de sustentar la eficiencia de los modelos de predicción con la riqueza estimada de las especies vegetales en las islas Sinaloenses.

Conclusión

Los modelos clásicos de la biogeografía de islas (modelo exponencial y función potencial) son inadecuados para explicar la riqueza vegetal en islas de Sinaloa por la baja explicación de la varianza ($R^2 = 0.20-0.25$), mientras que la modificación al modelo exponencial mediante extrapolación al cuadrado del logaritmo del área, $[S = \ln k + z (\ln A)^2]$, una ecuación innovadora con respecto a lo ya publicado, permite hacer estimaciones del

número real de especies con un ajuste adecuado, poder predictivo del 96% al 98% y error menor al 3% con respecto al número real de especies. Se plantea que este modelo pudiese ser aplicado exitosamente para determinar la riqueza vegetal en islas vecinas de la costa sinaloense, con la intención de optimizar los recursos humanos, económicos y de tiempo, durante la realización de estudios florísticos o de otra índole. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, aún con un buen valor de predicción de la riqueza específica observada y estimada, existe un factor ambiental que parece incidir en la determinación de la riqueza entre islas de tamaño semejante pero diferente número de especies, y el cual apoya con datos de campo (indirectamente y derivado de otras investigaciones), la hipótesis de los recursos alóctonos. Tal factor (el guano de aves marinas), representa aportes exógenos al ciclo biogeoquímico que podría facilitar o inhibir (faltaría probarlo en las islas de Sinaloa), el establecimiento de especies.

Agradecimientos

El primer autor les da las gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada (No. 98895) para la realización de estudios doctorales en el Posgrado de Botánica del Colegio de Postgraduados. Asimismo se le reconoce a Fondos Mixtos de CONACyT-Gobierno de Sinaloa por el financiamiento de la investigación (SIN-2006-CO1-37439).

Literatura citada

- Alba-Cornejo V.M., Machado-Navarro A., González-Millán J., Herrera-Santoyo C., Ledesma-Vázquez J., Rico-Domínguez R., Rosales-Contreras E. y Vera-Morán A. 1979. Estudio sedimentológico de la Bahía de Puerto Viejo, Mazatlán, Sinaloa. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología-UNAM* **6**:97-120.
- Anderson W.B. y Wait D.A. 2001. Subsidized island biogeography hypothesis: another new twist on an old theory. *Ecology Letters* **4**:289-291.
- Arrhenius O. 1921. Species and area. *Journal of Ecology* **9**:95-99.

- Ávalos-Hernández O. 2008. Estimación de la riqueza de especies II: modelos predictivos y comparación de la riqueza de especies. Práctica 14. En: Martínez A.L., Castañeda-Sortibrán A.N., Morrone J.J. y Llorente-Bousquets J. Eds. *Manual de prácticas de Biogeografía*, pp. 34-38, Las prensas de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Báldi A. 2008. Habitat heterogeneity overrides the species-area relationship. *Journal of Biogeography* **35**: 675-681.
- Cody M., Rebman J., Moran R. y Thompson H.J. 2002. Plants. En: Case T.J., Cody M.L. y Ezcurra E. Eds. *A New Island Biogeography of the Sea of Cortés*. pp. 63-111. Oxford University Press, Inc. New York, New York. EE.UU.
- Connor E.F. y McCoy E.D. 1979. The statistics and biology of the species-area relationship. *The American Naturalist* **113**:791-833.
- Connor E.F., Courtney A.C. y Yoder J.M. 2000. Individuals-area relationships: the relationship between animal population density and area. *Ecology* **81**:734-748.
- Dengler J. 2009. Which function describes the species-area relationship best? A review and empirical evaluation. *Journal of Biogeography* **36**:728-744.
- Dengler J. y Boch S. 2008. Sampling-design effects on properties of species-area relationships - a case study from Estonian dry grassland communities. *Folia Geobotanica* **43**:289-304.
- Díaz J.S. 2008. Diversidad florística y estructura de la vegetación de las islas de los sistemas lagunares Navachiste y Macapule, del norte de Sinaloa. Tesis de Maestría, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa-IPN, Guasave, Sinaloa, México. 132 pp.
- Drakare S., Lennon J.J. y Hillebrand H. 2006. The imprint of the geographical, evolutionary and ecological context on species-area relationships. *Ecology Letters* **9**:215-227.
- Fattorini S. 2009. On the general dynamic model of oceanic island biogeography. *Journal of Biogeography* **36**: 1100-1110.
- Flores-Campaña L.M., Vega-Aviña R., Benítez-Pardo D. y Hernández-Aguilera F. 1996. Flora de la isla Venados de la bahía Mazatlán, Sinaloa, México. *Anales del Instituto de Biología de la UNAM, Serie Botánica* **67**:283-301.
- Fox B.J. y Fox M.D. 2000. Factors determining mammal species richness on habitat islands and isolates: habitat diversity, disturbance, species interactions and guild assembly rules. *Global Ecology and Biogeography* **9**:19-37.

- Frick W.F., Hayes J.P. y Heady P.A. 2008. Island biogeography of bats in Baja California, Mexico: patterns of bat species richness in a near-shore archipelago. *Journal of Biogeography* **35**:353-364.
- García E. 1988. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones particulares de la República Mexicana)*. Offset Larios. México, D.F. 252 pp.
- García-Moya E. y McKell C.M. 1970. Contribution to the nitrogen economy of a desert-wash plant community. *Ecology* **51**: 81-88.
- García-Sánchez R., Camargo-Ricalde S.L., García-Moya E., Luna-Cavazos M., Romero-Manzanares A. y Montaña N.M. 2012. *Prosopis laevigata* and *Mimosa biuncifera* (Leguminosae), jointly influence plant diversity and soil fertility of a Mexican semiarid ecosystem. *Revista de Biología Tropical/ International Journal of Tropical Biology and Conservation* **60**:87-103.
- Gleason H.A. 1922. On the relationship between species and area. *Ecology* **3**:158-162.
- González-Ruiz T., Rodríguez Z.S. y Ferrera-Cerrato R. 2008. Fertility islands around *Prosopis laevigata* and *Pachycereus hollianus* in the drylands of Zapotitlán Salinas, México. *Journal of Arid Environments* **72**: 1202-1212.
- Guevara-Estrada A. 2006. Riqueza y abundancia de aves en isla Patos, bahía de Ohuira, Sinaloa, México, 2003. Tesis de Licenciatura, Universidad de Occidente, Unidad Los Mochis. Los Mochis, Sinaloa, México. 40 pp.
- Hanski I. 1994. Patch-occupancy dynamics in fragmented landscapes. *Trends in Ecology and Evolution* **9**:131-135.
- He F. y Legendre P. 1996. On species-area relations. *The American Naturalist* **148**:719-737.
- Ladle R.J. y Whittaker R.J. (Eds.). 2011. *Conservation biogeography*. Wiley-Blackwell, Oxford. Reino Unido. 301 pp.
- Lomolino M.V. 2000. Ecology's most general, yet protean¹ pattern: the species-area relationship. *Journal of Biogeography* **27**:17-26.
- Lomolino M.V. y Weiser M.D. 2001. Towards a more general species-area relationship: diversity on all islands, great and small. *Journal of Biogeography* **28**:431-445.
- Lomolino M.V., Riddle B.R., Whittaker R.J. y Brown J.H. 2010. *Biogeography*. Sinauer. Sunderland, Massachusetts. EE.UU. 878 pp.
- López-Ramos E. 1981. *Geología de México*. Vol. 3. México, D. F. 446 pp.
- Lozano-Zambrano F.H., Ulloa-Chacón P. y Armbrecht I. 2009. Hormigas: relaciones especies-área en fragmentos de bosque seco tropical. *Neotropical Entomology* **38**:44-54.

- Martínez-Salazar E.A. y González-Bernal E.L. 2008. Recursos computacionales en biogeografía ecológica. Práctica 41. En: Martínez A.L., Castañeda-Sortibrán A.N., Morrone J.J. y Llorente-Bousquets J. Eds. *Manual de prácticas de biogeografía*, pp. 131-134, Las Prensas de Ciencias, UNAM, México.
- Ney-Nifle M. y Mantel M. 2000. Habitat loss and changes in the species-area relationship. *Conservation Biology* **14**:893-898.
- Nogales M., Medina F.M., Quilis V. y González-Rodríguez M. 2001. Ecological and biogeographical implications of yellow-legged gulls (*Larus cachinnans* Pallas) as seed dispersers of *Rubia fruticosa* Ait. (Rubiaceae) in the Canary islands. *Journal of Biogeography* **28**:1137-1145.
- Nogales M., Padilla D.P., Nieves C., Illera J.C. y Traveset A. 2007. Secondary seed dispersal systems, frugivorous lizards and predatory birds in insular volcanic badlands. *Journal of Ecology* **95**:1394-1403.
- Panitsa M., Tzanoudakis D., Triantis K.A. y Sfenthourakis S. 2006. Patterns of species richness on very small islands: the plants of the Aegean archipelago. *Journal of Biogeography* **33**:1223-1234.
- Phleger F.B. y Ayala-Castañares A. 1969. Marine geology of Topolobampo lagoons, Sinaloa, México. pp. 101-136. Memorias del Simposium Internacional sobre Lagunas Costeras. UNAM-UNESCO. México, D. F.
- Reyes-Olivas A. 2002. Patrones espaciales de cactáceas en el desierto costero de Topolobampo. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México, México. 184 pp.
- Reyes-Olivas A., Apodaca-Ovalle V., Cota-Sánchez J.H. y Casillas-Álvarez P. 2008. Relación del suelo y la topografía con la diversidad y la estructura de la vegetación insular en el desierto costero de Sinaloa, México. En: Flores-Campaña L.M. Ed. *Estudios de las Islas del golfo de California*, pp. 53-66, Universidad Autónoma de Sinaloa-Gobierno del Estado de Sinaloa-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México.
- Ricklefs R.E. y Lovette I.J. 1999. The roles of island area *per se* and habitat diversity in the species-area relationships of four Lesser Antillean faunal groups. *Journal of Animal Ecology* **68**:1142-1160.
- Rosenzweig M.L. 1995. *Species diversity in space and time*. Cambridge University Press. New York, New York. EE.UU. 436 pp.
- Sánchez-Piñero F. y Polis G.A. 2000. Bottom-up dynamics of allochthonous input: direct and indirect effects of seabirds on islands. *Ecology* **81**:3117-3132.
- SAS Institute Inc. 2009. *SAS/STAT User's Guide Release 9.2*. SAS Institute, Cary, North Carolina. EE.UU. 7869 pp.

- Scheiner S.M. 2003. Six types of species-area curves. *Global Ecology and Biogeography* **12**: 441-447.
- Shreve F. 1937. Lowland vegetation of Sinaloa. *Bulletin Torrey Botanical Club* **64**:605-613.
- Soberón-Mainero J. y Llorente-Bousquets J. 1993. The use of species accumulation functions for the prediction of species richness. *Conservation Biology* **7**:480-488.
- Stiles A. y Scheiner S.M. 2007. Evaluation of species-area functions using Sonoran Desert plant data: not all species-area curves are power functions. *Oikos* **116**:1930-1940.
- Storch D., Evans, K.L. y Gaston K.J. 2005. The species-area-energy relationship. *Ecology Letters* **8**:487-492.
- Tjørve E. 2003. Shapes and functions of species-area curves: a review of possible models. *Journal of Biogeography* **30**:827-835.
- Triantis K.A., Vardinoyannis K., Tsolaki E.P., Botsaris I., Lika K. y Mylonas M. 2006. Re-approaching the small island effect. *Journal of Biogeography* **33**:914-923.
- Vanderplank S. y Mata S. 2010. The succulent scrub of San Martín Island, Baja California, Mexico. *Cactus and Succulent Journal* **82**:252-258.
- Vega-Aviña R., Benítez-Pardo D., Flores-Campaña L.M. y Hernández-Álvarez F. 2001. Vegetación y flora de la isla Pájaros e isla Lobos de la bahía de Mazatlán, Sinaloa. *Listados Florísticos de México* **21**:1-19.
- Wait D.A., Aubreya D.P. y Anderson W.B. 2005. Seabird guano influences on desert islands: soil chemistry and herbaceous species richness and productivity. *Journal of Arid Environments* **60**:681-695.
- Whittaker R.J., Triantis K.A. y Ladle R.J. 2008. A general dynamic theory of oceanic island biogeography. *Journal of Biogeography* **35**:977-994.
- Wilder B., Felger R. y Romero-Morales H. 2008. Succulent plant diversity of the Sonoran islands, Gulf of California, Mexico. *Haseltonia* **14**:127-160.
- Wright D.H. 1983. Species-energy theory: an extension of species-area theory. *Oikos* **41**:496-506.

CAPÍTULO III. GRADIENTES AMBIENTALES EN LA VEGETACIÓN DE ISLAS DE LA COSTA DE SINALOA, MÉXICO.

Resumen

Se usaron datos de cobertura vegetal de 29 especies de plantas perennes y 25 variables del medio en 57 sitios, para investigar las relaciones entre la vegetación y el medio en 16 islas de la costa de Sinaloa, México. La clasificación se realizó mediante el análisis de conglomerados, mientras que para la ordenación de la vegetación se utilizó el análisis de correspondencia linealizado (DCA) y el análisis de correspondencia canónica (CCA). Los análisis multivariantes advierten que los factores geomorfológicos y edáficos influyen, de manera directa, en la distribución de las especies vegetales en las 16 islas de la costa de Sinaloa. El efecto de tales factores es notorio en tres grupos de islas: 1) islas con recursos alóctonos de guano de aves marinas, 2) sistemas insulares de origen volcánico con cobertura alta de rocas, y 3) islas arenosas. El primer gradiente está relacionado con nitratos y pH, mientras que el segundo eje se correlaciona con calcio, cobertura de rocas, pendiente, porcentaje de arena, limo, materia orgánica, profundidad del suelo y fosfatos. Se concluye que los factores geomorfológicos y edáficos son los que mejor explican la estructura de la vegetación en las islas estudiadas de la costa de Sinaloa.

Palabras clave: análisis multivariable, estructura de la comunidad, islas de Sinaloa, factores geomorfológicos y edáficos.

Abstract

Cover data of 29 perennial plants species and 25 environmental variables in 57 sites, were used to investigate vegetation-environment relationships in 16 islands off the coast of Sinaloa, Mexico. The classification was performed by cluster analysis, while the analysis of the vegetation by means detrended correspondence analysis (DCA) and canonical correspondence analysis (CCA). Multivariate analyzes clarify that geomorphological and edaphic

factors influence, directly, in the distribution of plant species of the 16 islands off the coast of Sinaloa. The effect of such factors is evident in three island groups: 1) allochthonous resources islands with seabird guano, 2) volcanic island systems with high rock cover, and 3) sandy islands. The first gradient is related to nitrates and pH, while the second axis is correlated with, stone cover, soil depth, slope, percentage of sand, silt, organic matter, calcium content and phosphates. It is concluded that geomorphological and edaphic factors are that most important environment factors explaining the organization of the vegetation on the islands off the coast of Sinaloa.

Key words: multivariate analysis, community structure, islands of Sinaloa, geomorphological and edaphic factors.

Introducción

Los retos de la ecología de comunidades vegetales son identificar los factores que controlan la distribución, abundancia y diversidad de especies, y esclarecer la composición de las comunidades de plantas (Barton, 1993). La estructura y composición de las comunidades vegetales cambian de manera gradual a lo largo de gradientes ambientales principalmente relacionados con clima, topografía y suelo (Austin, 1985; Menge y Olson, 1990; Austin, 1999; Pausas y Austin, 2001). De esta manera, son múltiples los factores del medio que se involucran en la definición de la estructura y composición de las comunidades de plantas. Por ejemplo, algunos autores (Whittaker y Niering, 1975; Yeaton y Cody, 1979; McAuliffe, 1994; Valverde *et al.*, 1996), resaltan los factores del relieve, mientras que el clima es relevante de acuerdo con O'Brien (1993), Nobel (1994) y González-Medrano (1996), aunque la mayor importancia se confiere a factores topográficos y propiedades del suelo (Phillips y MacMahon, 1978; Parker, 1991; Abd El-Ghani, 2000; Abd El-Ghani y Amer, 2003; Arshad *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2009).

Los estudios que utilizan métodos multivariantes para explicar la estructura de comunidades vegetales que habitan en medios secos y muy secos en nuestro país son limitados y efectuados en paisajes continentales (Key *et al.*, 1984; Ezcurra *et al.*, 1987; Valverde *et al.*, 1996; León de la Luz *et al.*, 2000; Villers-Ruiz *et al.*, 2003; Sánchez-Mejía *et al.*, 2007). En estos entornos, el potencial de evapotranspiración excede la precipitación anual, lo que trae consigo poca disponibilidad de agua, por lo cual se asume que ésta es el factor limitativo en estos sitios (Tueller *et al.*, 1991; León de la Luz *et al.*, 2000; Paruelo *et al.*, 2000; Pavón *et al.*, 2000).

En zonas secas y muy secas del noroeste de México se ha probado que los cambios en la composición de la comunidad vegetal se correlacionan con la variación en la salinidad y el tamaño medio de las partículas del suelo, como lo descrito en una bajada del desierto Sonorense, cerca de Bahía de Kino, Sonora (Key *et al.*, 1984) o lo registrado en la barra arenosa El Mogote en Baja California Sur (Romero-López *et al.*, 2006). En la región del Pinacate, Sonora, la cual está en el Gran Desierto, uno de los más secos de Norte América, el suelo y la diferencia en relieves son las variables que predicen la variación vegetal en estos entornos; a escala local, la distribución y riqueza de las especies de plantas están determinadas por la altitud y la cobertura de rocas (Ezcurra *et al.*, 1987). Villers-Ruiz *et al.* (2003) resaltan que la altitud, la precipitación, la temperatura y el tipo de rocas son las variables que determinan las diferencias florísticas entre el bosque tropical caducifolio y el matorral xerófilo en la Región del Cabo, península de Baja California.

En el noreste del territorio mexicano, específicamente en la región sur del desierto Chihuahuense, Valverde *et al.* (1996) explican que el gradiente florístico observado está determinado por la geomorfología (relieve y material parental) mientras que en la subprovincia geográfica de Mapimí, la riqueza de especies cambia con el relieve (Montaña, 1990). Por igual, en El Huizache, San Luis Potosí la geomorfología, el clima y el suelo son

determinantes en la distribución vegetal (Huerta-Martínez, 2000; Huerta-Martínez y García-Moya, 2004; Huerta-Martínez *et al.*, 2004).

Los estudios en sistemas insulares que emplean métodos de clasificación y ordenación para esclarecer la estructura y composición de comunidades vegetales, corresponden con los realizados en el Archipiélago de las Canarias (Fernández-Palacios, 1992; Fernández-Palacios y de Nicolás, 1995; Fernández-Palacios, 1997; Otto *et al.*, 2001) y el Archipiélago Cabo Verde (Duarte *et al.*, 2005), que demuestran el efecto de la altitud (correlacionada con la temperatura y precipitación), la exposición y pendiente de la ladera, el relieve, la humedad y fertilidad del suelo. El efecto de la exposición y la pendiente algunas veces es considerado de manera conjunta, por la relación que existe entre la inclinación de las superficies y los niveles de radiación solar (Lakhani y Davis, 1982; Arteaga, 1988; Gastélum-Felix, 2004).

Solo en Isla Socorro, Archipiélago de Revillagigedo, México, se han hecho investigaciones que resalten el papel de la precipitación, la altitud, la topografía, el clima, la exposición de ladera y el tipo de suelo en la distribución de las plantas (León de la Luz *et al.*, 1996; Flores-Palacios *et al.*, 2009). Reyes-Olivas *et al.* (2008) en islas de la costa de Sinaloa uso métodos multivariados para el análisis de la vegetación, encontrando que, los determinantes de la comunidad vegetal fueron un gradiente aridez relacionado con la exposición, la profundidad y la cobertura de rocas, y un gradiente químico propiciado por el guano de aves marinas.

Las islas continentales de Sinaloa se caracterizan por variedad de tamaño, forma, altitud, material parental, flora, fauna, belleza escénica, entre otros atributos, razones por las que se intenta esclarecer, con ayuda de los análisis multivariados de clasificación y ordenación, cuáles factores del medio explican la composición y estructura de las comunidades vegetales de 16 islas de la entidad, partiendo de la hipótesis de que la geomorfología y edafología condicionan la distribución de las plantas en esos entornos.

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio.- El estado de Sinaloa se ubica en el noroeste del México a los 27° 02' y 22° 29' Norte y a los 105° 23' y 109° 28' Oeste. Tiene 608 km² de superficie insular, 17,751 km² de plataforma continental, 656 km de litoral, 221,600 ha de lagunas litorales y 57,000 ha de aguas continentales (Gobierno del Estado de Sinaloa; Plan Estatal de Desarrollo Urbano, 2007) (Figura 6A).

El recorrido por la costa de Sinaloa ocurrió en los principales sistemas lagunares donde se localizan la mayoría de las islas. De sureste a noroeste son: Bahía de Mazatlán, Ensenada de Pabellones, Bahía Santa María, Bahía de Navachiste y Bahía de Ohuira. A continuación se describen los sistemas lagunares e islas consideradas en este estudio:

1. *Bahía de Mazatlán.*- Se localiza entre los 23° 13' y 23° 15' Norte y los 106° 27' y 106° 28' Oeste, frente al puerto de Mazatlán. Las islas más importantes y que se muestrearon son: Pájaros, Venados y Lobos; están a una distancia de 2.3 km al sureste de la punta Sábalo, a 0.9 km de la punta Camarón y a 3.3 km al noroeste de punta Chile (Figura 6B).

Isla Pájaros situada al norte de las otras islas; tiene superficie de 48 ha, mide 1.1 km de largo y de 650 m a 800 m de ancho. Venados tiene una longitud de 1.8 km, anchura de 250 m a 700 m y superficie de 54 ha (Toledo *et al.*, 1989). Isla Lobos con superficie de 10.5 ha se ubica al sur de Venados, unida a ésta por una porción angosta de tierra denominada “el Cuello” que aparece o desaparece en función de la marea (Olea, 1975). Las tres islas están constituidas por rocas volcánicas; en Pájaros y Venados existen pequeñas áreas de antiguos aluviones y pie de monte (Flores-Campaña *et al.*, 1996). El clima es tropical y subtropical del tipo Aw con temperatura media anual de 24.1°C. La precipitación media anual es de 800 mm, marzo y abril los meses más secos, mientras que agosto y septiembre los más lluviosos (García, 1988). La descripción de la flora y tipos de vegetación de las tres islas de Bahía de Mazatlán la consignan Flores-Campaña *et al.* (1996) y Vega-Aviña *et al.* (2001).

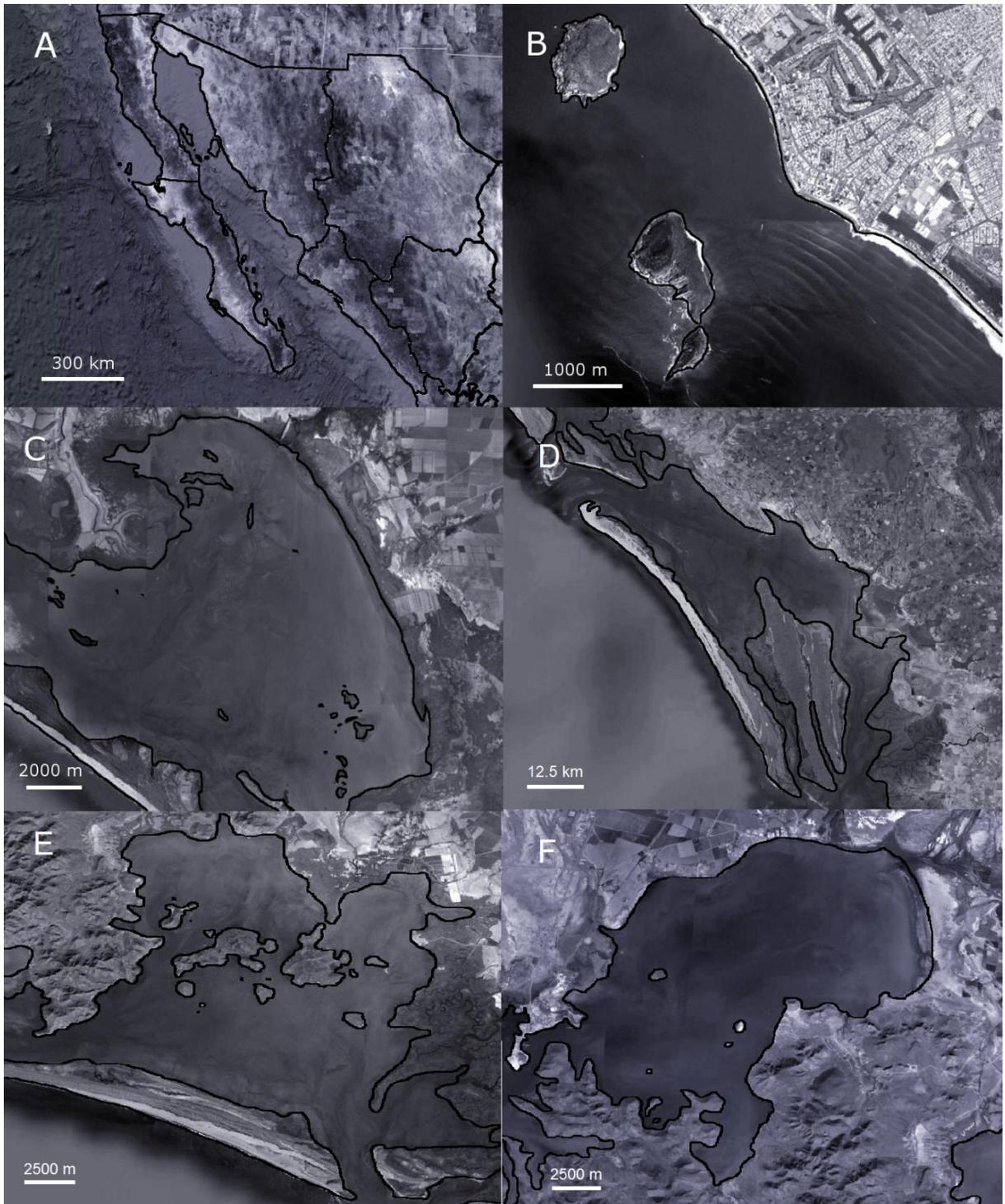


Figura 6. Localización de los sistemas lagunares de Sinaloa: A) Ubicación de la entidad, B) Bahía de Mazatlán, C) Altata-Ensenada Pabellones, D) Bahía Santa María-La Reforma, E) Navachiste-Macapule y F) Bahía de Ohuira.

2. *Sistema Altata-Ensenada Pabellones.*- Se localiza en la parte centro-norte de la entidad, entre los 107° 30' y los 107° 58' Oeste y los 24° 20' y 24° 40' Norte. Complejo lagunar con 55 km de longitud y superficie de 220 km² de forma irregular y paralela al litoral. El sistema está protegido del mar por barras arenosas y se comunica con el Golfo de California a través de las bocas Barra (Tonina) y Palmita. Algunas islas son: Iguanas, El Infiernito y Guamuchilito (Figura 6C); la primera se incluyó en el estudio. El clima de la región es seco semicálido, con precipitación pluvial de 300 a 400 mm que ocurren, en su mayoría, en el verano. La temperatura mensual oscila desde 30°C en julio y agosto hasta los 15°C en diciembre, enero y febrero (García, 1988). Las comunidades vegetales son bosque espinoso, matorral xerófilo, y vegetación acuática y subacuática.
3. *Complejo Playa Colorada-Bahía de Santa María-La Reforma.*- Pertenece al municipio de Angostura y es la más grande de la zona centro, con 53,000 ha. Se sitúa entre los 24° 25' y 25° 30' Norte y entre los 107° 35' y 108° 25' Oeste. Tiene 153 islas, siendo Altamura, Saliaca y Talchichilte las seleccionadas en nuestro estudio (Figura 6D). El clima es seco y muy cálido; la época de lluvias es de junio a septiembre. La temperatura varía de 12°C a 36°C y precipitación media anual de 650 mm (García, 1988). La flora y tipos de vegetación para Altamura y Talchichilte consiste de vegetación de dunas, halófitas, manglar, matorral xerófilo y pastizal (Flores-Campana *et al.*, 2003).
4. *Sistema Navachiste-Macapule.*- Es el sistema estuarino lagunar más importante del municipio de Guasave, al norte de Sinaloa. Se localiza entre los 25° 22' y 25° 35' Norte y los 108° 42' y 108° 56' Oeste, con una superficie de 22,3 ha. Existen 18 cuerpos insulares, de los cuales se eligieron Alta Blanca, Cardo, Guasayeye, Huitussera y Tesobiate (Figura 6E). Las condiciones ambientales de la región corresponden a la fórmula climática BW (h') hw (e), que se caracteriza por ser muy seco y muy cálido, con régimen de lluvias de verano, precipitación media anual de

305 mm y temperatura media anual de 24.8°C (García, 1988). La flora y tipos de vegetación en las 18 islas fueron descritas por Díaz (2008).

5. *Bahía de Ohuira*.- Se le ubica en el municipio de Ahome, entre los 25° 32' y 25° 36' Norte y los 109° 03' y 109° 08' Oeste. De las seis islas que existen en esta bahía se consideraron Bledos, Mazocahui I y Patos (Figura 6F). El clima es seco desértico, con precipitación media anual de 240 mm y temperatura promedio de 25°C (García, 1988). El tipo de vegetación en Mazocahui es matorral de transición desierto-bosque espinoso (Shreve, 1937), destacando 16 cactus (Reyes-Olivas, 2002). En Patos existe matorral xerófilo dominado por nopales (*Opuntia* spp.) en codominancia con *Bursera laxiflora* S. Watson, *Agave angustifolia* Haw. y *Ziziphus pedunculata* (Brandege) Standl. (Reyes-Olivas *et al.*, 2008).

Trabajo de campo.- De agosto de 2007 a agosto 2009 se realizaron registros de variables geomorfológicas, edáficas, y cobertura vegetal de arbustivas y suculentas, en 16 islas de la costa de Sinaloa. Los sitios de muestreo en cada isla, siempre y cuando hubiera acceso al sitio, se seleccionaron con base en la exposición de ladera: este (90°), sur (180°), oeste (270°), norte (360°) y cima (área plana superior). En cada orientación se localizó un sitio de muestreo representado por dos cuerdas paralelas de 50 m con separación entre ellas de 10 m. La cobertura vegetal se determinó con base en la proporción del dosel interceptado en relación con la longitud total de las cuerdas, como se sigue en la técnica de la línea de Canfield (Canfield, 1941).

En estos sitios también se midió la profundidad del suelo con una barrena tipo tornillo (tres lecturas por unidad de muestreo), la cobertura de rocas por intercepción lineal en dos cuerdas transversales a la pendiente de 10 m de longitud con una separación de 5 m, mientras que la pendiente del terreno fue registrada en grados con un nivel tipo Abney.

La exposición de ladera y la pendiente se utilizaron para estimar el Índice de Radiación Solar (IRS) para el 22 de diciembre a las 12:00 h, a una

declinación solar de -23.45° y la localización correspondiente a cada isla medida en grados. Esto es:

$$IRS = 100 \cos \theta$$

$$\cos \theta = \cos \beta \cos Z + \sin \Omega \sin Z \cos (\Omega - \Omega')$$

Donde:

β = ángulo de la pendiente,

Z = ángulo del cenit solar (latitud del sitio muestreado + declinación solar),

Ω = ángulo del azimut solar (180°),

Ω' = Azimut de la pendiente (adquiere valores de 0° , 90° , 180° , 270° o 0.5° según sea la exposición del sitio muestreado, norte, este, sur, oeste o cima).

Fuente: Oke (1987)

Además, con la exposición y la pendiente se calculó un Índice de Calor (IC) para cada sitio muestreado:

$$IC = \cos (\text{exposición} - 225) * \tan (\text{pendiente}).$$

Fuente: Geiger (1966)

Se recolectaron muestras de suelo de 5 a 15 cm de profundidad, las cuales se colocaron en bolsas de plástico, se etiquetaron y trasladaron para su análisis al Laboratorio de Análisis de Suelos y Aguas del Distrito de Riego 075, Río Fuerte, de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y al Laboratorio Agrícola IBC Analytic México, S. A. de C. V., con instalaciones en la Universidad de Occidente, ambos en la Ciudad de Los Mochis, Sinaloa.

Trabajo de laboratorio.- Se determinaron 19 variables físico-químicas en las muestras del suelo. Los porcentajes de arena, limo y arcilla con el método del hidrómetro (Day, 1965); la conductividad eléctrica mediante el extracto de saturación (Richards, 1954); el pH en una suspensión 1:2 de suelo/agua; el sodio intercambiable (SI), y el potasio, por flamometría; el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) y la relación entre el sodio soluble e intercambiable, conocida como razón de adsorción de sodio (RAS) de acuerdo con las fórmulas consignadas por Richards (1954); los cationes (Ca y Mg) por titulación con versenato, los aniones HCO₃ y Cl por titulación con ácido sulfúrico; los SO₄ por precipitado de sulfato de bario con centrifugación (Richards, 1954); el carbono orgánico por el método de combustión húmeda modificado por Walkley y Black (Walkley y Black, 1934); el nitrógeno con el método de la brucina (Bremner, 1965) y el fósforo soluble por el método Bray I (CSTPA, 1980).

Identificación de especies.- Las especies interceptadas en las líneas de Canfield se documentaron en campo con la información convencional (Jones, 1986) y se colocaron en una prensa portátil, posteriormente se deshidrataron en una secadora de focos en el Herbario de la Escuela Superior de Agricultura del Valle del Fuerte, Universidad Autónoma de Sinaloa en Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa. La identidad taxonómica se determinó con base en floras regionales o monografías, entre las que destacan Standley (1920-1926), Shreve y Wiggins (1964) y Wiggins (1980).

Análisis de datos.- Se obtuvo una matriz inicial de sitios x especies que incluye 59 especies vegetales y 58 sitios de muestreo. Sin embargo, se eliminaron las especies cuya frecuencia resultó menor del 20% de la frecuencia de la especie más común; esto se debe a que algunos métodos de ordenación son sensibles a especies raras y tienden a distorsionar el análisis. La matriz final de sitios x especies se compone por 29 especies y 57 sitios de muestreo.

De esta manera, en los análisis de clasificación y ordenación se utilizaron dos matrices de datos. La primera matriz integra 57 sitios y cobertura vegetal de 29 especies, mientras que la segunda matriz está compuesta por 57 sitios y 24 variables ambientales y edáficas. Con la primera matriz se hizo la clasificación numérica y la ordenación indirecta; y con la primera y segunda matriz se efectuó la ordenación directa.

La clasificación de los sitios de muestreo de las 16 islas se realizó a través del análisis de conglomerados, una técnica politético-aglomerativa que analiza las muestras en forma individual para fusionarlas de manera sucesiva en grupos de tamaño creciente, hasta que todas las muestras son integradas en un sólo grupo. Se utilizó la distancia de Sorensen (Bray-Curtis) como función de semejanza, por ser de las más robustas para datos ecológicos (McCune y Mefford, 2011) y como método de unión de grupos el de ligamiento promedio (UPGMA), ya que introduce poca distorsión en la distancia entre agrupamientos con respecto a la matriz de distancias original (Ludwig y Reynolds, 1988), al mismo tiempo evita el efecto de encadenamiento generado con otros métodos de unión (Digby y Kempton, 1987). Es importante señalar que las coberturas vegetales se transformaron a raíz cuadrada para los análisis de clasificación.

Para la ordenación de la vegetación se utilizó el análisis de correspondencia linealizado (DCA, por sus siglas en inglés) y el análisis de correspondencia canónica (CCA, por sus siglas en inglés). Estas técnicas son adecuadas cuando las especies muestran relaciones de tipo unimodal a gradientes ambientales (ter Braak y Prentice, 1988). El DCA como herramienta de ordenación indirecta infiere los gradientes ambientales a partir de los datos de las especies (Ludwig y Reynolds, 1988), mientras que el CCA permite probar, mediante estadística, si las especies están relacionadas con las variables ambientales; asimismo, evalúa la importancia relativa de estas variables para explicar los patrones de las especies (ter Braak, 1986; 1987). La prueba de permutaciones de Monte Carlo asegura que la variación explicada en los ejes de ordenación sea producto de las variables

consideradas y no de efectos aleatorios (Palmer, 1993). Debido a que la inclusión en la ordenación de grupos de variables moderada o fuertemente intercorrelacionados (colinealidad entre variables) puede dar lugar a resultados inciertos (ter Braak, 1986). Las variables utilizadas en el análisis se sometieron a una prueba de correlación, usando el coeficiente de correlación de Pearson.

La eliminación de las variables correlacionadas se realizó cuando $r > 0.7$ y $P = 0.01$ (SAS Institute, 2009). Los análisis de clasificación y ordenación de las muestras de vegetación se realizaron con los programas PC-ORD ver. 6.0 y CANOCO versión 4.5 (McCune y Mefford, 2011; ter Braak y Šmilauer, 2002).

Resultados

Identificación de especies

En la matriz inicial de sitios x especies se identificaron 57 especies de plantas, arbustivas, arbóreas y suculentas en 58 sitios de muestreo de 16 islas de la costa de Sinaloa. Las especies se agrupan en 27 familias, de las cuales *Fabaceae* (16 especies), *Euphorbiaceae* (9 especies) y *Cactaceae* (6 especies) engloban el 54.4% de las especies. La riqueza de especies de los sitios muestreados arroja valores distintos por isla y por sitio. La isla con el mayor número de especies es Talchichilte con 28 y variación de 13 especies en la ladera sur, a 16 especies en los sitios oeste y norte, mientras que isla Alta Blanca es la que tiene el menor número de especies, dos y varían de una en el sur de la isla a dos en la ladera norte (Figura 7).

La matriz final de sitios x especies, que se utilizó en los análisis de clasificación y ordenación, incluye 29 especies agrupadas en 15 familias botánicas, entre las que destacan *Euphorbiaceae* con siete especies, *Cactaceae* y *Fabaceae* con cinco cada una, en total 17 especies de las 29, lo que equivale al 58.6% del total (Cuadro 3).

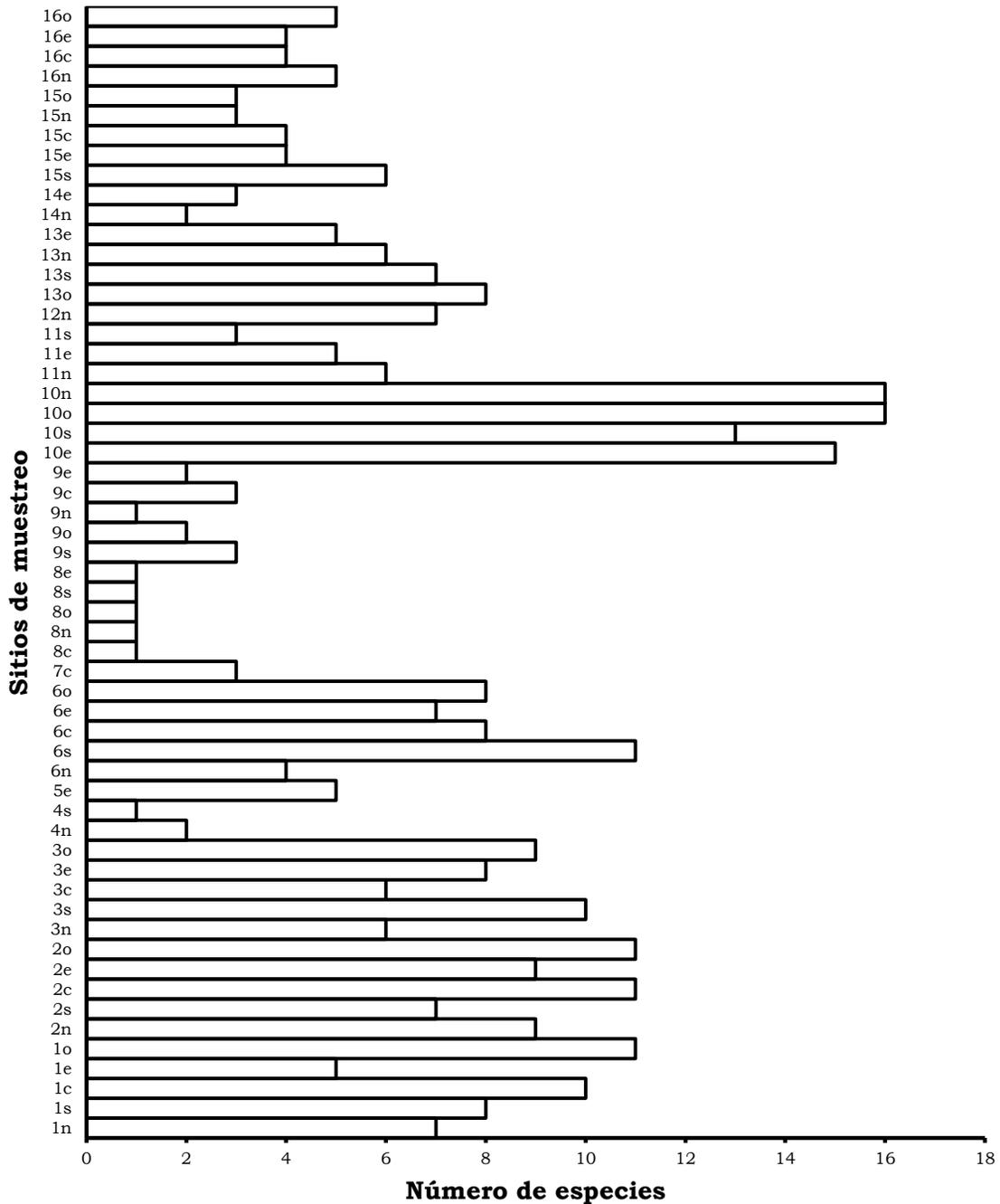


Figura 7. Riqueza específica de las islas de Sinaloa. Los nombres corresponden a sitios de muestreo definidos por número y letra. El número pertenece al nombre de la isla (1 = Tesobiate, 2 = Guasayeye, 3 = Huitussera, 4 = Alta Blanca, 5 = Cardo, 6 = Mazocahui, 7 = Tunosa, 8 = Bledos, 9 = Patos, 10 = Talchichilte, 11 = Saliaca, 12 = Altamura, 13 = Iguanas, 14 = Venados, 15 = Pájaros y 16 = Lobos) y la letra describe su localización (n = norte, e = este, s = sur, o = oeste y c = cima).

Cuadro 3. Especies agrupadas por familia, registradas en las unidades de muestreo y acrónimos utilizados en el análisis de clasificación y ordenación con PC-ORD versión 6.0 y CANOCO versión 4.5 (McCune y Mefford, 2011; ter Braak y Šmilauer, 2002).

| Familia | Acrónimo | Nombre científico |
|-----------------|---|---|
| Agavaceae | Aga ang | 1. <i>Agave angustifolia</i> Haw. |
| Apocynaceae | Plu rub | 2. <i>Plumeria rubra</i> fo. <i>acutifolia</i> (Poir.) Woodson |
| Burseraceae | Bur lax | 3. <i>Bursera laxiflora</i> S. Watson |
| Cactaceae | Cyl thu Opu spp Pac pec Ste ala Ste thu | 4. <i>Cylindropuntia thurberi</i> (Engelm.) F.M. Knuth 5. <i>Opuntia</i> spp. 6. <i>Pachycereus pecten-aboriginum</i> (Engelm. ex S. Watson) Britton & Rose 7. <i>Stenocereus alamosensis</i> (J.M. Coult.) A.C. Gibson & K.E. Horak 8. <i>Stenocereus thurberi</i> (Engelm.) Buxb. var. <i>thurberi</i> |
| Capparaceae | Cra tap | 9. <i>Crateva tapia</i> L. |
| Convolvulaceae | Ipo arb | 10. <i>Ipomoea arborescens</i> (Humb. & Bonpl. ex Willd.) G. Don |
| Euphorbiaceae | Cro fra Cro pun Eup cal Eup tom Jat cin Jat cor Jat cun | 11. <i>Croton fragilis</i> Kunth 12. <i>Croton punctatus</i> Jacq. 13. <i>Euphorbia californica</i> Benth. 14. <i>Euphorbia tomentulosa</i> S. Watson 15. <i>Jatropha cinerea</i> (Ortega) Müll. Arg. 16. <i>Jatropha cordata</i> (Ortega) Müll. Arg. 17. <i>Jatropha cuneata</i> Wiggins & Rollins |
| Fabaceae | Cae pla Cou gla Des cov Hae bra Lys div | 18. <i>Caesalpinia platyloba</i> S. Watson 19. <i>Coursetia glandulosa</i> A. Gray 20. <i>Desmanthus covillei</i> (Britton & Rose) Wiggins 21. <i>Haematoxylum brasiletto</i> H. Karst. 22. <i>Lysiloma divaricata</i> (Jacq.) J.F. Macbr. |
| Moraceae | Fic pet | 23. <i>Ficus petiolaris</i> Kunth |
| Rhamnaceae | Kar hum | 24. <i>Karwinskia humboldtiana</i> (Willd. ex Roem. & Schult.) Zucc. |
| Sapindaceae | Pau son | 25. <i>Paullinia sonorensis</i> S. Watson |
| Solanaceae | Lyc ric | 26. <i>Lycium richii</i> A. Gray |
| Sterculiaceae | Mel pyr | 27. <i>Melochia pyramidata</i> L. |
| Theophrastaceae | Jac pun | 28. <i>Jacquinia pungens</i> A. Gray |
| Verbenaceae | Lan cam | 29. <i>Lantana camara</i> L. |

La riqueza específica una vez descartadas las especies raras, es distinta entre islas y entre 57 sitios de muestreo, aunque persiste la riqueza máxima y mínima en Talchichilte con 20 especies y dos en Alta Blanca. La exposición, la ladera sur fue la muestreada con mayor intensidad (15 sitios) y registró el mayor número de especies (28); sin embargo, la riqueza específica promedio por exposición sur fue de 4.7 especies, mínimo de una especie en Bledos (*Opuntia* spp.) y máximo de 13 especies en Talchichilte (*Ipomoea arborescens* predomina por su cobertura). La ladera oeste, con 10 sitios documentados presentó 27 especies y el mayor promedio especies por exposición, 7.4 especies (Cuadro 4).

Cuadro 4. Riqueza de especies vegetales en 57 sitios localizados en cuatro exposiciones y en la cima de 16 islas de la costa de Sinaloa.

| Exposición | Número de laderas | Total de especies | Promedio (\pm D.E) de especies/exposición |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|---|
| Sur | 15 | 28 | 4.7 (\pm 3.9) |
| Este | 13 | 27 | 5.6 (\pm 3.9) |
| Oeste | 10 | 27 | 7.4 (\pm 3.9) |
| Norte | 14 | 22 | 5.4 (\pm 3.9) |
| Cima | 9 | 19 | 5.6 (\pm 3.9) |

Cobertura vegetal y frecuencia de especies

El promedio de dosel vegetal que se encontró en los sitios de muestreo es de $72.4 \pm 44.3\%$, siendo Talchichilte, la isla con mayor cobertura vegetal, 163.8% , mientras que el menor valor corresponde a Alta Blanca con 5% . A nivel exposición en la isla, la ladera norte en Talchichilte tiene 191% de dosel, en contraste con el 1% en la ladera este de Bledos (Anexo 3). Se destaca que en algunos sitios de muestreo se registró la cobertura vegetal de dos o tres estratos conformados por especies suculentas, arbustivas y arbóreas, con la finalidad de que quedaran estas especies representadas en la estructura de la comunidad vegetal de esos sitios (Figura 8).

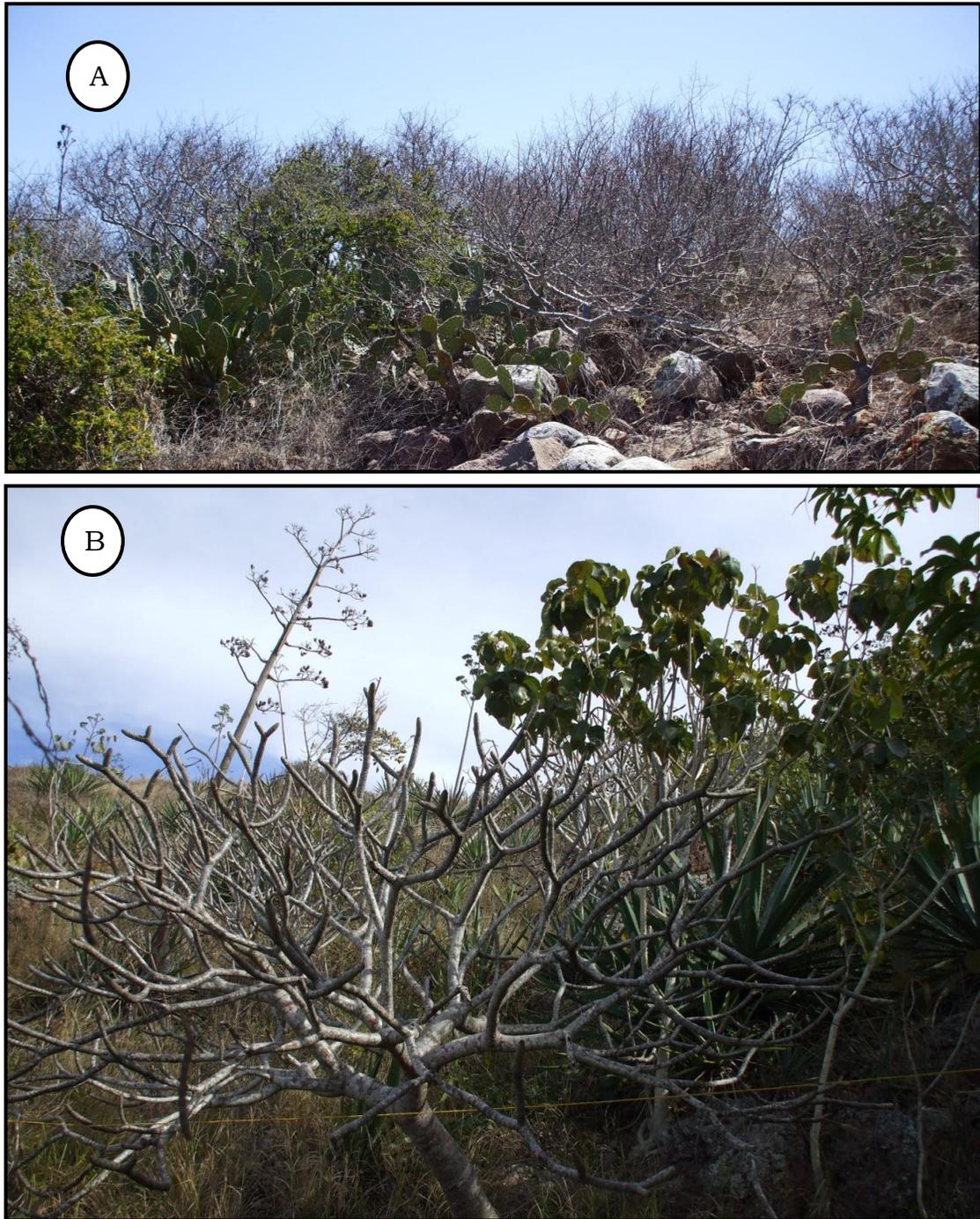


Figura 8. Especies vegetales de algunos sitios de muestreo: A) Al fondo se muestra *Bursera laxiflora* y debajo de sus doseles se advierte la presencia de *Opuntia* spp. en Isla Huitussera; B) Se diferencian tres estratos en Isla Lobos: el primero compuesto por *Ficus petiolaris*, el segundo por *Plumeria rubra* fo. *acutifolia* y el tercero por *Agave angustifolia*.

Bursera laxiflora contribuye con la mayor cobertura vegetal por especie, 11.6%. El predominio de esta especie es máximo en las islas Huitussera, Guasayeye y Tesobiate de la Bahía de Navachiste con promedios de 34.8% (5 a 72%), 30.2% (2 a 57%) y 25.2% (2 a 46%); las laderas de estas islas expuestas al este tienen la mayor cubierta vegetal con 46 a 72%, mientras que la cima presenta la menor cobertura (2 a 5%). La siguiente especie en importancia de dosel vegetal corresponde a *Jatropha cinerea* con 7.2%; las islas Saliaca y Talchichilte de la Bahía Santa María albergan los valores máximos de cobertura con 51.7% (23 a 80%) en la primera isla y 22.5% (5 a 39%) en la segunda. La tercer especie con mayor cobertura vegetal es *Plumeria rubra* fo. *acutifolia* con 6.6%, planta que solo se registró en sitios de muestreo de Isla Pájaros e Isla Lobos, Bahía de Mazatlán; Pájaros es la que tiene el mayor dosel con 56.8%, con respecto a su superficie, mientras que en Lobos es de 23%.

Las especies de plantas con menor cobertura vegetal son *Cylindropuntia thurberi*, *Euphorbia tomentulosa* y *Stenocereus alamosensis* con 0.3, 0.4 y 0.4%. El primer cacto se registró en seis sitios de muestreo con una cobertura que varía de 1 a 6%, la ladera norte de Talchichilte es la que tuvo el mayor porcentaje, mientras que el valor mínimo ocurrió en sitios orientados al este de las islas Huitussera y Talchichilte, y en la ladera oeste de Tesobiate. El dosel de *S. alamosensis* osciló entre 1 y 6% distribuido en 13 sitios de muestreo de seis islas, de los cuales las laderas norte y sur de isla Alta Blanca tienen los valores mayores con 6 y 3%. Por último, *E. tomentulosa* se distribuye en seis sitios de las islas Cardo, Guasayeye y Tesobiate de la Bahía de Navachiste y Mazocahui, Bahía de Ohuira, con porcentajes de 1 a 11% con preferencia de cuatro exposiciones este.

Las cinco especies que ocurrieron con mayor frecuencia en los sitios de muestreo son *B. laxiflora* (31), *E. californica* (23), *Opuntia* spp. (22), *J. cinerea* (22) y *Agave angustifolia* (21); mientras que cinco especies tienen el valor menor de frecuencia con seis registros en los sitios, las cuales son: *Cylindropuntia thurberi*, *Croton punctatus*, *Caesalpinia platyloba*,

Desmanthus covillei y *Paullinia sonorensis*. La figura 9 describe la relación que existe entre el número especies y su frecuencia de aparición en los sitios de muestreo; el mayor número de especies, 18, se registran en el intervalo de 11 a 20%.

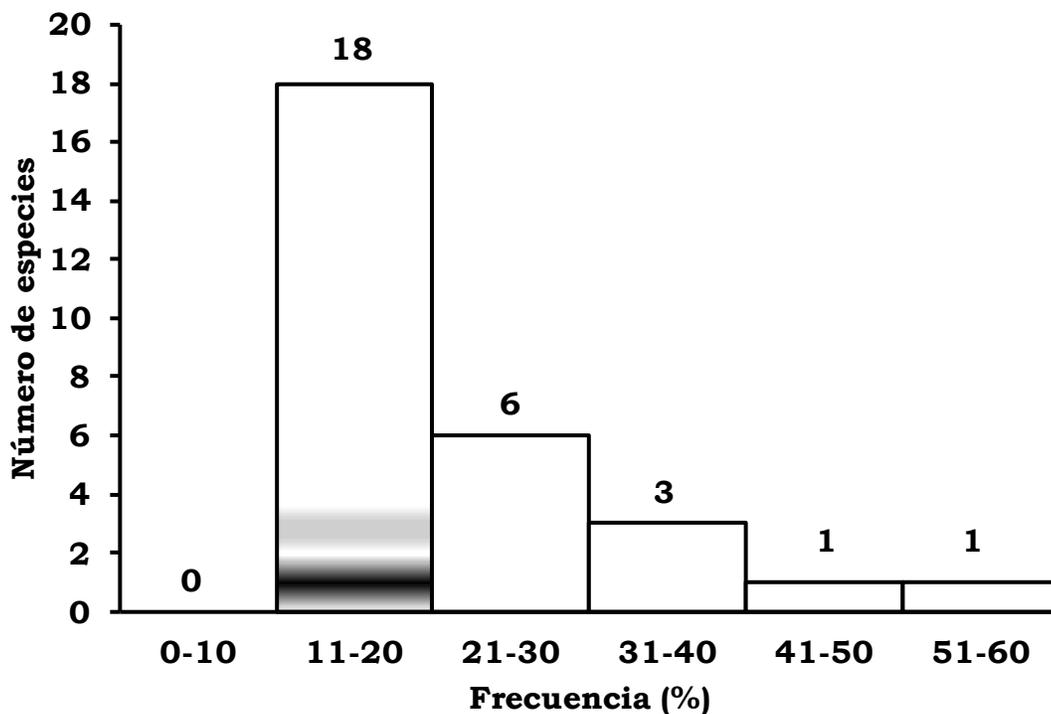


Figura 9. Relación de las 29 especies vegetales registradas en las líneas de Canfield y su frecuencia en 57 sitios de muestreo de 16 islas de la costa de Sinaloa.

Clasificación

La interpretación de los agrupamientos de los sitios con relación a su semejanza en composición se consideró al cuarto nivel del dendrograma, que equivale a un corte menor de 30% de la información retenida (Figura 10).

Los seis grupos formados en la clasificación se describen a continuación:

- 1) *Grupo A.*- Compuesto por 26 sitios que representan a islas de tres sistemas lagunares; Bledos (8n), Mazocahui (6n, 6e, 6s, 6o y 6c) y Tunosa (7c) de la Bahía de Ohuira; Cardo (5e), Guasayeye (2n, 2e, 2s, 2o y 2c), Huitussera (3n, 3e, 3s y 3o) y Tesobiate (1n, 1e, 1s, 1o y 1c) de la Bahía de Navachiste, y Talchichilte (10n, 10e, 10s y 10o) de la Bahía de Santa María. La especie más importante en estas islas es *Bursera laxiflora*, que está presente en cinco (Bledos, Guasayeye, Huitussera, Tesobiate y Tunosa) de las ocho islas, esto es el 62.5% de los sitios muestreados; en Cardo, la especie más común es *Agave angustifolia*, mientras que en Mazocahui se tiene a *Euphorbia californica* y en Talchichilte a *Croton punctatus*.
- 2) *Grupo B.*- Se integra por nueve sitios de las islas Bledos y Patos de Bahía de Ohuira más un sitio de Huitussera de Bahía de Navachiste. Para Bledos se registran tres sitios de muestreo (8s, 8o y 8c), en Patos cinco sitios (9n, 9e, 9s, 9o y 9c) y en ambas predomina *Opuntia* spp., mientras que en Huitussera existe uno (3c), cuyas especies importantes son *Croton fragilis*, *Haematoxylum brasiletto* y *Melochia pyramidata*; es importante señalar que *Opuntia* spp. le sigue a las anteriores en cobertura vegetal con 1% de diferencia.
- 3) *Grupo C.*- Está representado por ocho sitios que son exclusivos de islas de Ensenada Pabellones; Altamura, registra un sitio y corresponde al 12n, con dos especies sobresalientes, *Jatropha cinerea* y *Jacquinia pungens*. En Iguanas con cuatro sitios de muestreo (13n, 13e, 13s y 13o), la especie predominante es *Crateva tapia*. Para Saliaca son tres sitios (11n, 11e y 11s) con *J. cinerea* como la especie más importante.
- 4) *Grupo D.*- Se caracteriza por dos localidades de isla Alta Blanca (4n y 4s), Bahía de Navachiste. *Stenocereus alamosensis* es la especie que predomina.

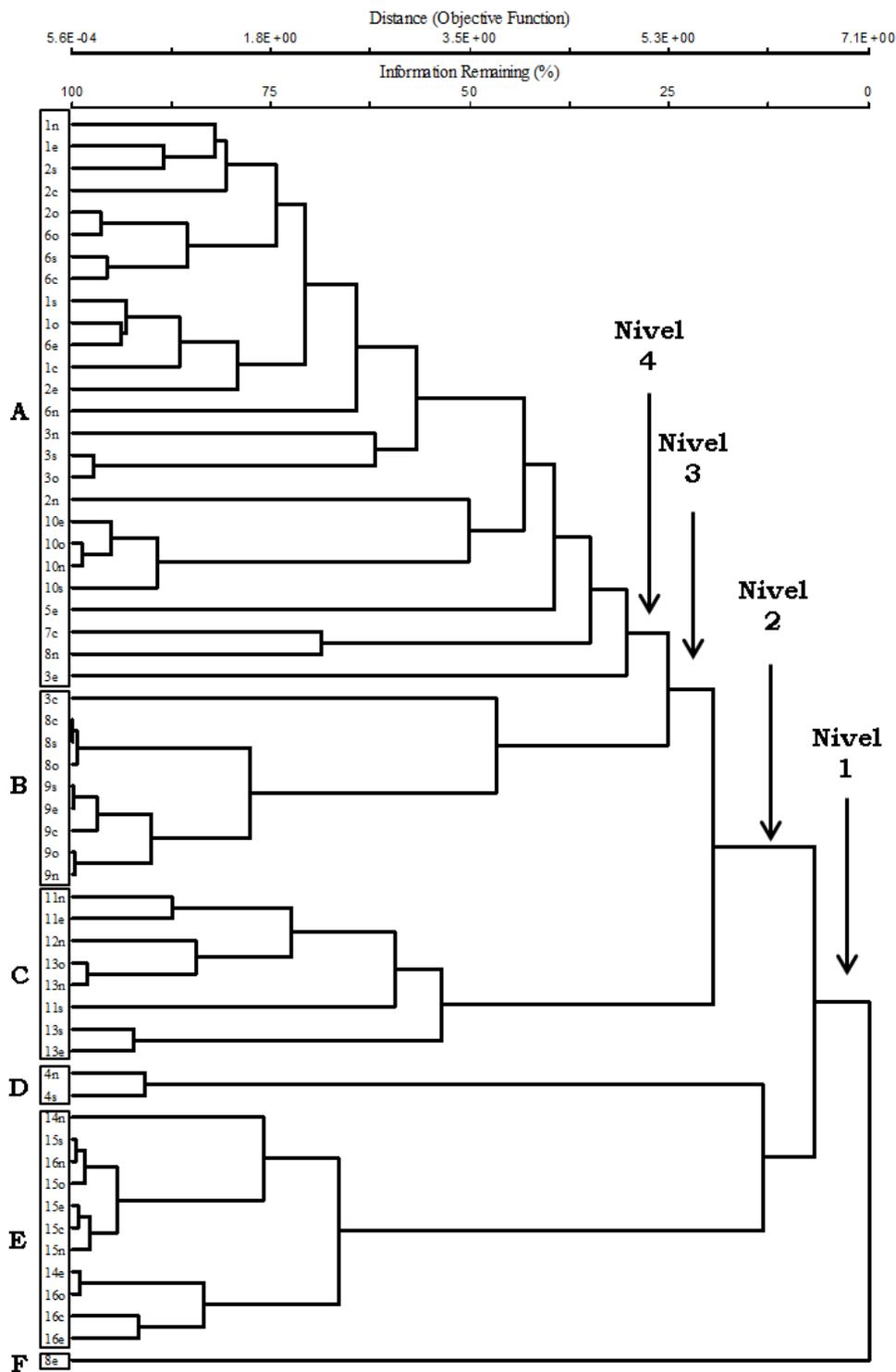


Figura 10. Dendrograma de los agrupamientos de 57 sitios de muestreo de la vegetación de 16 islas de la costa de Sinaloa con el análisis de conglomerados. Al cuarto nivel se tiene un corte menor de 30% de la información retenida. Disponible en PC-ORD, versión 6.0.

- 5) *Grupo E.*- Comprende 11 unidades de muestreo de las islas de Bahía de Mazatlán; Lobos (16n, 16e, 16o y 16c), Pájaros (15n, 15e, 15s, 15o y 15c) y Venados (14n y 14e). *Plumeria rubra* fo. *acutifolia* predomina en las dos primeras islas, mientras que *Ficus petiolaris* es más común en Venados.
- 6) *Grupo F.*- Está formado sólo por la exposición este de isla Bledos (8e) con *Stenocereus thurberi* como la especie más importante.

Ordenación indirecta

La ordenación de los sitios y las especies obtenida en el análisis de correspondencia linealizado, resalta la correspondencia existente entre los grupos formados en el análisis de agrupamientos y el DCA. Los tres primeros ejes del DCA explican el 35% de la varianza total de las especies; el elevado valor propio obtenido de $\lambda = 0.793$ para el primer eje indica una alta correlación entre los sitios y las especies, mientras que la longitud del gradiente es de 4.835, lo que señala la amplia heterogeneidad en la composición de especies entre los sitios de las islas, definido por gradientes ambientales relacionados con el eje 1; para el eje 2, el valor propio es de 0.428 con una longitud del gradiente de 3.619 (Cuadro 5).

Cuadro 5. Resultados del análisis de correspondencia linealizado para los datos de 29 especies vegetales y 57 sitios en 16 islas de la costa de Sinaloa.

| Ejes | 1 | 2 | 3 | Inercia total |
|------------------------|----------|----------|----------|----------------------|
| Valor propio | 0.793 | 0.428 | 0.188 | 4.023 |
| Longitud del gradiente | 4.835 | 3.619 | 3.664 | |
| Varianza acumulada (%) | 19.7 | 30.4 | 35.0 | |

La Figura 11 muestra la ordenación de los dos primeros ejes del análisis de correspondencia linealizado. Se observa que a lo largo del primer eje de ordenación aparecen, en primer lugar, 25 sitios de muestreo que forman el grupo A, el cual está integrado por: Bledos (8n, 8e), Mazocahui (6n, 6e, 6s,

Ordenación directa

El análisis de correspondencia canónica entre los datos de la comunidad vegetal y las variables ambientales reveló que los tres ejes de ordenación agrupan el 32.3% de la variación total de los datos de las especies. Las correlaciones para los datos de especies-medio son significativas ($P < 0.05$) para las variables ambientales (Cuadro 6).

Cuadro 6. Resultados del análisis de correspondencia canónica entre variables del medio y datos de comunidades vegetales de 16 islas de la costa de Sinaloa. Los asteriscos representan el grado de significancia estadística según la prueba de Monte Carlo con $P < 0.05$.

| Ejes | 1 | 2 | 3 | Inercia total |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------------------|
| Valor propio | 0.570* | 0.499* | 0.333* | 4.3540 |
| Varianza/Datos/Especies | | | | |
| Variación explicada (%) | 13.1 | 11.5 | 7.7 | |
| Varianza explicada acumulada (%) | 13.1 | 24.6 | 32.3 | |
| Correlación Especies-Ambiente | 0.863* | 0.959* | 0.855* | |

La ordenación de los sitios de muestreo y especies vegetales con base en el análisis de correspondencia canónica se describe en la Figura 12. El primer eje es un gradiente relacionado en terminos positivos con nitratos (0.776) y negativos con pH (-0.584), mientras que el segundo eje se correlaciona positivamente con porcentaje de arena (0.663) y profundidad del suelo (0.757), y negativamente con calcio (-0.574), fosfatos (-0.533), porcentaje de limo (-0.696), materia orgánica (-0.560), cobertura rocosa (-0.901) y pendiente (-0.685).

Los patrones geográficos de las especies vegetales en las islas con relación a las variables ambientales se infieren de la Figura 12. En el lado derecho, los nitratos se correlacionaron de manera altamente significativa con el eje 1, valores máximos ($\mu = 3,042$ ppm) se registran en 15n, 15e, 15o, 15s y 15c

que corresponden a Pájaros. Las especies relacionadas con este eje son: *Crateva tapia*, *Ficus petiolaris*, *Plumeria rubra* fo. *acutifolia* y *Stenocereus alamosensis*. La parte inferior del lado derecho, registra la correlación de fosfatos con el eje 2, máximos de 3,504 ppm en Patos con *Opuntia* spp. como el grupo vegetal dominante, mientras que los sitios con los valores menores de fosfatos (0.43 ppm) ocurren en Saliaca que carece de nopales.

El Cuadro 7 muestra las correlaciones intra conjuntos de las variables ambientales para los tres primeros ejes.

Cuadro 7. Resultados de las correlaciones entre 15 variables ambientales y los tres primeros ejes del análisis de correspondencia canónica. Los asteriscos representan el grado de significancia estadística ($P < 0.05$).

| Variable | Correlaciones | | |
|-----------------------------------|---------------|---------|--------|
| | Eje 1 | Eje 2 | Eje 3 |
| pH | -0.584* | 0.400 | -0.297 |
| Ca (meq/ L) | -0.019 | -0.574* | 0.116 |
| K (meq/ L) | 0.040 | -0.512 | 0.680* |
| HCO ₃ (meq/ L) | -0.188 | -0.471 | -0.092 |
| Arena (%) | 0.257 | 0.663* | 0.451 |
| Limo (%) | -0.113 | -0.696* | -0.273 |
| Arcilla (%) | -0.066 | -0.571 | -0.488 |
| Materia orgánica (%) “MO” | 0.290 | -0.560* | -0.125 |
| Nitratos (ppm) | 0.776* | -0.246 | 0.095 |
| Fosfatos (ppm) “P” | -0.030 | -0.533* | 0.497 |
| Profundidad del suelo (cm) “Prof” | -0.079 | 0.757* | 0.368 |
| Cobertura rocosa (%) “CR” | 0.144 | -0.901* | -0.346 |
| Pendiente (°) “Pen” | 0.211 | -0.685* | -0.302 |
| Índice de Radiación Solar (%) | -0.362 | 0.124 | 0.066 |
| Índice de Calor | -0.218 | -0.013 | 0.168 |

En la zona superior del lado derecho de la Figura 12, se observa la correlación significativa del pH con el eje 1, teniendo valores máximos de 7.3 y 7.7 en sitios de Altamura y Saliaca; en esta misma región, se correlacionan la profundidad y porcentaje de arena en sitios de Altamura, Iguanas, Saliaca y Talchichilte: islas arenosas con profundidad de más de 100 cm en Altamura; las especies asociadas son: *Jatropha cinerea*, *Croton*

En la parte central de la figura se da la distribución de la mayoría de los sitios y de las especies. Los sitios corresponden a islas que destacan por ser rocosas y se ubican en tres sistemas lagunares: en Bahía de Ohuira son Mazocahui y Tunosa; en Navachiste Cardo, Guasayeye, Huitussera y Tesobiate; por último, Bahía de Mazatlán registra a Venados y Lobos. De éstos, seis sistemas isleños tienen una cobertura rocosa que varía del 77.50% (Venados) al 61.25% (Lobos). Las especies dominantes en estas islas son: *Agave angustifolia*, *Bursera laxiflora*, *Coursetia glandulosa*, *Croton fragilis*, *Euphorbia californica*, *E. tomentosa*, *Haematoxylum brasiletto*, *Ipomoea arborescens*, *Jatropha cuneata*, *Paulinia sonorensis* y *Stenocereus thurberi*. En resumen, los análisis multivariantes revelan tres grupos de islas: 1) Cuatro sistemas insulares con aporte de guano (Alta Blanca, Bledos, Pájaros y Patos (Figura 13); 2) Ocho islas de origen volcánico: Cardo, Guasayeye, Huitussera, Lobos, Mazocahui, Tesobiate, Tunosa y Venados con promedio de cobertura de piedras de 56.3% (Figura 14); y 3) Cuatro islas arenosas denominadas Altamura, Iguanas, Saliaca y Talchichilte (Figura 15).

El anexo 4 muestra el valor promedio de cada variable ambiental registrada en las 16 islas de la costa de Sinaloa, mientras que en el anexo 5 se describe la textura y fertilidad del suelo de islas con aportes de guano, islas volcánicas e islas arenosas.

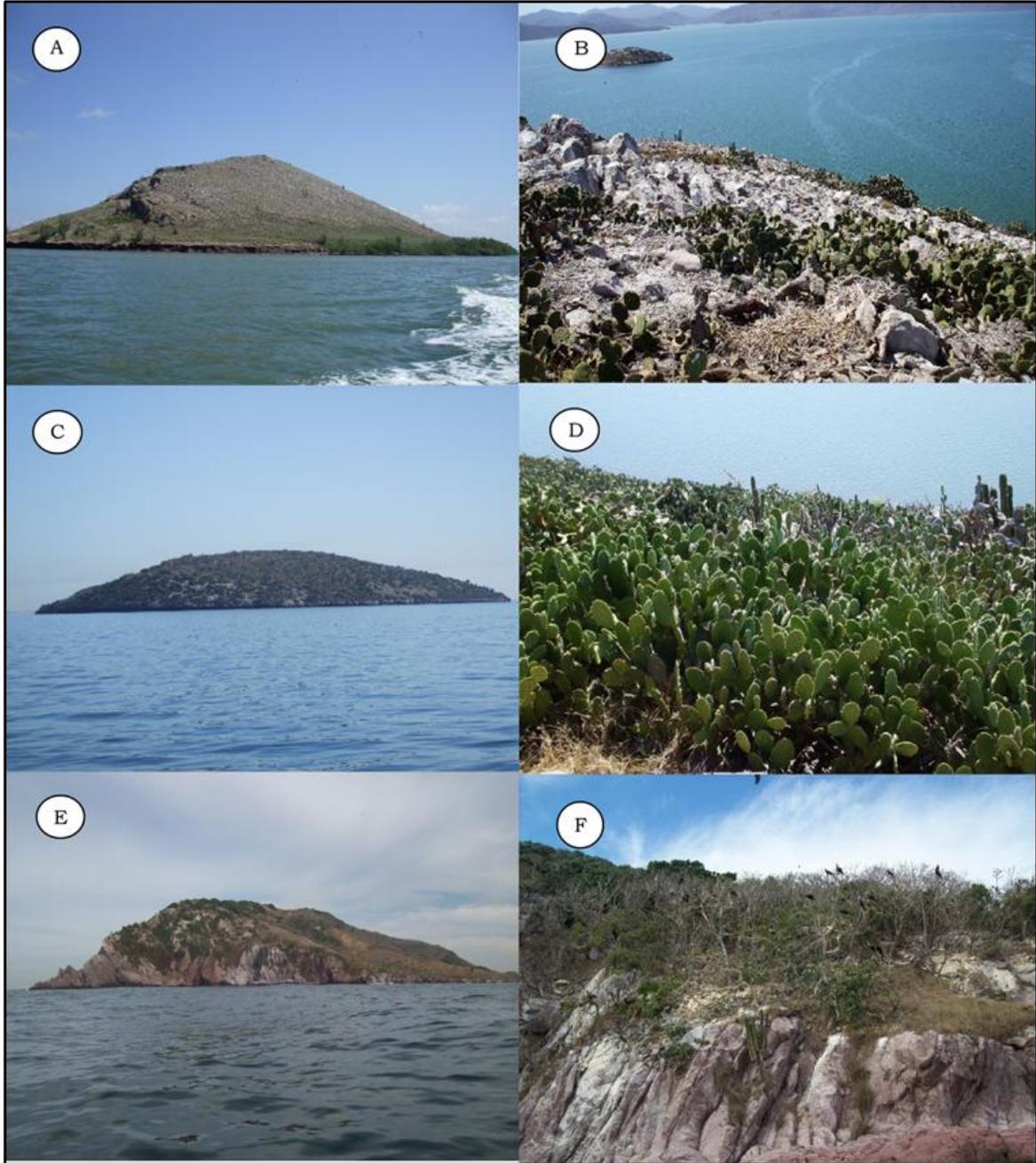


Figura 13. Ejemplos de islas de la costa de Sinaloa que proveen sitios favorables para la reproducción, anidación y percha de aves marinas: A) Vista panorámica de Bledos, Bahía de Ohuira; B) Población de nopales (*Opuntia* spp.) en ladera norte de Bledos; C) Isla Patos, Bahía de Ohuira, fotografiada a una distancia aproximada de 1.5 km; D) Nopaleras dominantes en la comunidad vegetal de Patos; E) Ladera norte de Pájaros, Bahía de Mazatlán; F) Aves perchando sobre *Plumeria rubra* fo. *acutifolia*, especie dominante en Pájaros, junto con *Crateva tapia* y *Ficus petiolaris*.



Figura 14. Tres islas de origen volcánico con alto porcentaje de piedras: A) Vista panorámica de Mazocahui, Bahía de Ohuira; B) Ladera norte de Mazocahui; C) Ladera norte de Tesobiate, Bahía de Navachiste; D) Comunidad vegetal en época de lluvia al oeste de Tesobiate; E) Islas Lobos y Venados, Bahía de Mazatlán; F) Vista de la cima y ladera este de Lobos y Venados donde se aprecian los acantilados y formaciones rocosas.



Figura 15. Islas arenosas: A) Vista general de Saliaca, Complejo Playa Colorada-Bahía de Santa María-La Reforma; B) Ladera norte de Saliaca; C) Ladera norte de Altamura, Complejo Playa Colorada-Bahía de Santa María-La Reforma; D) Comunidad vegetal compuesta principalmente por *Jatropha cinerea* en Altamura; E) Isla Iguanas, Sistema Altata-Ensenada Pabellones, se caracteriza por ser plana y alcanzar no más de 1 m de altura; F) Vista de la vegetación de Iguanas.

Discusión

En esta investigación se demuestra que la geomorfología y edafología determinan la estructura de la vegetación en las islas de la costa de Sinaloa, factores que son importantes en la distribución de especies de plantas, en los desiertos Sonorense y Chihuahuense del norte mexicano (Key *et al.*, 1984; Ezcurra *et al.*, 1987; McAuliffe, 1994; Valverde *et al.*, 1996; Phillips y MacMahon, 1978; Parker, 1988; Parker, 1991) y en ambientes secos y muy secos de otros países (Abd El-Ghani, 2000; Abd El-Ghani y Amer, 2003; Arshad *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2009). Los factores importantes en esta investigación son: nitratos, pH, cobertura de rocas, profundidad del suelo, porcentaje de limo, pendiente, porcentaje de arena, calcio, materia orgánica y fosfatos, en ese orden de importancia.

Las altas concentraciones de nitratos, fosfatos y pH ácido que existen en cuatro islas de la entidad, caracterizadas por ingresos de guano producido por aves marinas y terrestres, reducen la riqueza de especies vegetales que permiten, principalmente, la presencia de *Opuntia* spp. y *Stenocereus alamosensis* y las arbóreas *Crateva tapia*, *Ficus petiolaris* y *Plumeria rubra* fo. *acutifolia*; especies vegetales que proveen a las comunidades aviares de sitios de percha, anidación y reproducción. Estos resultados se complementan con estudios realizados en islas de Bahía de Ohuira (Patos y Mazocahui) y Bahía de Mazatlán (Lobos, Venados y Pájaros). En las islas de la primer bahía, existe diferencia de 42 especies en una superficie semejante (Reyes-Olivas, 2002; Reyes-Olivas *et al.*, 2008), pero Patos alberga numerosos individuos de aves marinas (Guevara-Estrada, 2006) que incrementan las concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio, en comparación con Mazocahui que carece de éste enriquecimiento, situación que, en parte, explica la baja riqueza vegetal de Patos (Reyes-Olivas *et al.*, 2008). En las Tres Islas de la segunda bahía, Venados tiene 70 especies más que Pájaros (Flores-Campaña *et al.*, 1996; Vega-Aviña *et al.*, 2001) pero el número de especies en Lobos y Pájaros es semejante, el contraste está en el tamaño, siendo Pájaros 35.5 ha más grande (Vega-Aviña *et al.*, 2001). Así, la variación notoria en el número de

especies en las Tres Islas, es que Pájaros, tiene importantes áreas de percha, anidación y reproducción de aves marinas como la garza gris (*Platalea ajaja* L.) y el pelícano café (*Pelecanus occidentalis* L.) (Vega-Aviña *et al.*, 2001), lo que incrementa, de manera considerable, las concentraciones de nitratos y fosfatos, al mismo tiempo reducen el pH del suelo a niveles extremadamente ácidos; en cambio, en las dos islas restantes, no hay comunidades aviarias, las concentraciones de nitratos son normales, y aún cuando las concentraciones de fosfatos son altas y el pH es medianamente ácido, permiten la existencia de mayor riqueza florística. Por último, el efecto negativo de los ingresos de guano sobre la riqueza vegetal también se ha demostrado en islas del Golfo de California e islas Chafarinas en el Mediterráneo, debido a que el alto contenido de nitrógeno, fósforo y pH ácido registrado en los suelos limitan el crecimiento de plantas (Sánchez-Piñero y Polis, 2000; Anderson y Wait, 2001; García *et al.*, 2002; Polis *et al.*, 2002; García, 2005; Wait *et al.*, 2005).

Las variables geomorfológicas también son importantes en el área de estudio, en lo particular, la cobertura de rocas, profundidad del suelo, pendiente, porcentajes de arena y limo, debido a que ejercen influencia en la distribución y abundancia de las especies mediante la existencia de sitios seguros, como se ha demostrado en otras localidades secas o muy secas del país (Ezcurra *et al.*, 1987; Huerta-Martínez, 2000; Huerta-Martínez y García-Moya, 2004; Huerta-Martínez *et al.*, 2004). Las características geomorfológicas intervienen en los procesos que limitan la distribución y abundancia de las plantas en varios sentidos. Por ejemplo, Milchunas y Noy-Meir (2002) demostraron que los refugios geológicos, además de ser una restricción física para herbívoros, modifican otras variables como la profundidad del suelo, la humedad debida al escurrimiento, la temperatura, etc., éstas variables son diferentes en un área rocosa que en una zona desprovista de éstas. El 75% de los sistemas insulares analizados en este trabajo se destacan por una alta cobertura rocosa que promedia 57.4% con variación de 86% (Bledos) al 20.5% (Cardo). Investigadores como Parker

(1991), Nobel *et al.* (1992), Danin (1999), Peters *et al.* (2008), Lopez *et al.* (2009), Bárcenas-Argüello *et al.* (2010), Carlucci *et al.* (2011) describen la relación de las rocas con las propiedades del suelo y el crecimiento de las plantas. En general, las rocas, dependiendo de su tamaño, atemperan la radiación solar directa, amortiguan temperaturas extremas del suelo, reducen la evaporación y canalizan agua a las raíces. Cactáceas y otras especies desérticas del noroeste de México, se distribuyen en micrositios sin suelo, por ejemplo, acantilados, cavidades o fisuras en las rocas y flujos de lava antiguos (Bashan *et al.*, 2002; Bashan *et al.*, 2006; Lopez *et al.*, 2009; Bárcenas-Argüello *et al.*, 2010). También en los desiertos costeros como el de Sinaloa se ha resaltado la importancia biológica de las rocas en la demografía y en la estructura de la comunidad vegetal de estos medios, en particular en las cactáceas, debido a que intervienen en la formación de reservorios de semillas (Valdez-Manzanares, 2009), propician las condiciones ambientales para favorecer la germinación de semillas (Sánchez-Soto, 2003; Sánchez-Soto *et al.*, 2005; Urías-Castillo, 2005; Sánchez-Soto *et al.*, 2010), incrementan la protección de plántulas contra herbívoros (Lugo-García, 2005; Reyes-Olivas *et al.*, 2006) y determinan patrones espaciales (Sánchez-Soto y Nolasco-Sánchez, 1999; Reyes-Olivas, 2002; Reyes-Olivas *et al.*, 2002).

La estructura y composición de las comunidades vegetales en las islas de barra de la costa de Sinaloa, entre ellas, Altamura, Iguanas, Saliaca y Talchichilte, esta determinada por el alto porcentaje de arena (83%), la profundidad del suelo (70 cm) y los escasos nutrimentos. En este sentido, Castillo y Moreno-Casasola (1998) destacan que las costas arenosas se caracterizan por un sustrato móvil en diverso grado y sus partículas suelen variar de tamaño de grano fino a grueso, su topografía es heterogénea, en la que resalta su baja capacidad de retención de agua y carencia de nutrimentos que delimitan conjuntos particulares de especies que pueden establecerse bajo estas condiciones. En lo general, la distribución de la vegetación en dunas costeras, a partir de la línea de la costa, inicia con la zona de pioneras (dunas embrionarias), hasta las dunas estabilizadas, en

donde se pueden encontrar especies arbustivas o arbóreas (Moreno-Casasola y Espejel, 1986; Romero-López *et al.*, 2006). Por ejemplo, en la barra costera El Mogote, Baja California Sur, México, la aspersion salina, el viento y la inundación son mayores en la costa y disminuyen de manera gradual tierra adentro; esto es, la influencia marina se expresa por altas concentraciones de K^+ y Na^+ en los suelos de las asociaciones de pioneras, manglares y del salitral, mientras que hay un incremento de materia orgánica al interior de la isla, donde hay matorral sarcocaula (Romero-López *et al.*, 2006). Altamura y Talchichilte presentan un gradiente ambiental semejante, siendo los tipos de vegetación de dunas, bosque de manglar, halófitas y bosque espinoso, para Altamura; y manglar, vegetación halófitas y bosque espinoso para Talchichilte (Flores-Campaña *et al.*, 2003). Así, en dunas costeras o islas de barra, existe una correlación entre gradientes de vegetación y factores ambientales como clima, suelo, viento, aspersion salina, disponibilidad de agua dulce y de nutrimentos (Ranwell, 1972; Moreno-Casasola y Espejel, 1986; Sykes y Wilson, 1988; Castillo *et al.*, 1991; Romero-López *et al.*, 2006; Lortie y Cushman, 2007; Kim y Yu, 2009; Torres *et al.*, 2010; Remke y Blindow, 2011).

Conclusión

Los factores del medio que limitan la distribución de especies vegetales en las 16 islas consideradas en esta investigación son geomorfológicos y edáficos. Mediante el análisis multivariable inferimos el efecto de cobertura de rocas, pendiente, profundidad del suelo, porcentajes de arena, limo, pH, materia orgánica, nitratos, calcio, fosfatos, en tres conjuntos de islas: a) Sistemas insulares como: Alta Blanca, Bledos, Patos y Pájaros que reciben aportes de guano de aves marinas que impactan negativamente en la riqueza específica y cobertura del dosel vegetal. En estas islas destaca la presencia de *Opuntia* spp. y *Stenocereus alamosensis*, además de las arbóreas *Crateva tapia*, *Ficus petiolaris* y *Plumeria rubra* fo. *acutifolia*, especies utilizadas por las aves para anidar, reproducirse o perchar; b) las islas de origen volcánico rocosas, de

textura franco arenosa, con profundidad de 2 a 15 cm y disponibilidad de nutrimentos, principalmente, fosfatos y materia orgánica, lo que facilita la formación de sitios apropiados para la distribución de especies como *Agave angustifolia*, *Bursera laxiflora*, *Coursetia glandulosa*, *Croton fragilis*, *Euphorbia californica*, *E. tomentosa*, *Haematoxylum brasiletto*, *Ipomoea arborescens*, *Jatropha cuneata*, *Paulinia sonorensis* y *Stenocereus thurberi*.; y c) islas arenosas, con suelos profundos de 70 cm, 82.6% de arena y nutrimentos limitados, fisonómicamente identificados por *Jatropha cinerea*, *Croton punctatus*, *Caesalpinia platyloba*, *Jacquinia pungens*, *Lycium richii*, *Karwinskia humboldtiana* y *Lantana camara*.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada (No. 98895) al primer autor para la realización de estudios doctorales en el Posgrado de Botánica del Colegio de Postgraduados y a Fondos Mixtos de CONACyT-Gobierno de Sinaloa por el financiamiento de la investigación (SIN-2006-CO1-37439). Asimismo se externa el apoyo del Dr. Mario Luna Cavazos, Colegio de Postgraduados, en los análisis multivariados.

Literatura citada

- Abd El-Ghani M.M. 2000. Floristics and environmental relations in two extreme desert zones of western Egypt. *Global Ecology and Biogeography* **9**:499-516.
- Abd El-Ghani M.M. y Amer W.M. 2003. Soil-vegetation relationships in a coastal desert plain of southern Sinai, Egypt. *Journal of Arid Environments* **55**:607-628.
- Anderson W.B. y Wait D.A. 2001. Subsidized Island Biogeography Hypothesis: another new twist on an old theory. *Ecology Letters* **4**: 289-291.
- Arshad M., Anwar-Ul-Hussan, Ashraf M.Y., Noureen S. y Moazzam M. 2008. Edaphic factors and distribution of vegetation in the Cholistan Desert, Pakistan. *Pakistan Journal of Botany* **40**:1923-1931.

- Arteaga M.B. 1988. Factores del sitio que influyen en la productividad de *Pinus patula* Schl. et Cham. en la región de Chignahuapan-Zacatlan, Puebla. *Agrociencia* **72**:121-131.
- Austin M.P. 1985. Continuum concept, ordination methods, and niche theory. *Annual Review of Ecology and Systematics* **16**:39-61.
- Austin M.P. 1999. The potential contribution of vegetation ecology to biodiversity research. *Ecography* **22**:465-484.
- Bárcenas-Argüello M.L., Gutiérrez-Castorena Ma.delC., Terrazas T. y López-Mata L. 2010. Rock-Soil Preferences of Three *Cephalocereus* (Cactaceae) Species of Tropical Dry Forests. *Soil Science Society of America Journal* **74**:1374-1382.
- Barton A.M. 1993. Factors controlling plant distributions: drought, competition, and fire in montane pines in Arizona. *Ecological Monographs* **63**:367-397.
- Bashan Y., Li C.Y., Lebsky V.K., Moreno M. y de-Bashan L.E. 2002. Primary colonization of volcanic rocks by plants in arid Baja California, Mexico. *Plant Biology* **4**: 392-402.
- Bashan Y., Vierheilig H., Salazar B. y de-Bashan L. 2006. Primary colonization and breakdown of igneous rocks by endemic, succulent elephant trees (*Pachycormus discolor*) of the deserts in Baja California, Mexico. *Naturwissenschaften* **93**: 344-347.
- Bremner J.M. 1965. Inorganic forms of nitrogen. En: Black C.A., Evans D.D., White J.L., Ensminger L.E. y Clark F.E. Eds. *Methods of soil analysis. Part 2.* pp. 1179-1237. Agronomy Monographs 9. ASA, Madison, WI.
- Canfield H.R. 1941. Application of the line interception method in sampling range vegetation. *Journal of Forestry* **39**:388-394.
- Carlucci M.B., Duarte L.daS. y Pillar V.D. 2011. Nurse rocks influence forest expansion over native grassland in southern Brazil. *Journal of Vegetation Science* **22**: 111-119.
- Castillo S., Popma J. y Moreno-Casasola P. 1991. Coastal sand dune vegetation of Tabasco and Campeche, Mexico. *Journal of Vegetation Science* **2**: 73-88.
- Castillo S. y Moreno-Casasola P. 1998. Análisis de la flora de dunas costeras del litoral Atlántico de México. *Acta Botánica de México* **45**: 55-80.
- Council on Soil Testing and Plant Analysis (CSTPA). 1980. *Handbook on reference methods for soil testing.* Revised edition. University of Georgia, Athens, Georgia. EE.UU. 459 pp.
- Danin A. 1999. Desert rocks as plant refugia in the Near East. *The Botanical Review* **65**: 93-170.

- Day P.R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. En: Black C.A., Evans D.D., White J.L., Ensminger L.E. y Clark F.E. Eds. *Methods of Soil Analysis: Part 1*. pp. 545-567. Agronomy Monographs 9. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin. EE.UU.
- Díaz J.S. 2008. Diversidad florística y estructura de la vegetación de las islas de los sistemas lagunares Navachiste y Macapule, del norte de Sinaloa. Tesis de Maestría, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa-IPN, Guasave, Sinaloa, México. 132 pp.
- Digby P.G.N. y Kempton R.A. 1987. *Multivariate analysis of ecological communities*. Chapman and Hall. London. 206 pp.
- Duarte M.C., Rego F. y Moreira I. 2005. Distribution patterns of plant communities on Santiago Island, Cape Verde. *Journal of Vegetation Science* **16**:283-292.
- Ezcurra E., Equihua M. y López-Portillo J. 1987. The desert vegetation of El Pinacate, Sonora, Mexico. *Vegetatio* **71**:49-60.
- Fernández-Palacios J.M. 1992. Climatic responses of plant species on Tenerife, The Canary Islands. *Journal of Vegetation Science* **3**:595-602.
- Fernández-Palacios J.M. 1997. Environmental determinants of vegetation variation on Tenerife (Canary Islands). En: Proceedings of the 36th (Santa Cruz de Tenerife) IAVS Symposium: Island and High Mountain vegetation: Biodiversity, bioclimate and conservation. pp. 55-74, Servicio de Publicaciones de la Universidad de La Laguna.
- Fernández-Palacios J.M. y de Nicolás J.P. 1995. Altitudinal pattern of vegetation variation on Tenerife. *Journal of Vegetation Science* **6**:183-190.
- Flores-Campaña L.M., Ortiz-Arellano M.A. y Arzola-González J.F. 2003. Islas e islotes de Sinaloa. En: Cifuentes-Lemus J.L. y Gaxiola-López J. Eds. *Atlas de los Ecosistemas de Sinaloa*, pp. 111-126, El Colegio de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México.
- Flores-Campaña L.M., Vega-Aviña R., Benítez-Pardo D. y Hernández-Aguilera F. 1996. Flora de la isla Venados de la bahía Mazatlán, Sinaloa, México. *Anales del Instituto de Biología de la UNAM, Serie Botánica* **67**:283-301.
- Flores-Palacios A., Martínez-Gómez J.E. y Curry R.L. 2009. La vegetación de Isla Socorro, archipiélago de Revillagigedo, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* **84**:13-23.
- García E. 1988. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones particulares de la República Mexicana)*. Offset Larios. México, D.F. 252 pp.

- García L.V. 2005. Suelos de las islas Chafarinas y sus relaciones ecológicas. *Ecosistemas* **14**: 135-139.
- García L.V., Marañón T., Ojeda F., Clemente L. y Redondo R. 2002. Seagull influence on soil properties, chenopod shrub distribution, and leaf nutrient status in semi-arid Mediterranean islands. *Oikos* **98**: 75-86.
- Gastélum-Felix, H. 2004. Ordenación ecológica de la vegetación del cerro de La Momoria. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Sinaloa, Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa. México. 68 pp.
- Geiger R. 1966. *The climate near the ground*. Harvard University Press, Cambridge. Massachusetts. EE.UU. 611 pp.
- Gobierno del Estado de Sinaloa. 2007. *Plan Estatal de Desarrollo Urbano del Estado de Sinaloa*. Secretaría de Desarrollo Social y Sustentable. Culiacán, Sinaloa. 125 pp.
- González-Medrano F. 1996. Algunos aspectos de la evolución de la vegetación de México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* **58**:129-136.
- Guevara-Estrada A. 2006. Riqueza y abundancia de aves en isla Patos, bahía de Ohuira, Sinaloa, México, 2003. Tesis de licenciatura, Universidad de Occidente, Unidad Los Mochis, Los Mochis, Sinaloa, México. 40 pp.
- Huerta-Martínez F.M. 2000. Análisis de gradientes en la vegetación de El Huizache, San Luis Potosí, México. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México, México. 86 pp.
- Huerta-Martínez F.M. y García-Moya E. 2004. Diversidad de especies perennes y su relación con el ambiente en un área semiárida del centro de México: Implicaciones para su conservación. *Interciencia* **29**:435-441.
- Huerta-Martínez F.M., Vázquez-García J.A., García-Moya E., López-Mata L. y Vaquera-Huerta H. 2004. Vegetation ordination at the southern Chihuahuan Desert (San Luis Potosi, Mexico). *Plant Ecology* **174**:79-87.
- Jones S.B. 1986. *Sistemática vegetal*. McGraw-Hill. México, D. F. 536 pp.
- Key L.J., Delph L.F., Thompson D.B. y Hoogenstyn E.P.V. 1984. Edaphic factors and the perennial plant community of a Sonoran Desert bajada. *The Southwestern Naturalist* **29**:211-222.
- Kim D. y Yu K.B. 2009. A conceptual model of coastal dune ecology synthesizing spatial gradients of vegetation, soil, and geomorphology. *Plant Ecology* **202**: 135-148.
- Lakhani K.H. y Davis N.K. 1982. Multiple regression models of the distribution of *Helianthemum chamaecistus* in relation to aspect and slope at Barnack, England. *Journal of Applied Ecology* **19**:621-629.

- León de la Luz J.L., Preceda A. y Benet R.C. 1996. Las comunidades vegetales en la Isla Socorro, México. *SIDA* **17**:215-230.
- León de la Luz J.L., Pérez-Navarro J.J. y Preceda A. 2000. A transitional xerophytic tropical plant community of the Cape Region, Baja California. *Journal of Vegetation Science* **11**:555-564.
- Li X., Tan H., He M., Wang X. y Li X. 2009. Patterns of shrub species richness and abundance in relation to environmental factors on the Alxa Plateau: prerequisites for conserving shrub diversity in extreme arid desert regions. *Science in China Series D: Earth Sciences* **52**:669-680.
- Lopez B, Bashan Y, Bacilio M y De la Cruz-Agüero G. 2009. Rock-colonizing plants: abundance of the endemic cactus *Mammillaria fraileana* related to rock type in the southern Sonoran Desert. *Plant Ecology* **201**: 575-588.
- Lortie C.J. y Cushman J.H. 2007. Effects of a directional abiotic gradient on plant community dynamics and invasion in a coastal dune system. *Journal of Ecology* **95**: 468-481.
- Ludwig J.A. y Reynolds J.F. 1988. *Statistical ecology: a primer on methods and computing*. John Wiley and Sons, Inc. New York, New York. EE.UU. 337 pp.
- Lugo-García G.A. 2005. Mortalidad de cactáceas causada por herbívoros en una isla de Topolobampo, Sinaloa. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Sinaloa, Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa. México. 61 pp.
- McAuliffe J.R. 1994. Landscape evolution, soil formation, and ecological patterns and processes in Sonoran Desert bajadas. *Ecological Monographs* **64**:112-148.
- McCune B. y Mefford M.J. 2011. *PC-ORD for Windows. Multivariate analysis or ecological data V. 6.0*. MjM Software, Gleneden Beach, Oregon. EE.UU.
- Menge B.A. y Olson A.M. 1990. Role of scale and environmental factors in regulation of community structure. *Trends in Ecology and Evolution* **5**:52-57.
- Milchunas D.G., Noy-Meir I. 2002. Grazing refuges, external avoidance of herbivory and plant diversity. *Oikos* **99**: 113-130.
- Montaña C. 1990. A floristic-structural gradient related to land forms in the southern Chihuahuan Desert. *Journal of Vegetation Science* **1**:669-674.
- Moreno-Casasola P. y Espejel I. 1986. Classification and ordination of coastal sand dune vegetation along the Gulf and Caribbean Sea of Mexico. *Vegetatio* **66**: 147-182.

- Nobel P.S. 1994. *Remarkable agaves and cacti*. Oxford University Press. New York, New York. EE.UU. 166 pp.
- Nobel P.S., Miller P.M., Graham E.A. 1992. Influence of rocks on soil temperature, soil water potential, and rooting patterns for desert succulents. *Oecologia* **92**: 90-96.
- O'Brien E.M. 1993. Climatic gradients in woody plant species richness: towards an explanation based on an analysis of southern Africa's woody flora. *Journal of Biogeography* **20**:181-198.
- Oke T.R. 1987. *Boundary layer climates*. 2nd. Edition. Methuen. 557 pp.
- Olea H.R. 1975. Ecología descriptiva de Sinaloa. *Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística* **122**:1-201.
- Otto R., Fernández-Palacios J.M. y Krüsi B.O. 2001. Variation in species composition and vegetation structure of succulent scrub on Tenerife in relation to environmental variation. *Journal of Vegetation Science* **12**:237-248.
- Palmer M.W. 1993. Putting things in even better order: the advantages of canonical correspondence analysis. *Ecology* **74**:2215-2230.
- Parker K.C. 1988. Environmental relationships and vegetation associates of columnar cacti in the northern Sonoran Desert. *Vegetatio* **78**:125-140.
- Parker K.C. 1991. Topography, substrate, and vegetation patterns in the northern Sonoran Desert. *Journal of Biogeography* **18**:151-163.
- Paruelo J.M., Sala O.E. y Beltrán A.B. 2000. Long-Term dynamics of water and carbon in semi-arid ecosystems: a gradient analysis in the Patagonian steppe. *Plant Ecology* **150**:133-143.
- Pausas J.G. y Austin M.P. 2001. Patterns of plant species richness in relation to different environments: an appraisal. *Journal of Vegetation Science* **12**:153-166.
- Pavón N.P., Hernández-Trejo H. y Rico-Gray V. 2000. Distribution of plant life forms along an altitudinal gradient in the semi-arid valley of Zapotitlan, Mexico. *Journal of Vegetation Science* **11**:39-42.
- Peters E.M. Martorell C. y Ezcurra E. 2008. Nurse rocks are more important than nurse plants in determining the distribution and establishment of globose cacti (*Mammillaria*) in the Tehuacan Valley, Mexico. *Journal of Arid Environments* **72**: 593-601.
- Phillips D.L. y MacMahon J.A. 1978. Gradient analysis of a Sonoran Desert bajada. *The Southwestern Naturalist* **23**:669-679.
- Polis G.A., Rose M.D., Sánchez-Piñero F., Stapp P.T. y Anderson W.B. 2002. Island Food Webs. En: Case T.J., Cody M.L. y Ezcurra E. Eds. *A New Island Biogeography of the Sea of Cortés*. pp. 362-380. Oxford University Press Inc. New York, New York. EE.UU.

- Ranwell D.S. 1972. *Ecology of salt marshes and sand dunes*. Chapman and Hall. Londres. 258 pp.
- Remke E. y Blindow I. 2011. Site specific factors have an overriding impact on Baltic dune vegetation change under low to moderate N-deposition- a case study from Hiddensee island. *Journal of Coastal Conservation* **15**: 87-97.
- Reyes-Olivas A. 2002. Patrones espaciales de cactáceas en el desierto costero de Topolobampo. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México, México. 184 pp.
- Reyes-Olivas A., García-Moya E. y López-Mata L. 2002. Cacti-shrub interactions in the coastal desert of northern Sinaloa, Mexico. *Journal of Arid Environments* **52**: 431-445.
- Reyes-Olivas A., Lugo-García G.A. y Sánchez-Soto B.H. 2006. Mortalidad de cactáceas causada por herbívoros en una isla de Topolobampo, Sinaloa. *Revista Ciencia y Tecnología: Resúmenes del 1er. Congreso Nacional de Biología. Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa.* **8**: 42.
- Reyes-Olivas A., Apodaca-Ovalle V., Cota-Sánchez J.H. y Casillas-Álvarez P. 2008. Relación del suelo y la topografía con la diversidad y la estructura de la vegetación insular en el desierto costero de Sinaloa, México. En: Flores-Campana L.M. Ed. *Estudios de las Islas del golfo de California*, pp. 53-66, Universidad Autónoma de Sinaloa-Gobierno del Estado de Sinaloa-Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México.
- Richards L.A. 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Agricultural Handbook No: 6 USA. 159 pp.
- Romero-López B.E., León de la Luz J.L., Pérez-Navarro J.J. y De la Cruz-Agüero G. 2006. Estructura y composición de la vegetación de la barra costera El Mogote, Baja California Sur, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* **79**:21-32.
- Sánchez-Mejía Z.M., Serrano-Grijalva L., Peñuelas-Rubio O., Pérez-Ruiz E.R., Sequeiros-Ruvalcaba E. y García-Calleja M.T. 2007. Composición florística y estructura de la comunidad vegetal del límite del desierto de Sonora y la selva baja caducifolia (Noroeste de México). *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* **3**:74-83.
- Sánchez-Piñero F. y Polis G.A. 2000. Bottom-up dynamics of allochthonous input: direct and indirect effects of seabirds on islands. *Ecology* **81**: 3117-3132.
- Sánchez-Soto B.H. 2003. Germinación de semillas de cinco especies de cactáceas del desierto costero de Topolobampo, Ahome, Sinaloa. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de México, México. 90 pp.

- Sánchez-Soto B.H. y Nolasco-Sánchez M.J. 1999. Relación de *Echinocereus sciurus* var. *floresii* (Backeb.) N. P. Taylor (Cactaceae) con arbustos y rocas en el desierto costero de Topolobampo, Ahome, Sinaloa. Tesis de licenciatura, Universidad de Occidente, Los Mochis, Sinaloa, México. 61 pp.
- Sánchez-Soto B.H., García-Moya E., Terrazas T. y Reyes-Olivas A. 2005. Efecto de la hidratación discontinua sobre la germinación de tres cactáceas del desierto costero de Topolobampo, Ahome, Sinaloa. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas* **50**: 4-14.
- Sánchez-Soto B.H., Reyes-Olivas A., García-Moya E. y Terrazas T. 2010. Germinación de tres cactáceas que habitan la región costera del noroeste de México. *Interciencia* **35**: 299-305.
- SAS Institute Inc. 2009. *SAS/STAT User's Guide Release 9.2*. SAS Institute, Cary, North Carolina. EE.UU. 7869 pp.
- Shreve F. 1937. Lowland vegetation of Sinaloa. *Bulletin Torrey Botanical Club* **64**:605-613.
- Shreve F. y Wiggins I.L. 1964. *Vegetation and Flora of the Sonoran Desert*. Vol. I y II. Stanford University Press. Stanford, California. EE.UU. 1740 pp.
- Sykes M.T. y Wilson J.B. 1988. An experimental investigation into the response of some New Zealand sand dune species to salt spray. *Annals of Botany* **62**: 159-166.
- Standley P.C. 1920-1926. Trees and Shrubs of Mexico. *Contributions from the United States National Herbarium* **23**:1-1721.
- ter Braak C.J.F. 1986. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology* **67**:1167-1179.
- ter Braak C.J.F. 1987. The analysis of vegetation-environment relationships by canonical correspondence analysis. *Vegetatio* **69**:69-77.
- ter Braak C.J.F. y Prentice I.C. 1988. A theory of gradient analysis. *Advances in Ecological Research* **34**:235-282.
- ter Braak C.J.F. y Šmilauer P. 2002. *CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5)*. Ithaca, NY, EE.UU. (www.canoco.com): Microcomputer Power. 500 pp.
- Toledo C., Rojas M., Navarro A., León L., Rojas J. y Deffis A. 1989. Estudio de impacto ambiental del desarrollo turístico ecológico de las islas Lobos y Venados. En: Deffis A. Ed. *Arquitectura ecológica tropical*. Editorial Concepto, México, D. F. 69 pp.

- Torres W., Méndez M., Dorantes A. y Durán R. 2010. Estructura, composición y diversidad del matorral de duna costera en el litoral Yucateco. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* **86**: 37-51.
- Tueller P.T., Tausch R.J. y Bostick V. 1991. Species and plant community distributions in a Mojave-Great Basin Desert transition. *Vegetatio* **92**:133-150.
- Urias-Castillo J. 2005. Ecología de la germinación de *Ferocactus herrerae* J.G. Ortega, una cactácea endémica de la costa noroccidental de México. Tesis de licenciatura, Universidad de Occidente, Los Mochis, Sinaloa, México. 58 pp.
- Valdez-Manzanares A.E. 2009. Distribución y consumo de semillas de cactáceas en el desierto costero de Topolobampo. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Sinaloa. Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México. 74 pp.
- Valverde P.L., Zavala-Hurtado J.A., Montaña C. y Escurra E. 1996. Numerical analyses of vegetation based on environmental relationships in the southern Chihuahuan Desert. *The Southern Naturalist* **41**:424-433.
- Vega-Aviña R., Benítez-Pardo D., Flores-Campaña L.M. y Hernández-Álvarez F. 2001. Vegetación y flora de la isla Pájaros e isla Lobos de la bahía de Mazatlán, Sinaloa. *Listados Florísticos de México* **21**:1-19.
- Villers-Ruiz L., Trejo-Vázquez I. y López-Blanco J. 2003. Dry vegetation in relation to the physical environment in the Baja California Peninsula, Mexico. *Journal of Vegetation Science* **14**:517-524.
- Wait D.A., Aubrey D.P. y Anderson W.B. 2005. Seabird guano influences on desert islands: soil chemistry and herbaceous species richness and productivity. *Journal of Arid Environments* **60**: 681-695.
- Walkley A. y Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method and a proposed modification of the chromic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* **37**:29-38.
- Whittaker R.H. y Niering W.A. 1975. Vegetation of the Santa Catalina Mountains, Arizona. V. Biomass, production, and diversity along the elevation gradient. *Ecology* **56**:771-790.
- Wiggins I.L. 1980. *Flora of Baja California*. Stanford University Press. Stanford, California. EE.UU. 1025 pp.
- Yeaton R.I. y Cody M.L. 1979. The distribution of cacti along environmental gradients in the Sonoran and Mohave Deserts. *Journal of Ecology* **67**:529-541.

DISCUSIÓN GENERAL

En esta investigación se informa el conocimiento de la Teoría del Equilibrio de Biogeografía de Islas (TEBI). Asimismo se generan conocimientos que hasta la fecha se desconocían en relación con el efecto de las variables biogeográficas tradicionales (área de la isla y distancia al continente) en la predicción de la riqueza específica en islas continentales de Sinaloa, México y cuáles son los factores geomorfológicos y edáficos que condicionan la estructura y composición de las comunidades vegetales en los sistemas insulares de la entidad.

Arrhenius (1921) y Gleason (1922) fueron los primeros en proponer modelos matemáticos para explicar la relación que existe entre el tamaño de un área determinada y el número de especies que se encuentran en ella. MacArthur y Wilson (1963, 1967) ejemplificaron en un esquema sencillo el proceso de reemplazo de especies basado en tan solo dos atributos (inmigración, extinción) y dos variables (distancia al continente y superficie de la isla); esto es, islas más alejadas, tendrían menores tasas de inmigración y mayores tasas de extinción, mientras que en islas cercanas sucedería lo contrario. En islas pequeñas, las tasas de extinción serían mayores que en islas grandes, en contraste con las tasas bajas de inmigración en las primeras *versus* tasas altas de inmigración para las segundas. Las islas continentales de Sinaloa, difieren en forma, tamaño, geología, clima y biología, por lo que resultó interesante probar el efecto de las variables consideradas por la TEBI con ayuda de los modelos matemáticos exponencial y función potencial sobre el número de especies vegetales en cinco islas de la entidad. El modelo exponencial y la función potencial no predicen el número de especies de plantas en cinco sistemas insulares de la entidad, hallazgos semejantes a los obtenidos en otras investigaciones (Connor y McCoy, 1979; He y Legendre, 1996; Panitsa *et al.*, 2006; Stiles y Scheiner, 2007). En busca de un mejor ajuste a la curva de especies-área se han generado otros modelos que se diferencian por el método de muestreo, el análisis de datos y el objetivo del investigador (Scheiner, 2003; Tjørve, 2003;

Dengler, 2009), por lo que se modificó el modelo exponencial mediante extrapolación al cuadrado del logaritmo del área [$S = \ln k + z (\ln A)^2$], que resultó apropiado para extrapolar con un mejor ajuste el número de especies de plantas en las islas estudiadas.

La riqueza de especies en una isla también puede estar determinada por factores biofísicos o mecanismos de respuesta, los que influyen en el número y composición de especies en un paisaje (Fox y Fox, 2000; Anderson y Wait, 2001; Lomolino y Weiser, 2001; Panitsa *et al.*, 2006; Dengler y Boch, 2008). Tal situación se aprecia en los sistemas isleños de Sinaloa, debido a que los análisis de clasificación y ordenación esclarecen que la geomorfología y edafología están involucradas en la determinación de la riqueza de especies vegetales en estos ambientes; en particular, cobertura de rocas, pendiente, profundidad, pH, porcentajes de arena, limo, materia orgánica, nitratos, fosfatos y calcio. El efecto de tales factores se diferencia en tres conjuntos de islas:

- 1) Islas que se caracterizan por ingresos de guano; las altas concentraciones de nitratos (818 ppm), fosfatos (2,208 ppm), y el pH ácido (4.8) del suelo, producidas por los recursos alóctonos producidos por las aves marinas, se asocian con la riqueza menor de especies de plantas en Alta Blanca, Bledos, Pájaros y Patos. Sánchez-Piñero y Polis (2000), Anderson y Wait (2001), García *et al.* (2002), Polis *et al.* (2002), García (2005) y Wait *et al.* (2005), asocian esta riqueza menor a los niveles tóxicos de los factores antes mencionados en las Golfo de California e islas Chafarinas en el mar Mediterráneo, lo cual podría estar ocurriendo en las islas bajo estudio.
- 2) Islas de origen volcánico; una cobertura de rocas de 56%, suelos profundos y fértiles proveen de sitios seguros para que en Cardo, Guasayeye, Huitussera, Lobos, Mazocahui, Tesobiate, Tunosa y Venados, se establezcan distintas especies vegetales. El papel de las rocas sobre la demografía y estructura vegetal está documentado en desiertos interiores (Parker, 1991; Nobel *et al.*, 1992; Danin, 1999; Peters

et al., 2008) y en el desierto costero sinaloense (Reyes-Olivas *et al.*, 2002; Lugo-García, 2005; Sánchez-Soto *et al.*, 2005; Valdez-Manzanares, 2009; Sánchez-Soto *et al.*, 2010).

- 3) Sistemas insulares arenosos (islas de barra) denominadas Altamura, Iguanas, Saliaca y Talchichilte que se definen por una profundidad mayor a 60 cm, suelos de textura arenosa (arena= 83%) y nutrimentos limitados, condiciones que permiten la formación de agrupamientos de matorral xerófilo, resultados que concuerdan con lo consignado por Romero-López *et al.* (2006) en el matorral sarcocaula de la isla de barra El Mogote, Baja California Sur, México y en vegetación de dunas costeras de nuestro país (Moreno-Casasola y Espejel, 1986; Castillo *et al.*, 1991; Torres *et al.*, 2010).

Literatura citada

- Anderson W.B. y Wait D.A. 2001. Subsidized Island Biogeography Hypothesis: another new twist on an old theory. *Ecology Letters* **4**: 289-291.
- Arrhenius O. 1921. Species and area. *Journal of Ecology* **9**:95-99.
- Castillo S., Popma J. y Moreno-Casasola P. 1991. Coastal sand dune vegetation of Tabasco and Campeche, Mexico. *Journal of Vegetation Science* **2**: 73-88.
- Connor E.F. y McCoy E.D. 1979. The statistics and biology of the species-area relationship. *The American Naturalist* **113**:791-833.
- Danin A. 1999. Desert rocks as plant refugia in the Near East. *The Botanical Review* **65**: 93-170.
- Dengler J. 2009. Which function describes the species-area relationship best? A review and empirical evaluation. *Journal of Biogeography* **36**:728-744.
- Dengler J. y Boch S. 2008. Sampling-design effects on properties of species-area relationships - a case study from Estonian dry grassland communities. *Folia Geobotanica* **43**:289-304.
- Fox B.J. y Fox M.D. 2000. Factors determining mammal species richness on habitat islands and isolates: habitat diversity, disturbance, species interactions and guild assembly rules. *Global Ecology and Biogeography* **9**:19-37.

- García L.V., Marañón T., Ojeda F., Clemente L. y Redondo R. 2002. Seagull influence on soil properties, chenopod shrub distribution, and leaf nutrient status in semi-arid Mediterranean islands. *Oikos* **98**: 75-86.
- García L.V. 2005. Suelos de las islas Chafarinas y sus relaciones ecológicas. *Ecosistemas* **14**: 135-139.
- Gleason H.A. 1922. On the relationship between species and area. *Ecology* **3**:158-162.
- He F. y Legendre P. 1996. On species-area relations. *The American Naturalist* **148**:719-737.
- Lomolino M.V. y Weiser M.D. 2001. Towards a more general species-area relationship: diversity on all islands, great and small. *Journal of Biogeography* **28**:431-445.
- Lugo-García G.A. 2005. Mortalidad de cactáceas causada por herbívoros en una isla de Topolobampo, Sinaloa. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Sinaloa, Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa. México. 61 pp.
- MacArthur R.H. y Wilson E.O. 1963. An equilibrium theory of insular zoogeography. *Evolution* **17**:373-387.
- MacArthur R.H. y Wilson E.O. 1967. *The theory of island biogeography*. Princenton University Press. Princenton, New Jersey. EE.UU. 203 pp.
- Moreno-Casasola P. y Espejel I. 1986. Classification and ordination of coastal sand dune vegetation along the Gulf and Caribbean Sea of Mexico. *Vegetatio* **66**: 147-182.
- Nobel P.S., Miller P.M., Graham E.A. 1992. Influence of rocks on soil temperature, soil water potential, and rooting patterns for desert succulents. *Oecologia* **92**: 90-96.
- Panitsa M., Tzanoudakis D., Triantis K.A. y Sfenthourakis S. 2006. Patterns of species richness on very small islands: the plants of the Aegean archipelago. *Journal of Biogeography* **33**:1223-1234.
- Parker K.C. 1991. Topography, substrate, and vegetation patterns in the northern Sonoran Desert. *Journal of Biogeography* **18**:151-163.
- Peters E.M. Martorell C. y Ezcurra E. 2008. Nurse rocks are more important than nurse plants in determining the distribution and establishment of globose cacti (*Mammillaria*) in the Tehuacan Valley, Mexico. *Journal of Arid Environments* **72**: 593-601.
- Polis G.A., Rose M.D., Sánchez-Piñero F., Stapp P.T. y Anderson W.B. 2002. Island Food Webs. En: Case T.J., Cody M.L. y Ezcurra E. Eds. *A New Island Biogeography of the Sea of Cortés*. pp. 362-380. Oxford University Press, Inc. New York, New York. EE.UU.

- Reyes-Olivas A., García-Moya E. y López-Mata L. 2002. Cacti-shrub interactions in the coastal desert of northern Sinaloa, Mexico. *Journal of Arid Environments* **52**: 431-445.
- Romero-López B.E., León de la Luz J.L., Pérez-Navarro J.J. y De la Cruz-Agüero G. 2006. Estructura y composición de la vegetación de la barra costera El Mogote, Baja California Sur, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* **79**:21-32.
- Sánchez-Piñero F. y Polis G.A. 2000. Bottom-up dynamics of allochthonous input: direct and indirect effects of seabirds on islands. *Ecology* **81**:3117-3132.
- Sánchez-Soto B.H., García-Moya E., Terrazas T. y Reyes-Olivas A. 2005. Efecto de la hidratación discontinua sobre la germinación de tres cactáceas del desierto costero de Topolobampo, Ahome, Sinaloa. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas* **50**: 4-14.
- Sánchez-Soto B.H., Reyes-Olivas A., García-Moya E. y Terrazas T. 2010. Germinación de tres cactáceas que habitan la región costera del noroeste de México. *Interciencia* **35**:299-305.
- Scheiner S.M. 2003. Six types of species-area curves. *Global Ecology and Biogeography* **12**: 441-447.
- Stiles A. y Scheiner S.M. 2007. Evaluation of species-area functions using Sonoran Desert plant data: not all species-area curves are power functions. *Oikos* **116**:1930-1940.
- Tjørve E. 2003. Shapes and functions of species-area curves: a review of possible models. *Journal of Biogeography* **30**:827-835.
- Torres W., Méndez M., Dorantes A. y Durán R. 2010. Estructura, composición y diversidad del matorral de duna costera en el litoral Yucateco. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* **86**: 37-51.
- Valdez-Manzanares A.E. 2009. Distribución y consumo de semillas de cactáceas en el desierto costero de Topolobampo. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Sinaloa. Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México. 74 pp.
- Wait D.A., Aubreya D.P. y Anderson W.B. 2005. Seabird guano influences on desert islands: soil chemistry and herbaceous species richness and productivity. *Journal of Arid Environments* **60**: 681-695.

CONCLUSIONES GENERALES

1. La Teoría del Equilibrio de Biogeografía de Islas (TEBI) es ampliamente utilizada por biogeógrafos, biólogos, ecólogos y conservacionistas con la finalidad de apoyarla o contradecirla.
2. La TEBI aplica un enfoque cuantitativo mediante un gráfico bidimensional basado en dos procesos ecológicos, extinción y colonización, en equilibrio para explicar la riqueza específica de las islas, cuyo número es función de dos variables: el tamaño de la isla y la distancia al continente, la fuente de especies colonizadoras.
3. Los cuestionamientos al modelo biogeográfico bidimensional incluyen aspectos biológicos y estadísticos, pero para algunos autores, el más controversial, es el no incluir un tercer proceso, la especiación generada dentro o entre islas.
4. Las ecuaciones exponencial y función potencial de Arrhenius y Gleason, respectivamente, fueron, con base en la información disponible, inadecuadas para explicar la riqueza vegetal en cinco islas de Sinaloa ($R^2 = 0.20-0.25$), mientras que la modificación al modelo exponencial mediante escalamiento al cuadrado del logaritmo del área, $[S = \ln k + z (\ln A)^2]$, permitió hacer estimaciones del número real de especies con un ajuste adecuado, poder predictivo del 96% al 98% y error menor al 3% con respecto al número real de especies.
5. El modelo, $[S = \ln k + z (\ln A)^2]$, pudiese ser aplicado exitosamente, por su alto poder predictivo, para determinar la riqueza vegetal en islas vecinas de la costa sinaloense, con la intención de optimizar los recursos económicos, humanos y tiempo, durante la realización de estudios florísticos o de otra índole.
6. La aplicación de las ecuaciones de Arrhenius y Gleason en islas continentales de Sinaloa resulta conveniente, en conjunto con hipótesis complementarias, dado las diferencias en geología, clima, superficie y especies que existen en los sistemas insulares sinaloenses, para que

contribuyan a esclarecer los patrones de distribución de las especies vegetales en estos medios.

7. Los factores del medio que limitan la distribución de especies vegetales en las 16 islas bajo estudio son geomorfológicos y edáficos, que con ayuda de análisis multivariados, podemos resaltar la cobertura de rocas, pendiente, profundidad del suelo, pH, calcio, fosfatos, porcentajes de arena, limo, materia orgánica y nitratos.
8. Los aportes de guano de aves marinas (recursos alóctonos), en Alta Blanca, Bledos, Patos y Pájaros incrementan, de manera significativa, la concentración de nitratos y fosfatos, al tiempo que causan la acidificación del suelo, que reduce la riqueza específica e incluso el dosel vegetal como en Alta Blanca (5%). Las principales especies que toleran estas condiciones son: *Crateva tapia*, *Ficus petiolaris*, *Opuntia* spp., *Plumeria rubra* fo. *acutifolia* y *Stenocereus alamosensis*, especies que proveen de sitios de anidación, reproducción y percha para las distintas aves.
9. Las islas de origen volcánico se caracterizan por su alta cobertura de rocas, suelo normal con textura franca arenosa, profundidad de suelo de 2 a 15 cm y disponibilidad de nutrientes, condiciones que permiten la formación de sitios apropiados para la distribución de *Agave angustifolia*, *Bursera laxiflora*, *Coursetia glandulosa*, *Croton fragilis*, *Euphorbia californica*, *E. tomentosa*, *Haematoxylum brasiletto*, *Ipomoea arborescens*, *Jatropha cuneata*, *Paulinia sonorensis* y *Stenocereus thurberi*.
10. Las islas arenosas con profundidad de suelo mayor a 60 cm, porcentaje de arena de 83% y nutrientes limitados, tienen conglomerados de matorral xerófilo denso, en los que destaca *Jatropha cinerea*, *Croton punctatus*, *Caesalpinia platyloba*, *Jacquinia pungens*, *Lycium richii*, *Karwinskia humboldtiana* y *Lantana camara*.

ANEXOS

Anexo 1. Doce características de interés biogeográfico entre sistemas insulares continentales, fragmentos continentales e islas oceánicas (Fernández-Palacios, 2004).

| Características | Islas continentales | Fragmentos continentales | Islas oceánicas |
|------------------------------|--|--|--|
| Origen | Aumento del nivel del mar debido a glaciaciones | Creación de una nueva dorsal centro-oceánica | Vulcanismo submarino dentro o entre placas |
| Desaparición | Descenso del nivel del mar | Colisión con un continente | Desmantelamiento erosivo |
| Aislamiento | Pequeño | Variable (pequeño en Cuba, grande en N. Zelanda) | Grande (excepto Canarias) |
| Tamaño | Grande | Grande | Pequeño (excepto Islandia) |
| Longevidad | Baja (20-30 mil años) | Alta (50-100 millones de años) | Media (10-20 millones de años) |
| Profundidad del brazo de mar | < 200 m | > 1,000 m | > 1,000 m |
| Litología | Granitos | Granitos | Basaltos |
| Erodibilidad | Baja | Baja | Alta |
| Fragmentación | Baja | Baja (excepto Baleares y Seychelles) | Alta |
| Biota original | Presente | Presente | Ausente |
| Relictualismo | Inexistente | Alto | Alto |
| Especiación | Inexistente | Por vicarianza | Por evento fundador |
| Endemicidad | Variable según latitud (baja en islas templadas, alta en islas tropicales) | Siempre muy alta | Alta |

Anexo 2. Comparación de la flora y tipos de vegetación de las islas de la costa de Sinaloa que han sido sujetas a estudios florísticos.

| Bahía | Isla | Área (ha) | Especies | Tipos de vegetación | Referencia |
|---------------------|-------------|-----------|----------|--|-------------------------------------|
| Mazatlán | Venados | 54 | 126 | 1. Bosque espinoso 2. Pastizal 3. Matorral xerófilo 4. Asociación pastizal con matorral 5. Vegetación halófito | Flores-Campaña <i>et al.</i> (1996) |
| | Pájaros | 48 | 56 | 1. Pastizal 2. Bosque espinoso 3. Vegetación halófito | Vega-Aviña <i>et al.</i> (2001) |
| | Lobos | 10.5 | 57 | 1. Pastizal 2. Pastizal con matorral xerófilo | Vega-Aviña <i>et al.</i> (2001) |
| Navachiste-Macapule | San Ignacio | 3 700 | 151 | 1. Manglar 2. Bosque espinoso 3. Vegetación de dunas costeras 4. Vegetación halófito 5. Matorral xerófito 6. Pastizal | Díaz (2008) |
| | Macapule | 2 700 | 139 | | |
| | Tesobiare | 510 | 129 | | |
| | Niscoco | 531 | 107 | | |
| | Vinorama | 870 | 106 | | |
| | Guasayeye | 54 | 93 | | |
| | Huitusera | 26 | 67 | | |
| | Ventana | 4 | 58 | | |
| | Metates | 53 | 54 | | |
| | Pájaros | 50 | 54 | | |
| | San Lucas | 44 | 53 | | |
| | Chivas | 65 | 52 | | |
| | Alhuate | 53 | 49 | | |
| | Pájaros II | 66 | 47 | | |
| | Mapachera | 23 | 46 | | |
| | Bledos | 1 | 42 | | |
| Molcajete | 2 | 13 | | | |
| Cerritos Blancos | 1 | 5 | | | |
| Ohuira | Mazocahui | 20.8 | 103 | 1. Matorral xerófilo heterogéneo | Reyes-Olivas (2002) |
| | Patos | 23 | 63 | 1. Matorral crasicaule | Reyes-Olivas <i>et al.</i> (2008) |

Anexo 3. Registros de cobertura vegetal (CV) en 57 sitios de muestreo de 16 islas de la costa de Sinaloa. Los nombres de las especies corresponden a la enumeración que se les asigno en el cuadro 1.

| Sitio | Especies | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CV (%) |
|-------|----------|---|----|---|----|----|---|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | |
| 1n | 6 | 0 | 33 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 19 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 74 |
| 1s | 0 | 0 | 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 9 | 1 | 1 | 3 | 18 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 73 |
| 1c | 6 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 8 | 0 | 0 | 12 | 0 | 4 | 8 | 13 | 0 | 0 | 1 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 70 | |
| 1e | 0 | 0 | 46 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 4 | 2 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 69 | |
| 1o | 3 | 0 | 13 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 11 | 0 | 3 | 2 | 13 | 0 | 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 62 | |
| 2n | 2 | 0 | 2 | 0 | 1 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 94 | 4 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 126 | |
| 2s | 0 | 0 | 57 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 5 | 0 | 0 | 18 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 117 | |
| 2c | 6 | 0 | 20 | 2 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22 | 1 | 0 | 15 | 0 | 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 113 | |
| 2e | 0 | 0 | 42 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 6 | 3 | 0 | 6 | 8 | 0 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 99 | |
| 2o | 7 | 0 | 30 | 0 | 2 | 1 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 49 | 0 | 7 | 11 | 1 | 3 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 121 | |
| 3n | 5 | 0 | 43 | 0 | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 126 | |
| 3s | 0 | 0 | 19 | 0 | 10 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 3 | 26 | 0 | 0 | 7 | 12 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 94 | |
| 3c | 0 | 0 | 5 | 0 | 5 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 30 | |
| 3e | 0 | 0 | 72 | 1 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 9 | 0 | 0 | 0 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 1 | 0 | 120 | |
| 3o | 4 | 0 | 35 | 0 | 6 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 5 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 14 | 0 | 0 | 8 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 83 | |
| 4n | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | |
| 4s | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | |
| 5e | 29 | 0 | 0 | 0 | 19 | 0 | 0 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 95 | |
| 6n | 0 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33 | |

Anexo 3. Continuación

| Sitio | Especies | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CV (%) |
|-------|----------|---|----|---|----|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | |
| 6s | 3 | 0 | 11 | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 14 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 11 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 54 |
| 6c | 1 | 0 | 13 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48 | |
| 6e | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 9 | 0 | 0 | 12 | 2 | 0 | 0 | 11 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 47 | |
| 6o | 8 | 0 | 31 | 0 | 11 | 0 | 0 | 2 | 0 | 14 | 0 | 0 | 29 | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 120 | |
| 7c | 0 | 0 | 12 | 0 | 1 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 | |
| 8c | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | |
| 8n | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | |
| 8o | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 | |
| 8s | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | |
| 8e | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| 9s | 0 | 0 | 4 | 0 | 30 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 35 | |
| 9o | 0 | 0 | 0 | 0 | 47 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48 | |
| 9n | 0 | 0 | 0 | 0 | 36 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36 | |
| 9c | 5 | 0 | 16 | 0 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 46 | |
| 9e | 0 | 0 | 9 | 0 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 39 | |
| 10e | 0 | 0 | 2 | 1 | 9 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 47 | 6 | 0 | 18 | 4 | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 7 | 6 | 3 | 4 | 132 |
| 10s | 0 | 0 | 18 | 0 | 0 | 0 | 2 | 4 | 0 | 29 | 0 | 25 | 11 | 0 | 5 | 7 | 0 | 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 21 | 6 | 1 | 159 |
| 10o | 8 | 0 | 11 | 0 | 0 | 3 | 1 | 3 | 5 | 0 | 0 | 43 | 7 | 0 | 28 | 8 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 5 | 0 | 19 | 9 | 7 | 0 | 173 |
| 10n | 16 | 0 | 28 | 6 | 0 | 3 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 24 | 10 | 0 | 39 | 9 | 0 | 26 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 6 | 6 | 11 | 0 | 191 |

Anexo 3. Continuación

| Sitio | Especies | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CV (%) |
|-------|----------|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | |
| 11n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 52 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 12 | 0 | 7 | 0 | 16 | 10 | 105 |
| 11e | 0 | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 19 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 75 |
| 11s | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 12 | 93 |
| 12n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 12 | 0 | 19 | 0 | 65 |
| 13o | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 6 | 0 | 4 | 1 | 86 |
| 13s | 0 | 0 | 18 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 19 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 0 | 0 | 7 | 98 |
| 13n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 9 | 0 | 1 | 0 | 60 |
| 13e | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 0 | 0 | 31 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 11 | 65 |
| 14n | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31 |
| 14e | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 58 |
| 15s | 1 | 65 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 |
| 15e | 0 | 48 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 73 |
| 15c | 0 | 33 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 71 |
| 15n | 0 | 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 58 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 126 |
| 15o | 0 | 98 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 119 |
| 16n | 5 | 57 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 81 |
| 16c | 9 | 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 54 |
| 16e | 15 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23 |
| 16o | 19 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 67 |
| μ | 3.1 | 6.6 | 11.6 | 0.3 | 5.0 | 1.3 | 0.4 | 1.3 | 4.5 | 2.0 | 0.7 | 2.5 | 5.1 | 0.4 | 7.2 | 1.1 | 1.9 | 3.2 | 1.9 | 1.0 | 1.5 | 0.7 | 3.0 | 0.8 | 0.8 | 1.9 | 0.9 | 1.2 | 0.8 | 72.4 |
| s | 5.8 | 19 | 16.6 | 0.9 | 10.3 | 2.7 | 1.0 | 3.3 | 10.4 | 5.5 | 2.2 | 9.4 | 9.2 | 1.6 | 14.9 | 2.6 | 5.2 | 13.5 | 6.6 | 4.2 | 5.1 | 2.0 | 7.6 | 3.1 | 3.1 | 4.3 | 3.2 | 3.7 | 2.7 | 44.3 |

Anexo 4. Valores promedios de las variables ambientales registradas en las 16 islas de la costa de Sinaloa. Los números corresponden al nombre de la isla: 1=Tesobiate, 2=Guasayeye, 3=Huitussera, 4=Alta Blanca, 5=Cardo, 6=Mazocahui, 7=Tunosa, 8=Bledos, 9=Patos, 10=Talchichilte, 11=Saliaca, 12=Altamura, 13=Iguanas, 14=Venados, 15=Pájaros y 16=Lobos.

| Variable | Isla | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|-------|-------|--------|-------|--------|---------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| pH | 6.42 | 6.32 | 6.52 | 5.00 | 6.50 | 5.70 | 6.40 | 4.32 | 4.90 | 6.13 | 7.70 | 7.30 | 6.10 | 5.70 | 4.84 | 5.90 |
| C.E(dS m ⁻¹) | 1.36 | 1.18 | 1.54 | 13.50 | 13.00 | 5.00 | 1.20 | 46.60 | 6.86 | 0.83 | 0.34 | 11.34 | 1.09 | 4.42 | 0.94 | 1.85 |
| P.S.I. (%) | 3.05 | 3.03 | 2.49 | 8.62 | 12.48 | 9.52 | 2.91 | 15.55 | 3.79 | 0.65 | 1.74 | 14.88 | 0.93 | 5.29 | 0.70 | 5.79 |
| R.A.S. | 2.83 | 3.00 | 2.60 | 7.59 | 10.52 | 8.84 | 2.89 | 14.02 | 3.71 | 1.30 | 1.93 | 12.71 | 1.49 | 4.67 | 1.11 | 5.06 |
| Ca ⁺⁺ (meq/ 100 g) | 4.42 | 3.40 | 5.40 | 50.00 | 40.00 | 14.80 | 3.50 | 179.00 | 23.00 | 2.63 | 0.94 | 22.00 | 2.67 | 16.00 | 3.90 | 4.38 |
| Mg ⁺⁺ (meq/ 100 g) | 3.64 | 2.40 | 3.90 | 35.00 | 25.00 | 9.80 | 2.50 | 121.00 | 17.80 | 1.88 | 0.49 | 26.80 | 1.82 | 8.25 | 3.00 | 3.50 |
| Na ⁺ (meq/ 100 g) | 5.06 | 5.00 | 5.40 | 40.00 | 60.00 | 23.20 | 5.00 | 156.00 | 36.86 | 2.00 | 1.65 | 62.80 | 2.35 | 17.00 | 2.00 | 9.75 |
| k ⁺ (meq/ 100 g) | 0.59 | 0.58 | 0.74 | 2.80 | 2.10 | 0.50 | 0.60 | 23.76 | 240.00 | 0.35 | 0.33 | 1.82 | 0.64 | 0.95 | 0.68 | 0.73 |
| Cationes (meq/ 100 g) | 13.7 | 11.38 | 15.44 | 127.80 | 127.10 | 48.30 | 11.60 | 479.76 | 317.66 | 6.85 | 3.40 | 113.42 | 7.48 | 42.20 | 9.58 | 18.35 |
| HCO ₃ ⁻ (meq/ 100 g) | 2.20 | 4.04 | 2.82 | 1.95 | 5.20 | 1.40 | 2.90 | 1.60 | 2.16 | 0.83 | 0.84 | 4.30 | 0.85 | 1.80 | 1.18 | 1.43 |
| CL ⁻ (meq/ 100 g) | 8.20 | 5.40 | 10.40 | 72.50 | 75.00 | 28.80 | 4.00 | 96.00 | 13.60 | 4.38 | 2.71 | 90.93 | 5.45 | 27.75 | 5.20 | 11.50 |
| S04 ⁼ (meq/ 100 g) | 2.25 | 1.94 | 2.22 | 54.15 | 46.90 | 18.10 | 4.70 | 382.16 | 48.64 | 1.65 | 0.60 | 16.67 | 1.06 | 12.65 | 3.20 | 5.43 |
| Aniones (meq/ 100 g) | 12.70 | 11.38 | 15.44 | 128.60 | 127.10 | 48.30 | 11.60 | 479.76 | 64.40 | 6.85 | 4.15 | 111.90 | 7.36 | 42.20 | 9.58 | 18.35 |
| Arena (%) | 50.50 | 56.00 | 43.80 | 65.90 | 57.00 | 44.20 | 53.00 | 57.60 | 60.30 | 87.65 | 62.63 | 90.60 | 89.50 | 53.30 | 68.00 | 66.00 |
| Limo (%) | 30.68 | 24.40 | 28.00 | 23.00 | 26.00 | 37.60 | 32.00 | 40.00 | 22.90 | 6.00 | 18.30 | 5.40 | 3.18 | 21.00 | 16.40 | 18.00 |
| Arcilla (%) | 19.82 | 19.60 | 28.20 | 11.10 | 17.00 | 17.20 | 15.00 | 21.52 | 16.80 | 6.35 | 19.07 | 4.00 | 7.33 | 25.70 | 15.60 | 16.00 |
| Materia orgánica (%) | 2.18 | 4.56 | 2.76 | 5.30 | 4.00 | 1.66 | 6.60 | 6.34 | 5.56 | 0.85 | 1.43 | 2.00 | 0.50 | 3.75 | 4.92 | 5.08 |
| Nitratos (ppm) | 14.78 | 16.62 | 10.12 | 32.85 | 11.40 | 16.68 | 8.20 | 51.60 | 147.56 | 21.23 | 0.87 | 1.40 | 8.50 | 18.95 | 3042.64 | 13.00 |
| Fosfatos (ppm) | 55.84 | 81.90 | 34.44 | 2871.65 | 425.20 | 101.30 | 489.80 | 2442.56 | 3504.00 | 63.30 | 0.43 | 45.60 | 95.53 | 116.50 | 14.10 | 113.98 |
| Profundidad del suelo (cm) | 7.0 | 11.76 | 11.84 | 2.00 | 5.70 | 6.84 | 2.80 | 12.56 | 27.94 | 60.00 | 60.00 | 100.00 | 60.00 | 4.75 | 21.66 | 7.58 |
| Cobertura rocosa (%) | 39.78 | 50.00 | 45.40 | 62.80 | 20.50 | 75.34 | 80.00 | 86.00 | 46.50 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 77.50 | 43.00 | 61.25 |
| Pendiente (°) | 23.40 | 18.20 | 18.20 | 37.50 | 18.00 | 14.40 | 5.00 | 18.60 | 20.80 | 2.00 | 5.00 | 5.00 | 1.00 | 37.50 | 26.20 | 34.25 |
| Índice de Radiación Solar (%) | 57.85 | 56.89 | 61.65 | 62.10 | 62.47 | 58.34 | 58.73 | 58.69 | 59.52 | 66.37 | 65.85 | 59.58 | 67.03 | 31.86 | 59.54 | 41.31 |
| Índice de Calor | 0.09 | -0.07 | 0.02 | 0.38 | -0.23 | -0.06 | -0.06 | -0.04 | -0.01 | 0.00 | -0.02 | -0.06 | 0.00 | -0.54 | -0.15 | -0.31 |

Anexo 5. Se describe la textura y fertilidad de los suelos en las islas continentales de Sinaloa, agrupadas por tipo de isla.

- 1) *Islas que se caracterizan por ingresos de guano.*- Los suelos son salinos o salinos sódicos con textura franca arenosa y profundidad de 16.0 cm, cobertura rocosa de 59.6% y pendiente de 25.8°. Los suelos tienen un pH extremadamente ácido (4.8), alta conductividad eléctrica (17.0 dS m⁻¹), PSI de 7.2% y RAS de 6.6. El potasio, calcio y sodio son altos con valores de 66.81 meq/ 100 g, 64.0 meq/ 100 g y 58.7 meq/ 100 g; el contenido de nitratos y fosfatos son extremadamente altos, 818.7 ppm y 2,208.1 ppm; la materia orgánica es muy alta con un 5.5%.
- 2) *Islas de origen volcánico.*- La textura de los suelos varía de franca a franca arenosa con profundidad media de 7.3 cm, cobertura rocosa de 56.2% y pendiente de 21.1°. El suelo es normal con pH de 6.2, conductividad eléctrica de 3.7 dS m⁻¹, PSI de 5.6% y RAS de 5.1. El potasio y calcio son bajos con 0.85 meq/ 100 g para el primer nutrimento y 11.5 meq/ 100 g en el segundo, mientras que el sodio es alto (16.0 meq/ 100 g); el contenido de nitratos es de 13.72 ppm y el fósforo aprovechable es muy alto con 177.4 ppm; la materia orgánica es muy alta con un 3.8%.
- 3) *Sistemas insulares arenosos (islas de barra):* La textura es arenosa con profundidad mayor a 60.0 cm, cobertura rocosa de 1.0% y pendiente de 3.3°. Los suelos son normales y tienen un pH de 6.8, conductividad eléctrica de 3.4 dS m⁻¹, PSI de 4.6% y RAS de 4.4. El potasio y el calcio son bajos con valores de 0.8 meq/ 100 g y 7.1 meq/ 100 g, mientras que el sodio es muy alto con 17.2 meq/ 100 g; el contenido de nitratos es de 8 ppm y los fosfatos son altos con 51.2 ppm; la materia orgánica es baja con 1.2%.