



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DE LA
COMUNIDAD VEGETAL DE DOS SITIOS SUJETOS A
ACCIONES DE RESTAURACIÓN DURANTE EL
PERIODO 2005-2012 EN LA RESERVA ECOLÓGICA
DEL PEDREGAL DE SAN ÁNGEL, CIUDAD DE
MÉXICO, MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**B I Ó L O G A
P R E S E N T A:**

SURYA IVONNE GONZÁLEZ JARAMILLO



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. ZENÓN CANO SANTANA
CIUDAD DE MÉXICO 2018**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS
Secretaría General
División de Estudios Profesionales

Votos Aprobatorios

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE
Directora General
Dirección General de Administración Escolar
Presente

Por este medio hacemos de su conocimiento que hemos revisado el trabajo escrito titulado:

Estructura y composición de la comunidad vegetal de dos sitios sujetos a acciones de restauración durante el periodo 2005-2012 en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Ciudad de México, México

realizado por Surya Ivonne González Jaramillo con número de cuenta 309038001 quien ha decidido titularse mediante la opción de tesis en la licenciatura en **Biología**. Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Propietario Dr. Pedro Eloy Mendoza Hernández 

Propietaria M. en C. Yuriana Martínez Orea 

Propietario Dr. Zenón Cano Santana 
Tutor

Suplente Biól. Sandra Nayeli González Mateos 

Suplente M. en C. Genoveva Villalobos Contreras 

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., A 17 DE ENERO DE 2018

JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ

Señor sinodal: antes de firmar este documento, solicite al estudiante que le muestre la versión digital de su trabajo y verifique que la misma incluya todas las observaciones y correcciones que usted hizo sobre el mismo.

*A mis abuelitos José y Virginia,
seres excepcionales que siempre creyeron en mí
y me enseñaron a amar y respetar la vida.*

*A mis padres,
por su apoyo incondicional.
Su amor es mi principal motivo.*

*A Diana,
persona esencial en mi vida.
Sin ella este logro no habría sido posible.*

*Al Dr. Zenón, al Mtro. Iván y a la Biól. Nayeli,
que son mis maestros y, sobre todo, mis amigos.
Sus enseñanzas me han hecho mejor persona.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, José Guadalupe González López y María Virginia Jaramillo Ordóñez, por ser mis ejemplos a seguir. Por su incansable lucha en la vida contra todo obstáculo para que yo lograra alcanzar esta meta, por sus palabras siempre de aliento, por las pláticas, los regaños y hasta las bromas. Les debo todo lo que soy.

A Diana Ferrusca Domínguez, pequeña traviesa y mi compañera en todo momento. Por ser mi mano derecha en campo y compartir conmigo todo tipo de sentimientos en este proceso, así como mi amor por la hermosa Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA).

Al Dr. Zenón Cano Santana, por su apoyo, cariño, paciencia y sus variadas enseñanzas, sobre ecología y filosofía de la vida. Cada una de ellas siempre la llevaré conmigo.

Al M. en C. Iván Castellanos Vargas, por su apoyo técnico en campo. Sin sus regaños no lo hubiera hecho correctamente. Sobre todo gracias por su amistad.

A la Biól. Nayeli González Mateos, por enseñarme que las personas más inteligentes y capaces siempre tienen como cualidades una enorme sencillez y perseverancia.

A la M. en C. Yuriana Martínez Orea, por la identificación de los ejemplares herborizados.

A mis sinodales, el Dr. Pedro Eloy Mendoza Hernández, la M. en C. Yuriana Martínez Orea, la Biól. Nayeli González Mateos y la M. en C. Genoveva Villalobos Contreras, por su importante contribución a este trabajo.

A mi amigo, el Biól. Manuel Bonilla por sus sabios consejos y por compartir conmigo sus conocimientos.

A mis amigos que he encontrado a lo largo de la carrera, Javier Pineda, Ethel Luna, la Biól. Rocío Moreno, la Biól. Nadia Soto y la Biól. Karina Macías, por cada gran momento en el que estuvimos juntos compartiendo más que clases.

Al Biól. Marco A. Romero Romero y a Melisa Medina Alvarado, por la revisión técnica del manuscrito.

A mis compañeros y amigos por su valioso apoyo en campo, Carmen Tagle Villalpando, Luis Alberto Orozco Flores, Javier Pineda Pereznúñez, la Biól. Paulina Corona Tejeda y Alma Delia García Alfaro.

A la máxima casa de estudios de la nación, la Universidad Nacional Autónoma de México, así como a la Facultad de Ciencias, por haberme brindado la oportunidad

de formarme profesionalmente en sus aulas. Es un orgullo pertenecer a esta institución.

Al Laboratorio de Interacciones y Procesos Ecológicos por la formación como bióloga y apoyo para la realización de este trabajo.

A cada uno de mis profesores de la Facultad que me enriquecieron académica y personalmente con sus enseñanzas.

Este trabajo se llevó a cabo dentro del marco del Taller “Ecología terrestre y manejo de recursos bióticos”. Agradezco mucho a todo los profesores que lo integran por la formación recibida.

A la Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (SEREPSA), por el apoyo para la realización de las jornadas de restauración ecológica.

Al Ing. Alfredo Martínez Sigüenza, jefe de la Dirección de Áreas Verdes y Conservación, por su ayuda para facilitar los contenedores de residuos orgánicos en las jornadas de restauración ecológica.

A todos los asistentes voluntarios a las jornadas de restauración, por colaborar a la conservación de la REPSA: Sandra Ayala Romero, Juan Pablo Camacho Ruedas, Santiago Javier Carreto Castro, Dante Salvador Cerqueda Carrillo, Eduardo Misael Choreño Parra, Paulina Corona Tejeda, Daniel Díaz Hernández, Manuel Edday Farfán Beltrán, Alma Delia García Alfaro, Ricardo González Hernández, Ariadna González Martínez, Diego Gutiérrez Ascención, Ilan Kotlar Goldaper, Diana Laura Manríquez Guzmán, Nancy Mejía Domínguez, Daniela Ortiz Díaz, Alma Ortega, Daniela Ortiz Díaz, Antonio Maximiliano Ortiz Rodríguez, Diana Laura Pacheco Olvera, Rodrigo Abraham Pérez García, Stella Alejandra Quiroz Pérez, Oscar Said Quiroz Zerecero, Aída Ramírez Hernández, Lourdes Ramírez López, Jezreel Barac Rivadeneyra Fiscal, Karina Yanet Rivas Ángel, Miriam Noemí Rivera Sánchez, Érika Rivero Sánchez, José Eduardo Rodríguez Bustamante, José de Jesús Sánchez Ponce, Valentina Sandoval Granillo, Annamaria Savarino Drago, Renato Adriel Suárez Monroy, Jonathan Alexis Torres Campuzano, Daniela Alejandra Troncoso Rodríguez y Óscar Zárate Martínez.

Agradezco al proyecto PAPIIT-UNAM IN222816 “Ecología de *Sylvilagus floridanus* (Lagomopha: Leporidae) en la Reserva Ecológica de Ciudad Universitaria, D.F.”, a cargo del Dr. Zenón Cano Santana, por haberme brindado una beca de conclusión de estudios.

Esta tesis fue apoyada financieramente por el proyecto PAPIIT-UNAM IV200117 “Análisis ecosocial de una reserva urbana para la sustentabilidad en el campus de Ciudad Universitaria”, otorgado a los doctores Luis Zambrano González, Zenón Cano Santana y Alicia Castillo Álvarez.

El proyecto de restauración ecológica ha gozado de los apoyos financieros de los proyectos PAPIIT-UNAM IN222006 “Evaluación del estado de conservación y restauración ecológica de la Reserva del Pedregal de San Ángel” (2006-2007) y PAPIME-UNAM PE204809 “Regeneración de áreas verdes de vegetación natural de Ciudad Universitaria y su Reserva Ecológica sujetas a restauración” (2009-2010), a cargo del Dr. Zenón Cano Santana, así como de la Unidad de Enseñanza de la Biología de la Facultad de Ciencias, los institutos de Ecología y Biología, así como del Jardín Botánico y la SEREPSA, todos de la UNAM.

ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1. Justificación de la restauración ecológica y su importancia	4
1.2. Especies exóticas, nativas y arvenses en la restauración.....	6
1.3. La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: historia y amenazas	7
1.4. Los eucaliptos en la REPSA	10
1.5. Acciones de restauración ecológica en A8 y A11	13
1.6. Justificación.....	16
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	18
3. MÉTODOS	20
3.1 Sitio de estudio.....	20
3.2 Jornadas de restauración ecológica 2011-2015.....	21
3.3. Estructura de la comunidad vegetal: método sin área	23
3.4. Estructura de la comunidad vegetal en los parches recuperados	25
3.5. Listado florístico	26
3.6. Estructura de la comunidad vegetal: método con área	26
3.7. Rebrote y reclutamiento de eucaliptos	28
4. RESULTADOS	30
4.1 Estructura de la comunidad vegetal: método sin área	30
4.2. Estructura de la comunidad vegetal en los parches recuperados	36
4.3. Listado florístico	41
4.4. Estructura de la comunidad vegetal: método con área	43
Estrato	58
4.5 Rebrote y reclutamiento de eucaliptos	58
5. DISCUSIÓN	64
5.1. Recuperación de la comunidad vegetal	64
5.2. La colonización en los parches de sustrato basáltico	76
5.3. La especie dominante <i>Pennisetum clandestinum</i>	78
5.4. Efectividad del voleo de semillas	79

5.5. Rebrote y reclutamiento de eucaliptos	80
5.6 Evaluación de las acciones de restauración ecológica	81
6. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES	85
LITERATURA CITADA	89
ANEXO 1	101
ANEXO 2	102
ANEXO 3	105
ANEXO 4	110

González-Jaramillo, S.I. 2018. Estructura y composición de la comunidad vegetal de dos sitios sujetos a acciones de restauración durante el periodo 2005-2012 en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Ciudad de México, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 117 pp.

RESUMEN

La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) alberga una riqueza biológica considerable y ofrece también diversos e importantes servicios ambientales. A pesar de ello, ésta se ha visto afectada por diversos disturbios antropogénicos, tales como la acumulación de basura, la construcción de edificios y la introducción de fauna y flora exótica, en este último caso destaca el efecto negativo de los eucaliptos. Con el objetivo de restaurar la estructura y función del ecosistema se han llevado a cabo labores de restauración ecológica en algunas de sus áreas de amortiguamiento, como es el caso de A8 (un camellón dominado por eucaliptos y utilizado para acumular desechos de jardinería) y A11 (un estacionamiento cancelado). Los objetivos de este trabajo son: 1) conocer la estructura y composición de la comunidad vegetal de las áreas A8 y A11 sujetas a restauración, en comparación con las que tiene una zona conservada de referencia (en adelante ZCR); 2) evaluar la eficacia de un programa de introducción de semillas de 29 especies al voleo realizado en junio 2009; 3) conocer el estado de las poblaciones de *Eucalyptus camaldulensis* en los dos sitios sujetos a restauración; y 4) conocer la recuperación de la comunidad vegetal de seis parches de sustrato basáltico recuperado localizados en A8 y A11. Se registró la cobertura de cada especie vegetal utilizando el método de interceptación de línea (o línea de Canfield) en la temporada de lluvias (agosto-octubre de 2014) y secas (diciembre 2015). Se hicieron listados florísticos de los

tres sitios y de los seis parches de sustrato basáltico recuperado de septiembre de 2014 a septiembre de 2015. En los tres sitios se analizó la composición y estructura de la comunidad vegetal usando métodos con área en el periodo de diciembre de 2014 a abril de 2015 y de noviembre a diciembre de 2015. En octubre y noviembre de 2015 en los sitios sujetos a restauración se hizo un censo de eucaliptos reclutados o que se regeneraron de una remoción mecánica de tejidos aéreos con machete realizada 3.5 años antes (en abril de 2012). Se registraron un total de 95 especies de plantas en A8, 81 en A11 y 79 en la ZCR. La especie dominante en los tres sitios fue *Buddleia cordata*. A8 y A11 tuvieron mayor cobertura de especies nativas (62.90% y 71.39%, respectivamente) que de exóticas (36.60% y 26.44%). La especie exótica con mayor dominancia en ambos sitios fue *Pennisetum clandestinum*. La estructura de la comunidad vegetal de los sitios sujetos a restauración ecológica sigue siendo diferente a la de la ZCR, aunque A8 no difiere de ésta última en el área basal en los árboles, así como en densidad y cobertura de las plantas en los tres estratos. A11, en particular, registró una gran densidad de árboles de *Buddleia cordata*, pues existen espacios entre las rocas en los cuales se acumuló suelo que favoreció la presencia de un estrato arbóreo más denso. Se registró la presencia de solamente dos especies de las 29 dispersadas al voleo en A8: *Opuntia tomentosa* y *Salvia mexicana*. Se encontraron un total de 82 eucaliptos; 30 en A8 y 52 en A11, la mayoría plantas que se regeneraron de tejidos remanentes, los cuales midieron entre 0.26 y 23 m de altura, con hasta 18 ramas a la altura del pecho. Se concluye que la restauración en A8 y A11 ha sido parcial debido a que ninguno de los dos sitios es completamente similar en estructura y composición de la comunidad vegetal con

la ZCR; sin embargo, A11 tiene más atributos que lo hacen más similar a la ZCR. Se encuentran evidencias de que los parches de sustrato basáltico recuperado son colonizados principalmente por plantas nativas no arvenses, lo que muestra la importancia de restaurar el sustrato basáltico original como acción central de restauración ecológica en los pedregales. Se sugiere seguir con acciones de monitoreo y de manejo de plantas exóticas.

Palabras clave: *Buddleia cordata*, composición y estructura, especies dominantes, especies exóticas, *Eucalyptus camaldulensis*, *Pennisetum clandestinum*, restauración ecológica.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación de la restauración ecológica y su importancia

Cuando en un ecosistema ocurre un disturbio, hay cambios en la composición de especies, estructura y funcionamiento de una comunidad, dependiendo de la intensidad del disturbio, el ecosistema podrá o no regenerarse (Brown y Lugo, 1994). Cuando la intensidad de un disturbio es de gran magnitud el ecosistema puede degradarse, esto significa una reducción en las condiciones edáficas y en la riqueza biótica, lo que provoca un daño en la capacidad del ecosistema de producir bienes y servicios (Brown y Lugo, 1994). En este punto, la estabilidad del ecosistema se altera por un disturbio y el ecosistema no puede regenerarse por sí mismo, por lo que son necesarias acciones que permitan la recuperación de algunas propiedades del ecosistema original (Hobbs y Harris, 2001). Bajo esta motivación, muchos científicos se han propuesto desarrollar técnicas que permitan restaurar la diversidad biológica, las funciones ecosistémicas y los servicios ambientales que los ecosistemas naturales nos aportan (Meli y Carrasco-Carballido, 2011). Estas diferentes actividades son la rehabilitación, la reclamación y la restauración ecológica, que se diferencian entre sí por sus objetivos, metas y compromisos en la recuperación del ecosistema (SER, 2004)¹.

¹ La *rehabilitación* busca crear condiciones adecuadas para que el sistema en cuestión tenga ciertas funciones específicas, y ésta puede ser considerada como restauración parcial o incompleta. La *reclamación* intenta recuperar la productividad y estructura de un ecosistema, pero no la biodiversidad, ya que se requieren sus beneficios socioeconómicos. La *restauración* busca la recuperación del ecosistema, incluyendo su biodiversidad y productividad. Definiciones de SER (2004).

Al considerar la alta diversidad biológica existente en México, la restauración ecológica resulta ser la más adecuada para aplicarse a los ecosistemas del país, ya que es la única estrategia comprometida con la recuperación de la estructura y funcionamiento originales de los ecosistemas, lo cual garantizaría la sostenibilidad de los mismos, así como la conservación de la biodiversidad que éstos albergan (INECC, 2013). En este sentido, la restauración ecológica es una actividad que inicia o acelera la recuperación de un ecosistema con respecto a su integridad y sostenibilidad, y con ella se pretende restaurar tanto la composición como la estructura de la comunidad con el fin de estimular la integridad de un ecosistema, incluyendo su funcionamiento y resistencia a los disturbios (Valverde *et al.*, 2005; Pomeroy *et al.*, 2007).

La Society for Ecological Restoration International (SER, 2004) mencionó nueve atributos de un ecosistema que ha sido restaurado, aunque no es esencial que se cumplan todos, pues sólo se necesita demostrar que éste lleva una trayectoria apropiada de desarrollo ecosistémico hacia el sitio de referencia. Estos nueve rasgos son: 1) contiene un conjunto característico de especies que habitan en el ecosistema de referencia y que proveen una estructura apropiada de la comunidad; 2) consta de especies autóctonas hasta el máximo grado factible; 3) todos los grupos funcionales necesarios para el desarrollo del mismo se encuentran representados, o si no, los grupos faltantes tienen el potencial de colonizar por medios naturales; 4) el ambiente físico tiene la capacidad de sostener poblaciones reproductivas de las especies necesarias para la estabilidad a lo largo de la trayectoria deseada; 5) aparentemente funciona normalmente de

acuerdo con su estado ecológico de desarrollo y no hay señales de disfunción; 6) se ha integrado con la matriz ecológica con la cual interactúa a través de flujos e intercambios bióticos y abióticos; 7) se han eliminado o reducido las fuentes de disturbio; 8) tiene suficiente capacidad de recuperación para aguantar los acontecimientos estresantes periódicos y normales del ambiente local; y 9) es autosostenible al mismo grado que su ecosistema de referencia y tiene el potencial de persistir indefinidamente bajo las condiciones ambientales existentes. Además, existen características muy puntuales de las especies que se deben de considerar.

1.2. Especies exóticas, nativas y arvenses en la restauración

Un gran número de plantas arvenses son pioneras en la sucesión secundaria de la vegetación (Espinosa-García y Villaseñor-Ríos, 1998) y algunas de éstas actúan facilitando el establecimiento de nuevas especies, por lo cual es importante su estudio en procesos de restauración ecológica. Una maleza o arvense es una planta silvestre que crece en los cultivos, y la gran mayoría de éstas prosperan donde los humanos realizan o han realizado sus actividades, sin embargo, también pueden competir con plantas domesticadas, de aquí surge el nombre de *maleza* porque es considerada como una mala hierba que puede desplazar a un cultivo (Espinosa-García y Villaseñor-Ríos, 1998). Después de la restauración pueden colonizar especies nativas², sin embargo, también pueden

² *Especie nativa* es aquella que se encuentra dentro de su área de distribución natural u original, acorde con su potencial de dispersión natural, sin ayuda o intervención del ser humano, de modo que esta especie forma parte de las comunidades bióticas naturales del área (CONABIO, 2016)

existir semillas de especies exóticas³ ya que esto depende de la composición vegetal original del sitio y del banco de semillas que esté presente en el suelo (Gálvez, 2002). Las especies exóticas en su mayoría son introducidas por humanos, y lo ideal es extraerlas de los ecosistemas sujetos a restauración debido a que muchas de éstas pueden convertirse en potenciales especies invasoras en los hábitats que colonizan, pues llegan a desplazar a las especies nativas, lo cual puede causar a largo plazo la disminución de la biodiversidad alguna zona de interés (Gálvez, 2002).

1.3. La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: historia y amenazas

El Pedregal de San Ángel, localizado al sur del Valle de México, se formó con la erupción del volcán Xitle, la cual ocurrió en el año 280 ± 35 d.n.e., época en la cual sus lavas cubrieron un área de unos 80 km^2 (Rzedowski, 1954; Siebe, 2009). El nuevo sustrato basáltico recién creado, con el tiempo, le dio paso a la colonización y el establecimiento de las plantas a lo largo y ancho del derrame (Cano-Santana y Meave, 1996). Como resultado de este proceso de sucesión surgió un mosaico de comunidades vegetales, entre los que se encuentran bosques de *Pinus*, *Abies*, *Alnus* y *Quercus*, matorral de *Quercus* y matorral xerófilo de palo loco [*Pittocaulon* (*ex Senecio*) *praecox* Rob y Brettell (Asteraceae)], estas comunidades están distribuidas entre 2,250 y 3,100 m s.n.m. (Rzedowski, 1954). El matorral xerófilo, en particular, ocupa la mayor área y se

³ *Especie exótica* es aquella que se encuentra fuera de su distribución original o nativa ya sea histórica o actual, la cual no se basa en su potencial de dispersión natural (CONABIO, 2016).

desarrolló en las partes más bajas, entre 2,200 y 2,500 m s.n.m. (Rzedowski, 1954).

En la segunda mitad del siglo XX el desarrollo urbano de la ciudad de México tuvo un aumento que provocó la destrucción y fragmentación del Pedregal de San Ángel; sin embargo, en 1983 y en los terrenos de Ciudad Universitaria (C.U.) se creó la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) a iniciativa de un grupo de académicos y alumnos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Rojo, 1994). La REPSA se caracteriza por proteger sobre todo parte del matorral xerófilo de palo loco característico de la parte norte del derrame del Xitle y actualmente resguarda 237 ha (la tercera parte de C.U.) y está compuesta por 18 fragmentos repartidos en tres zonas núcleo y 13 de amortiguamiento, las cuales albergan en conjunto más de 1,532 especies nativas (REPSA, 2014).

El matorral xerófilo que resguarda la REPSA es peculiar por estar ubicado en una zona con un clima templado subhúmedo con un suelo escaso y poco profundo en un sustrato basáltico, en el que predomina una vegetación arbustiva y herbácea y pocos elementos arbóreos (Rzedowski, 1978). La REPSA resguarda cerca del 6% del territorio que alguna vez ocupó el matorral xerófilo de *P. praecox* (Rojo, 1994) y tiene un importante valor biológico, cultural y ambiental para la Ciudad de México, ya que es un refugio para la importante biodiversidad que alberga, dentro de esta gran megaurbe, además de ser un ecosistema importante para la investigación científica por encontrarse en un *campus* universitario (Lot y Camarena, 2009). Este ecosistema es una de las zonas de mayor riqueza

florística de toda la Cuenca de México, pues alberga 337 especies de plantas vasculares, 148 especies de aves, 34 especies de mamíferos, 23 especies de reptiles y siete especies de anfibios (SEDEMA, 2014). Sin embargo, la importancia de la REPSA no sólo se basa en la riqueza biótica con la que cuenta, sino que también ofrece diversos servicios ambientales de provisión, regulación, soporte y servicios culturales (Nava-López *et al.*, 2009; Castillo-Argüero *et al.*, 2016).

A pesar de la gran importancia que tiene de ser una reserva natural de carácter urbano y uno de los últimos relictos del ecosistema del Pedregal, ésta enfrenta disturbios de diversa índole, entre los cuales se encuentran (Castillo-Argüero *et al.*, 2009, 2016; Lot *et al.*, 2012; Zambrano *et al.*, 2016): reducción y fragmentación del Pedregal debido al crecimiento urbano, caminos, veredas y rejas que restringen el paso de la fauna silvestre; presencia sistemática de personas; depósitos clandestinos de basura, escombros y residuos de jardinería; introducción de flora y fauna exótica; extracción y pérdida de la flora y fauna nativa e incendios, entre otros.

Además, hay un evidente cambio en la composición de especies vegetales entre las áreas conservadas y las zonas cubiertas por escombros o basura inorgánica. Cano-Santana (1994b), por ejemplo, menciona que las especies dominantes en las áreas conservadas de la REPSA son especies nativas como *Muhlenbergia robusta* (E. Fourn.) Hitch (Poaceae), *Verbesina virgata* Kunth (Asteraceae), *Buddleia cordata* Kunth (Scrophulariaceae), *Dahlia coccinea* Cav. (Asteraceae) y *Echeveria gibbiflora* DC (Crassulaceae), mientras que Antonio-Garcés *et al.* (2009) y Hernández-Herrerías (2011) mencionan que en las zonas

cubiertas por escombros o basura inorgánica dominan algunas especies nativas, como *B. cordata*, *B. parviflora* Kunth (Scrophulariaceae) y *Wigandia urens* Kunth (Hydrophyllaceae), especies exóticas como *P. clandestinum*, *Ricinus communis* L. (Euphorbiaceae), *Nicotiana glauca* Graham (Solanaceae), *Tropaeolum majus* L. (Tropaeolaceae) y *Rhynchelytrum repens* Willd (Poaceae), además de otras especies exóticas del estrato arbóreo como *Eucalyptus camaldulensis*.

1.4. Los eucaliptos en la REPSA

En México se han utilizado diversas especies vegetales para hacer reforestación, entre las que se encuentran los eucaliptos (*Eucalyptus* spp.), un género de árboles exóticos originarios de Australia (Costa-Pérez *et al.*, 2006), cuyos individuos demandan de muchos recursos para sobrevivir y desarrollarse, llegando a desplazar a algunas plantas nativas al excluirlas por competencia (Sánchez *et al.*, 2005). Los eucaliptos han sido utilizados en el mundo entero para reforestar diferentes áreas, pues la madera que producen es adecuada para diversos usos, como el consumo doméstico, leña de alto poder calorífico, producción de carbón vegetal, estructuras de edificios y postes para comunicaciones, por mencionar algunos (Costa-Pérez *et al.*, 2006).

La introducción de eucaliptos en la Ciudad de México se dio en la década de 1930, bajo la iniciativa del ingeniero forestal Miguel Ángel de Quevedo, debido a la capacidad de estos árboles de crecer rápidamente y de absorber relativamente grandes cantidades de agua, como una estrategia para extraer agua del suelo y evitar las inundaciones que en ese entonces dañaban a la ciudad (Cano-Santana *et al.*, 2006). No obstante, esta acción generó problemas con el

paso del tiempo. En la década de 1980 se analizó que los árboles de eucalipto introducidos tenían efectos negativos sobre las comunidades y ecosistemas donde fueron introducidos, ya que liberan sustancias alelopáticas que afectan a bacterias fijadoras de nitrógeno, plantas y hongos micorrízicos, además de que llegan a dañar a las abejas y abejorros que visitan sus flores y representan un peligro por la fragilidad de sus ramas que tienden a caerse, poniendo en peligro personas y bienes (Espinosa-García, 1996; Ezcurra *et al.*, 1999, Cano-Santana *et al.*, 2006, Segura-Burciaga, 2009).

Cuando el *campus* de Ciudad Universitaria se encontraba en construcción en 1951, se introdujeron en ese año alrededor de 200 plántulas de *Eucalyptus* spp. como un plan de reforestación en casi todos los bordes de las vialidades de Ciudad Universitaria, así como en los jardines y camellones. Estos eucaliptos se fueron dispersando alrededor de los fragmentos existentes de vegetación natural pertenecientes al ecosistema nativo, los cuales ahora forman parte de la REPSA (Segura-Burciaga y Meave, 2001; Cano-Santana *et al.*, 2006; Antonio-Garcés *et al.*, 2009). La velocidad de crecimiento de estos árboles generan cambio en la estructura, ya que su follaje forme un dosel que no corresponde a la etapa sucesional de la comunidad vegetal del matorral xerófilo que se desarrolla en la parte baja del Pedregal de San Ángel (Cano-Santana *et al.*, 2006; Antonio-Garcés *et al.*, 2009). Debido a su talla, los eucaliptos compiten de manera exitosa por la radiación solar, la cual disminuye en su disponibilidad y calidad para las plantas que crecen bajo sus copas; además, forman en el suelo un mantillo profundo de hojas, frutos y flores de lenta descomposición y su alcance radicular les permite apropiarse del agua y nutrimentos del suelo (Segura-Burciaga y Meave, 2001;

Cano-Santana *et al.*, 2006; Antonio-Garcés *et al.*, 2009). Asimismo, los eucaliptos pueden ser peligrosos, ya que deterioran el pavimento, los edificios y las banquetas (Cano-Santana *et al.*, 2006; Antonio-Garcés *et al.*, 2009). Debido a todos estos problemas, en 1991 el rector de la UNAM, Dr. José Sarukhán Kermez, creó el Programa de Mejoramiento Ecológico del *Campus*, en el que se incluía un subprograma: el “Programa de control de eucaliptos” (PCE) en el *campus*, que inició sus labores a mediados de 1994 (Cano-Santana *et al.*, 2006). La primera labor de este programa fue realizar un inventario de las plantas leñosas en todas las áreas con jardines del *campus* entre 1994 y 1995. Se encontró que el 80% de las especies de árboles y arbustos eran introducidas, y que *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh (Myrtaceae) representaba el 60% de estas especies (Cano-Santana *et al.*, 2006; Antonio-Garcés *et al.*, 2009). En 1994 se tenía el cálculo de que existían un total de 28,000 eucaliptos en el *campus*, 25,000 en áreas urbanas y 3,000 en la Reserva ecológica (Cano-Santana *et al.*, 2006). De acuerdo con estos datos, el programa de control de eucaliptos determinó que deberían eliminarse en la zona urbana de Ciudad Universitaria el 60% de los eucaliptos. Hasta enero de 2001 se extrajeron 10,279 eucaliptos, mil de ellos en la Reserva ecológica, sin embargo, desde esta fecha, la frecuencia de tala se ha concentrado prácticamente en eliminar los árboles peligrosos para prevenir accidentes (Cano-Santana *et al.*, 2006). Cabe mencionar que este programa de sustitución no se encontraba integrado a un proyecto de restauración ecológica.

1.5. Acciones de restauración ecológica en A8 y A11

Desde el año 2005 en las áreas de amortiguamiento A8 (“Biológicas”) y A11 (“Vivero Alto”) se han llevado a cabo diversas acciones de restauración, las cuales han sido acompañadas con un monitoreo de la estructura de la comunidad vegetal, así como de algunos componentes de la fauna (artrópodos y vertebrados), esto a cargo del grupo de Interacciones y Procesos Ecológicos (antes llamado Ecología de Artrópodos Terrestres) de la Facultad de Ciencias de la UNAM (Antonio-Garcés, 2008; Antonio-Garcés *et al.*, 2009; San José-Alcalde, 2010; Villeda-Hernández, 2010; Saucedo-Morquecho, 2011; González-Rebeles Guerrero, 2012; Muñoz-Saavedra, 2013; Ayala-López de Lara, 2014; Estañol-Tecuatl, 2014; Farfán-Beltrán, 2016; Peña-Mendoza, 2016; Estañol-Tecuatl y Cano-Santana, 2017; Corona-Tejeda, 2017; E. Valdez del Ángel, en prep.).

La porción noreste del área de amortiguamiento 8 (desde ahora A8) es un camellón que estuvo sujeto a disturbios de diversa índole. Sufrió la acumulación de desechos inorgánicos y de jardinería desde 1974, y se depositó cascajo en sus bordes donde domina el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), además de haber estado sujeto a la dominancia por eucaliptos introducidos desde la década de 1950 (Cano-Santana *et al.*, 2010). En este sitio, se ha llevado a cabo, entre 2005 y 2012, la extracción y manejo del 90% de eucaliptos presentes en el área, la extracción de más de 400 m³ de desechos orgánicos, basura inorgánica y cascajo, la recuperación de 350 m² de sustrato basáltico, así como la introducción de plántulas y semillas de plantas nativas por siembra al voleo y siembra de 1079 plántulas provenientes de semillas pre acondicionadas de 10 especies, así como

el manejo de las poblaciones de *Mirabilis jalapa* y *Ricinus communis* (Antonio-Garcés, 2008; Antonio-Garcés *et al.*, 2009; San José-Alcalde, 2010; Saucedo-Morquecho, 2011; Muñoz-Saavedra, 2013; Ayala-López de Lara, 2014; Estañol-Tecuatl, 2014; Farfán-Beltrán, 2016; Peña-Mendoza, 2016; Estañol-Tecuatl y Cano-Santana, 2017). En el área se llevaron a cabo 22 jornadas de restauración las cuales se realizaron entre el 23 de abril del 2005 hasta de abril del 2012 (San José-Alcalde, 2010; Villeda-Hernández, 2010; González-Rebeles Guerrero, 2012; Estañol-Tecuatl, 2014; Farfán-Beltrán, 2016; Estañol-Tecuatl y Cano-Santana, 2017; E. Valdez del Ángel, en prep). Además de las acciones de restauración en las que se trató de eliminar la mayor parte de tipos de disturbios, Ayala-López de Lara (2014) llevó a cabo en la temporada seca de 2008-2009 una introducción de 1, 428,357 semillas de 28 especies nativas (ver Tabla A1.1 en el Anexo 1) provenientes de la Zona Núcleo de la REPSA, así como la introducción por trasplante de seis encinos (*Quercus* sp.) con una altura promedio de 65 cm en la parte central del sitio.

El área de Amortiguamiento 11 (en adelante A11), por su parte, estuvo sujeta a disturbios de noviembre de 2004 a enero de 2005 causados por la remoción de toda la cubierta vegetal, la extracción de cantera y el relleno y aplanamiento de la zona con el fin de construir un estacionamiento que posteriormente fue cancelado (Cano-Santana *et al.*, 2010). Las acciones llevadas a cabo en este sitio comenzaron en marzo de 2005, cuando se extrajo el material de relleno con maquinaria y se adicionó roca basáltica desde guijarros de 10 cm hasta cantos de 1.2 m de diámetro con el objetivo de favorecer un incremento de la heterogeneidad topográfica, sin embargo, estas rocas basálticas estaban

contaminadas por rizomas de pasto kikuyo, desechos inorgánicos y sedimentos no consolidados. Debido a esto, de marzo a abril de 2005, se eliminaron desechos inorgánicos y se extrajeron parcialmente rizomas de este pasto invasor, las jornadas de restauración continuaron en octubre de 2006 y junio de 2010 en las cuales se extrajeron más de 300 m³ como suma plantas exóticas como *Pennisetum clandestinum*, *R. communis*, *E. camaldulensis*, *Nicotiana glauca* y *Tropaeolum majus*, y plantas nativas malezoides dominantes como *Wigandia urens* y *Phytolacca iccosandra*, así como sedimentos no consolidados. La extracción de *N. glauca* cesó en abril de 2009 debido a que ésta ofrece alimento y percha a aves; también se detuvo la extracción de *P. iccosandra* en mayo de 2007 debido a que esta provee alimento a ratones, tlacuaches y cacomixtles (Antonio-Garcés *et al.*, 2009; Cano-Santana *et al.*, 2010; San José-Alcalde, 2010). En este sitio, al estar cercano a una zona núcleo adyacente, no se llevó a cabo la introducción de semillas, debido a que se consideró que la lluvia de semillas provenientes de esa zona cumpliría su función (Cano-Santana *et al.*, 2010). Otros detalles de las acciones de restauración llevadas a cabo en A8 y A11 se señalan en el Anexo 2.

Como parte de las acciones se limpiaron, en ambas zonas, seis parches de sustrato basáltico original con áreas que variaron entre 27.14 m² a 404.63 m² (ver Anexo 3) (Saucedo-Morquecho, 2011; González-Rebeles Guerrero, 2012; Ayala-López de Lara, 2014; Peña-Mendoza, 2016; E. Valdez del Ángel, en prep.).

1.6. Justificación

Debido a la importancia del Pedregal de San Ángel y de los servicios ambientales que ésta ofrece a la sociedad, es necesario coadyuvar en su protección y crear estrategias que logren detener su degradación y la pérdida de su biota nativa. Una de estas estrategias es hacer estudios en sitios de la REPSA en los que se han llevado a cabo acciones de restauración ecológica a través de la recuperación del sustrato basáltico y del manejo de plantas exóticas invasoras que permitan saber cómo ocurre el cambio en la composición y estructura vegetal a lo largo del tiempo. Esto en comparación con sitios conservados de referencia que no hayan estado sujetos al disturbio, de manera que se pueda evaluar el estado del ecosistema y la idoneidad de las acciones de restauración llevadas a cabo.

Es importante también darle continuidad al monitoreo de la comunidad vegetal, el que no se había realizado desde 2010. Asimismo, dado que los muestreos previos siempre fueron realizados con un método sin área (línea de Canfield) (Antonio-Garcés *et al.*, 2009; Villeda-Hernández, 2010; González-Rebeles Guerrero, 2012; Saucedo-Morquecho, 2011; Muñoz-Saavedra, 2013; Ayala-López de Lara, 2014; Estañol-Tecuatl, 2014; Peña-Mendoza, 2016; E. Valdez del Ángel, en prep.), no hay datos sobre la estructura vertical de la comunidad vegetal, ni de la densidad de plantas, lo cual hace deseable su aplicación. También es importante darle seguimiento a los fragmentos de sustrato basáltico recuperado para conocer el patrón de colonización de especies vegetales.

Por otra parte, la extracción de plantas exóticas como los eucaliptos constituye una parte importante en las acciones de restauración, ya que esta especie provoca los daños mencionados anteriormente. En A8 y A11 no se llevaban a cabo jornadas de restauración desde abril de 2012 en las que se buscara extraer los eucaliptos que se regeneraron desde tocones o por lluvia de semillas. Es importante, entonces, seguir manejando estas plantas y estimar cuál es la capacidad de regeneración de *Eucalyptus camaldulensis* en estas zonas.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

El objetivo general de esa tesis es evaluar la idoneidad, efectividad, viabilidad, aplicabilidad y replicabilidad de las acciones de restauración llevadas a cabo en las áreas A8 y A11 de la Reserva del Pedregal de San Ángel desde el 2005, a través del monitoreo de variables relacionadas con la estructura y composición de la comunidad vegetal en los dos sitios bajo manejo, en comparación con una zona conservada de referencia. De este objetivo general se derivan los siguientes objetivos particulares:

1. Conocer la composición y estructura de la comunidad vegetal actual seis parches de sustrato basáltico recuperado.
2. Evaluar la densidad de las especies de plantas cuyas semillas fueron dispersadas en junio 2009 al voleo en el NE del Área de amortiguamiento A8.
3. Conocer la estructura de las poblaciones de *Eucalyptus camaldulensis* en los dos sitios de estudio tras 3.5 años de ausencia de actividades de remoción y manejo, de manera que se pueda describir qué pasa si se abandona un programa de manejo mecánico de eucaliptos en los sitios sujetos a restauración en ese periodo de tiempo.

Dado lo anterior, se formula como hipótesis: si las áreas sujetas a restauración se han recuperado, entonces éstas tendrán una estructura y composición de especies similar con la zona conservada de referencia (ZCR). Además, si la introducción de semillas de especies nativas (árboles, hierbas o

arbustos) al voleo fue exitosa, se tendrá una dominancia detectable de estas especies de plantas. Finalmente, a 3.5 años del abandono del programa de manejo de eucaliptos, éstos serán abundantes en ambos sitios, dada la alta capacidad de regeneración de los tocones y el reclutamiento de individuos a través de semillas.

3. MÉTODOS

3.1 Sitio de estudio

La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (237.3 ha; 19°18'21"–19°20'11" norte, 99°10'15"–99°12'4" oeste, 2200-2277 m está localizada en la Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, Ciudad de México (México). Del total, 171.1 ha pertenecen a las tres zonas núcleo (Oriente, Poniente y Sur Oriente) y 66.2 ha están repartidas en las 13 áreas de amortiguamiento (REPSA, 2014). Protege una vegetación de tipo matorral xerófilo cuyo sustrato es roca volcánica basáltica sobre la cual se asienta un suelo escaso o poco profundo (REPSA, 2014). Su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano [Cb (w_1) w], con una temperatura media anual de 15.5° C y variaciones extremas que van desde los -6°C hasta los 34.6°C con una precipitación media anual de 835 mm, repartida irregularmente en una época lluviosa que va de junio a octubre y una época seca que ocurre de noviembre a mayo (Valiente-Banuet y De Luna, 1990; REPSA, 2014; Castillo-Argüero *et al.*, 2016).

El área de amortiguamiento A11 "Vivero Alto" se encuentra al sur de la Zona Núcleo Poniente de la REPSA, la porción noreste sujeta a restauración tiene un área de 2500 m² (0.25 ha) y está dividida en dos porciones por un camino de terracería, es adyacente al norte con la zona núcleo poniente de la REPSA. El área está rodeada en los bordes por *Ricinus communis*, y dominan especies como *Tropaeolum majus*, *P. clandestinum* y *B. cordata* (Antonio-Garcés *et al.*, 2009; Cano-Santana *et al.*, 2010; Estañol-Tecuatl y Cano-Santana, 2017).

El Área de Amortiguamiento A8 “Biológicas”, por su parte, es un camellón central de un circuito de Ciudad Universitaria, cuya porción noreste de 0.51 ha estado sujeta a acciones de restauración y está ubicada en una hondonada de 2-4 m de profundidad (Antonio-Garcés *et al.*, 2009; Cano-Santana *et al.*, 2010).

Se seleccionó como Zona Conservada de Referencia (ZCR) el área de 50 x 50 m ubicada dentro de la Zona Núcleo Poniente de la REPSA a 5 m al norte de la zona sujeta en restauración en A11, la cual presenta una topografía heterogénea con grietas de 3-4 m de profundidad, planicies y promontorios rocosos, en ésta dominan especies nativas como *Pittocaulon praecox*, *Buddleia cordata*, *Dahlia coccinea*, *Cissus sicyoides* y *Dodonaea viscosa*, aunque también tiene árboles de gran talla pertenecientes a la especie *Eucalyptus camaldulensis* (Cano-Santana *et al.*, 2010; González-Rebeles Guerrero, 2012). Esta área fue seleccionada debido a que muestra riqueza y mayor cobertura de especies nativas no arvenses y una diversidad elevada, atributos que muestran un grado de funcionalidad de un ecosistema cuya trayectoria sucesional es a la que se pretende llegar en las zonas sujetas a restauración (ver Estañol-Tecuatl, 2014; Estañol-Tecuatl y Cano-Santana, 2017).

3.2. Jornadas de restauración ecológica 2011-2015

Se reportan cuatro jornadas llevadas a cabo por el Dr. Zenón Cano Santana: dos en A8 (9 de octubre de 2011 y el 15 de abril de 2012) y dos en A11 (13 de noviembre de 2011 y 20 de mayo de 2012), así como las dos realizadas para el presente trabajo: una en A8 (8 de noviembre de 2015) y una en A11 (18 de

octubre de 2015). En las cuales las acciones principales fueron: 1) retiro de desechos inorgánicos, 2) extracción de las plantas exóticas *R. communis* y *E. camaldulensis*, y 3) anillamiento de eucaliptos. El anillamiento de eucaliptos es el proceso que consiste en cortar una franja alrededor del tronco del árbol para eliminar una porción de la corteza y floema para impedir el flujo de sustancias elaboradas provocando al paso del tiempo la muerte del árbol (Louman *et al.*, 2001), aunque la última acción solamente se llevó a cabo en los árboles que no fueron extraídos en los dos sitios. En las jornadas se invirtieron un total de 354.2 horas persona en A11, y se extrajeron en total 47.37 m³ de tejidos vegetales, 5.77 m³ de tierra y 1.29 m³ de desechos inorgánicos (Tabla 3.1). En A8 se invirtieron un total de 242.9 horas persona y se extrajeron en total 37.1 m³ de tejidos vegetales de *Eucalyptus camaldulensis*, 5.6 m³ de tierra y 10.9 m³ de desechos inorgánicos, además, se limpiaron 11.6 m² de sustrato basáltico original (Tablas 1 y 2). Como parte de la jornada del 2012 en A11 se usaron los tejidos de los eucaliptos removidos para colocar obstáculos que impidieran el paso de las personas a la zona. Esto mismo se hizo en 2015 en A8.

Tabla 1. Número de asistentes, esfuerzo de trabajo (horas persona), y volumen de tejidos vegetales y desechos inorgánicos y tierra extraídos en el área sujeta a restauración A8 durante las jornadas llevadas a cabo en 2011, 2012 y 2015.

Fecha	Asistentes	Esfuerzo (horas persona)	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> (m ³)	Tierra extraída (m ³)	Sustrato recuperado (m ²)	Desechos inorgánicos (m ³)
13-nov-11	25	75.0	14.1	3.6		0.5
20-may-12	20	68.9	0.3	2	11.6	1.2
8-nov-15	33	99.0	22.7			9.2
Total	78	242.9	37.1	5.6	11.6	10.9

Tabla 2. Número de asistentes, esfuerzo de trabajo (horas persona) y volumen de tejidos vegetales y desechos inorgánicos y tierra extraídos en el área sujeta a restauración, A11 durante las jornadas llevadas a cabo en 2011, 2012 y 2015. D.I. = desechos inorgánicos

Fecha	Asistentes	Esfuerzo (horas persona)	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> (m ³)	<i>Ricinus communis</i> (m ³)	<i>Pennisetum clandestinum</i> (m ³)	<i>Rhynchelytrum repens</i>	Tierra (m ³)	D.I. (m ³)
9-oct-11	25	100	13.65	14.81		0.09	3.94	0.64
15-abr-12	35	109.2	3.14		0.21		1.83	0.12
18-oct-15	29	145	15.369	0.104				0.528
Total	89	354.2	32.159	14.914	0.21	0.09	5.77	1.288

3.3. Estructura de la comunidad vegetal: método sin área

Para conocer la estructura de la comunidad vegetal (en términos de cobertura relativa, diversidad, riqueza y frecuencia de especies vegetales) en las dos áreas sujetas a acciones de restauración ecológica y la zona conservada de referencia se utilizó el método de intercepción de línea conocida también como línea de Canfield (1941), mediante dos muestreos de 150 m de línea: uno en la temporada de lluvias (agosto-octubre, 2014) y otro en temporada de secas (diciembre, 2015),

para lo cual se registró la cobertura de cada especie de planta en la línea en cada tramo de 1 m considerando las plantas de los tres estratos de vegetación. Este método se sigue utilizando para comparar los datos con los de estudios previos realizados en A8 y A11 (Antonio-Garcés *et al.*, 2009; Villeda-Hernández, 2010; González-Rebeles Guerrero, 2012; Saucedo-Morquecho, 2011; Muñoz-Saavedra, 2013; Ayala-López de Lara, 2014; Estañol-Tecuatl, 2014; Farfán-Beltrán, 2016; E. Valdez del Ángel, en prep.).

En el área A8 se trazaron cuatro líneas paralelas de 39 a 50 m de norte a sur, separadas entre sí por 19 a 37 m, sumando 150 m en total. Dado que el área A11 está dividida en dos secciones separadas por un camino, se trazaron seis líneas con dirección norte-sur: en la sección este se trazaron tres líneas de 35 m separadas 16 m entre sí, y en su sección oeste se trazaron tres de 15 m separadas 14 m entre ellas. En la Zona Conservada de Referencia (ZCR) se trazaron tres líneas de 50 m con dirección norte-sur con una separación de 16 m entre sí.

Los datos obtenidos se procesaron para poder comparar la frecuencia de las especies dominantes con base en el número de tramos de un metro en los que se registraba cada especie en los 150 m de línea en cada sitio. Con estos datos se estimó la diversidad utilizando el índice de diversidad de Simpson (D') y el índice de Shannon-Wiener (H' , usando \ln). Por otro lado, las especies se clasificaron como nativas no arvenses, nativas arvenses y exóticas, y se comparó la cobertura relativa de estos tres tipos de especies en los tres sitios, de acuerdo con Antonio-Garcés *et al.* (2009), quien identificó a las especies arvenses de

acuerdo con Espinosa-García y Villaseñor-Ríos (1998) y las exóticas con base en Espinosa-García y Villaseñor-Ríos (2004). Las plantas que no se encontraron en la lista de Antonio Garcés *et al.* (2009), se catalogaron como arvenses si estaban registradas como tales en Espinosa-García y Sarukhán (1997), Espinosa-García y Villaseñor-Ríos (1998) o Castillo-Argüero *et al.* (2009), y se catalogaron como exóticas si se encontraban registradas como tales en Espinosa-García y Villaseñor-Ríos (2004), REPSA (2014) o CONABIO (2016). Las especies de plantas nativas no arvenses se detectaban si no se registraban en ninguna de las categorías anteriores.

3.4. Estructura de la comunidad vegetal en los parches recuperados

En seis parches recuperados de sustrato basáltico de áreas que variaron entre 27.14 m² a 404.63 m² (ver Anexo 3) en A8 (cuatro parches) y A11 (dos parches), se trazaron líneas de Canfield (1941) de diferente longitud de 1.5 a 11 m separadas 2 m durante la época de lluvias (julio, 2015) y la época de secas (diciembre, 2015). Se consideraron tanto la comunidad vegetal que se asienta en el sustrato, como las plantas que le dan sombra (especies que están enraizadas fuera del parche, pero que parte de ellas dan sombra aportando cobertura), así como el porcentaje de sustrato vacío. El criterio para detectar el sustrato vacío fue la ausencia de tejidos vegetales que crecieran dentro del parche, para calcular la proporción de metros éste se dividió el total de metros de sustrato vacío entre la distancia total de las líneas dentro del parche. Por otro lado, se clasificaron las especies como nativas no arvenses, nativas arvenses y exóticas (ver sección 3.3),

y se comparó la cobertura relativa de estos tres tipos de especies en los tres sitios.

3.5. Listado florístico

Se hicieron visitas cada mes durante el periodo de septiembre 2014 a septiembre de 2015 a los sitios A8, A11 y zona conservada de referencia (ZCR) y a los seis parches de sustrato basáltico recuperado, para identificar las especies vegetales presentes. Las especies no identificadas se herborizaron y se identificaron posteriormente. La composición de especies de los sitios A8 y A11 se comparó con los de la ZCR con los índices de similitud de Sørensen y de Jaccard.

3.6. Estructura de la comunidad vegetal: método con área

Con el objetivo de evaluar la estructura vertical de la comunidad vegetal, la densidad de plantas e, indirectamente, el éxito de la introducción de las semillas de especies al voleo realizada en junio 2009 en A8, se seleccionaron cuadros al azar en cada sitio (A8, A11 y ZCR) en cada uno de los tres estratos, en los que se contó el número de plantas, altura y una medida de dominancia (DAP o cobertura) en la temporada de secas. En particular, los sitios A8 y A11 fueron muestreados en la época de secas de diciembre 2014 a abril 2015, en tanto que la ZCR fue muestreada en noviembre-diciembre de 2015. Esto ocurrió debido a que cada sitio requería para ser muestreado de 8 a 10 semanas de esfuerzo.

Para el estrato arbóreo se seleccionaron 10 cuadros de 10 x 10 m en los que se muestrearon los árboles presentes de más de 1.50 m de altura. Se registró la especie de cada uno de ellos, su altura, cobertura y el diámetro a la altura del

pecho (DAP) (Fig. 1). Para el estrato medio se tomaron 10 subcuadros al azar de 5 × 5 m localizados en uno de los vértices de cada uno de los 10 cuadros de 10 × 10 m en los cuales se muestrearon arbustos, hierbas perennes y plantas suculentas mayores a 30 cm, así como árboles de 30 cm a 1.5 m, a las cuales se registró su especie, altura y cobertura (Fig. 1). Para el estrato bajo se seleccionaron tres subcuadros de 1 × 1 m ubicados en cada uno de los cuadros de 10 × 10 m en la disposición que marca la Fig. 1, en los que se muestrearon hierbas perennes, árboles, arbustos y suculentas menores a 30 cm, así como helechos perennes (como *Cheilanthes bonariensis*), en los que se registró especie, altura y cobertura. En el muestreo no se tomaron en cuenta gramínoideas (como *Pennisetum* spp. y *Muhlenbergia* spp.) ni hierbas rastreras o trepadoras (como *Cissus sicyoides* y *Tropaeolum majus*), dado que es difícil reconocer un individuo de otro. Las plantas se identificaron en el campo con la guía de Castillo-Argüero *et al.* (2007) y las que no pudieron identificarse se colectaron y herborizaron para identificarlas posteriormente. Con los datos de densidad, se calculó la diversidad de árboles, plantas del estrato medio y plantas perennes del estrato bajo con H' (usando logaritmo decimal), se compararon estos valores con los obtenidos en ZCR con pruebas de t (Zar, 1999).

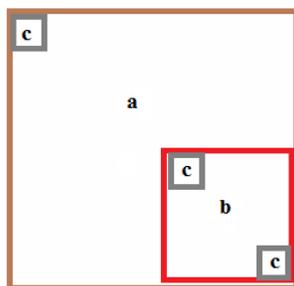


Figura 1 a) Cuadro de 10 × 10 m utilizado para medir el estrato arbóreo, b) subcuadro de 5 × 5 m utilizado para medir el estrato medio, c) subcuadros de 1× 1 m utilizados para medir el estrato bajo en dos áreas sujetas a restauración A8 y A11 y una zona conservada de referencia.

Además, se hicieron ANdeVAs de una vía para comparar la densidad y cobertura de las plantas del estrato arbóreo y medio entre sitios, así como los datos de área basal de los árboles. Para ello, los datos de estas tres variables se transformaron como $\sqrt{(x + 0.5)}$ (Zar, 1999) debido a que la distribución de los datos originales no era normal. Para comparar los datos de densidad y cobertura de las plantas del estrato bajo se llevó a cabo una prueba de Kruskal-Wallis, debido a que en estas variables la transformación no normalizó los datos.

Se probó si la frecuencia a la que se encontraba cada especie de plantas dependía del sitio con una prueba de χ^2 , para la cual se calcularon las frecuencias esperadas con una tabla de contingencia de 3 (sitios) × S (especies). Posteriormente, se aplicaron pruebas de residuos estandarizados (Siegel y Castellan, 1995).

3.7. Rebrote y reclutamiento de eucaliptos

Con el fin de conocer la capacidad de regeneración de eucaliptos a partir de tocones de árboles cortados, así como de individuos jóvenes que arribaron por

semillas desde abril de 2012 (cuando se hizo la última actividad de manejo), se llevó a cabo un censo de eucaliptos vivos en los sitios A8 (el 8 de noviembre 2015) y A11 (el 11 de octubre 2015). A cada individuo encontrado se le registraron los siguientes datos: altura, el diámetro a la altura del pecho (DAP) y número de ramas basales a la altura del pecho que sale de cada tocón, si fuera el caso y se realizaron histogramas de frecuencia con estos datos.

4. RESULTADOS

4.1 Estructura de la comunidad vegetal: método sin área

Durante la temporada de lluvias (agosto-octubre 2014) en A8 dominaron, en términos de cobertura, las especies nativas no arvenses *Eupatorium petiolare* (14.65%), *Buddleia cordata* (8.23%), *Eupatorium* sp. (6.14%) y *Montanoa tomentosa* (3.03%), así como las especies exóticas *Pennisetum clandestinum* (14.54%), *Leonotis nepetifolia* (8.65%), *Ricinus communis* (4.10%) y *Schinus molle* (4.09%) (Fig. 2). La especie nativa arvense de mayor cobertura fue *Dicliptera peduncularis* (3.88%). En A11, por su parte, las especies con mayor cobertura fueron las especies nativas no arvenses *Buddleia cordata* (26.24%), *Fraxinus uhdei* (4.69%), *Dahlia coccinea* (4.10%), *Cissus sicyoides* (3.49%) y *Eupatorium* sp. (3.33%), así como las especies nativas arvenses *Archibaccharis serratifolia* (9.08%) y *Dicliptera peduncularis* (5.51%). Las especies exóticas dominantes en términos de cobertura fueron *Pennisetum clandestinum* (12.96%) y *Tropaeolum majus* (5.81%). Por otra parte, en la zona conservada de referencia (ZCR) hubo dominio en la cobertura de las especies nativas no arvenses *Buddleia cordata* (11.21%), *Eupatorium* sp. (8.05%), *Pittocaulon praecox* (6.74%), *Dahlia coccinea* (5.67%), *Cissus sicyoides* (5.49%), *Plumbago pulchella* (4.63%), *Echeveria gibbiflora* (4.37%) y *Opuntia tomentosa* (3.91%), así como de las especies arvenses *Dalea foliolosa* (6.82%) e *Ipomoea purpurea* (3.54%). La especie exótica más dominante en este sitio fue *Schinus molle* (3.70%) (Fig.2).

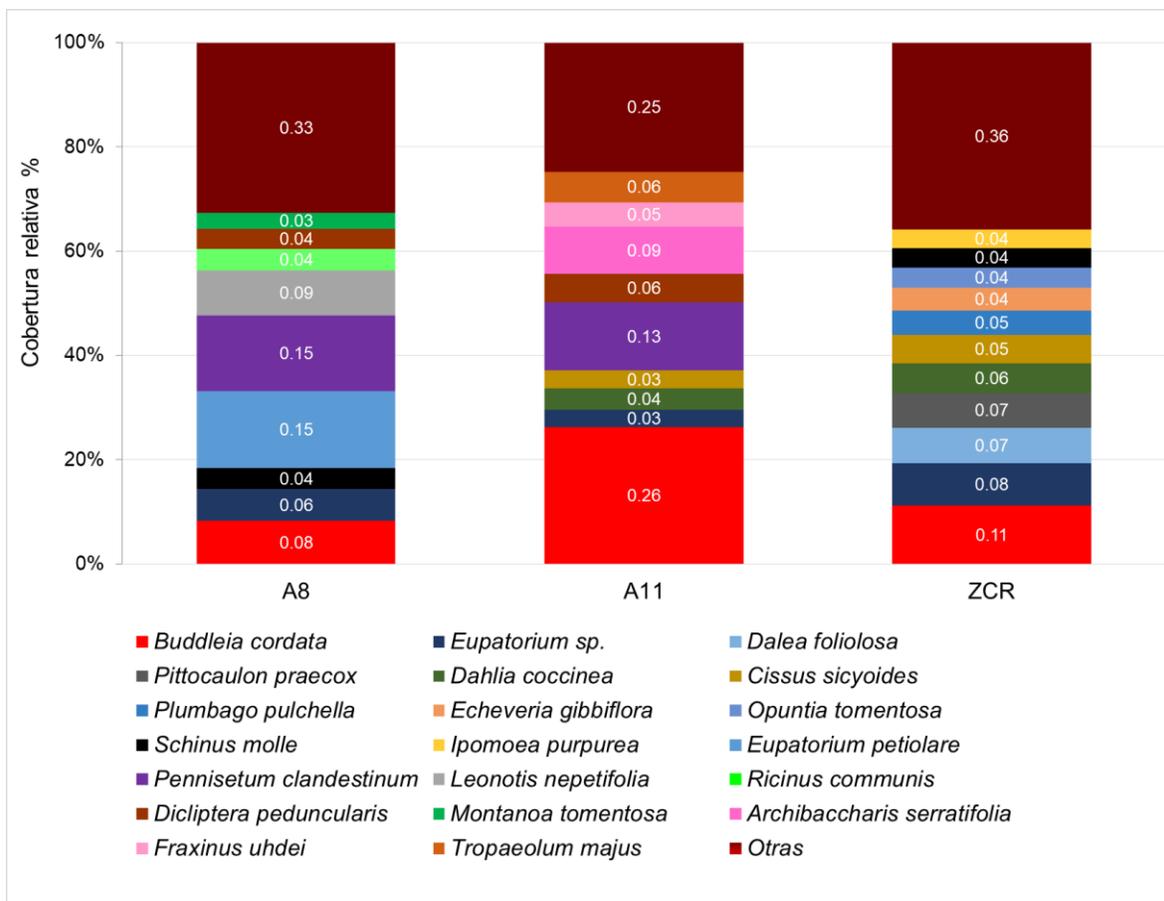


Figura 2. Cobertura relativa en temporada de lluvias de diferentes especies de plantas en los sitios A8 y A11 sujetos a restauración ecológica desde 2005, en comparación con lo que se registra en un área conservada de referencia (ZCR) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Datos de la temporada de lluvias (agosto-octubre de 2014). En “Otras” se agrupan a las plantas no dominantes que individualmente tienen una cobertura relativa <3%.

Durante la temporada de secas (diciembre de 2015) en A8 dominaron las especies exóticas *Pennisetum clandestinum* (23.41%), *Schinus molle* (11.94%) y *Leonotis nepetifolia* (4.83%), seguidas de las especies nativas no arvenses *Buddleia cordata* (18.23%), *Montanoa tomentosa* (12.23%), *Eupatorium glandulosum* (4.96%), *Eupatorium petiolare* (4.59%) y *Senna multiglandulosa* (3.99%) (Fig. 3). En A11, por su parte, dominó la especie nativa no arvense *Buddleia cordata* (55.39%), seguida por la especie nativa arvense *Archibaccharis serratifolia* (14.58%) y, finalmente, por la especie exótica *Pennisetum*

clandestinum (9.56%). En la ZCR, por su parte, hubo dominancia en la cobertura de las especies nativas no arvenses *Buddleia cordata* (19.41%), *Eysenhardtia polystachya* (7.76%), *Eupatorium petiolare* (6.50%), *Plumbago pulchella* (6.15%), *Opuntia tomentosa* (4.97%), *Echeveria gibbiflora* (4.63%), *Cheilanthes bonariensis* (3.30%), *Baccharis pteronioides* (3.22%) y *Pittocaulon praecox* (3.14%), y se registró un aumento en la cobertura relativa de la especie exótica *Schinus molle* (a 11.80%) (Fig. 3).

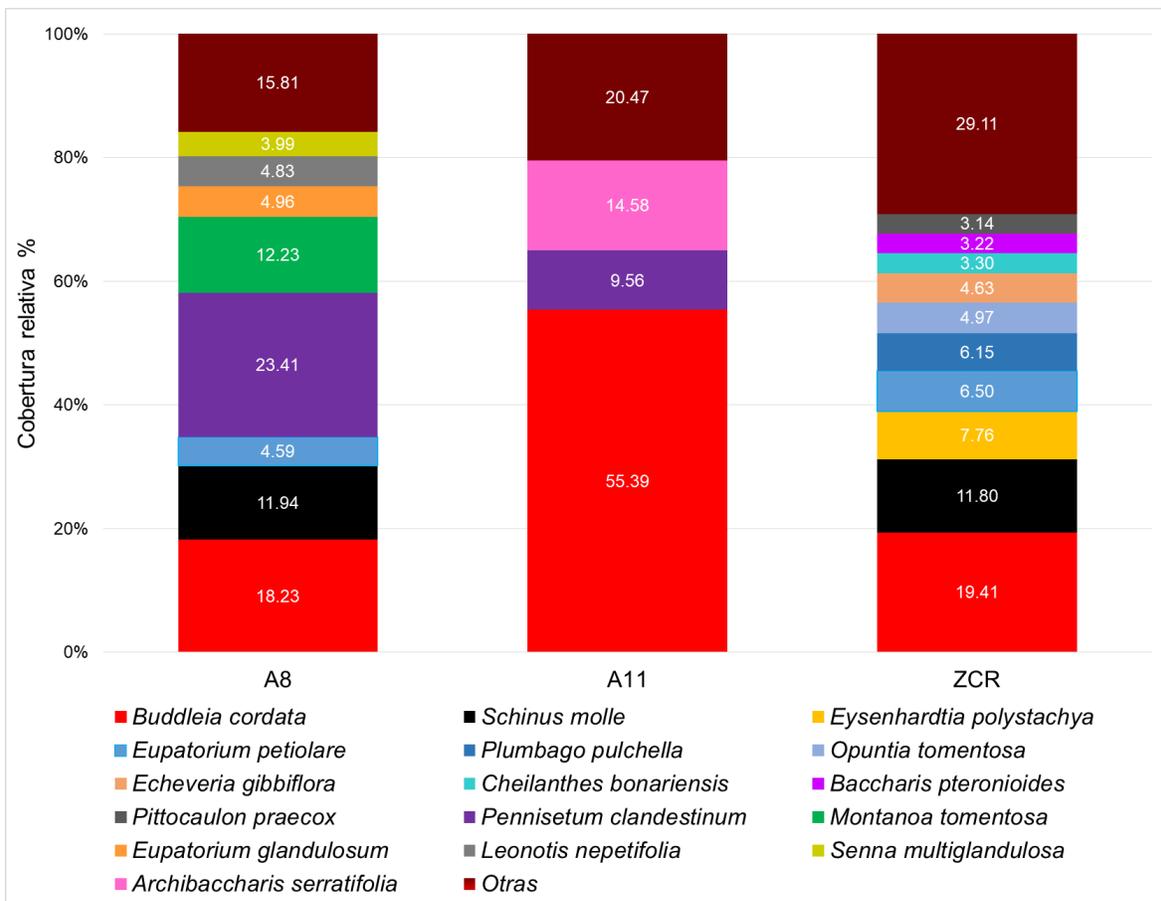


Figura 3. Cobertura relativa en temporada de secas de diferentes especies de plantas en los sitios A8 y A11 sujetos a restauración ecológica desde 2005, en comparación con lo que se registra en un área conservada de referencia (ZCR) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Datos de la temporada de secas (diciembre de 2015). En "Otras" se agrupan a las plantas no dominantes que individualmente tienen una cobertura relativa <3%.

En cuanto al tipo de especie durante la temporada de lluvias en A8 dominaron las especies nativas no arvenses con una cobertura de 47.79% (20 especies), seguidas por las exóticas con 36.60% (10 especies) y, finalmente, las nativas arvenses con 15.12% (27 especies); mientras que en A11 dominaron las nativas no arvenses (19 especies), con una cobertura de 50.35%, seguidas por las exóticas con 26.44% (ocho especies) y, finalmente, las nativas arvenses con 21.05% (14 especies) (Fig. 4.). En la ZCR, por su parte, 74.51% de la cobertura la aportaron las nativas no arvenses (29 especies), seguidas por las nativas arvenses con 18.43% (cinco especies) y, finalmente, las exóticas con 5.63% (tres especies) (Fig. 4).

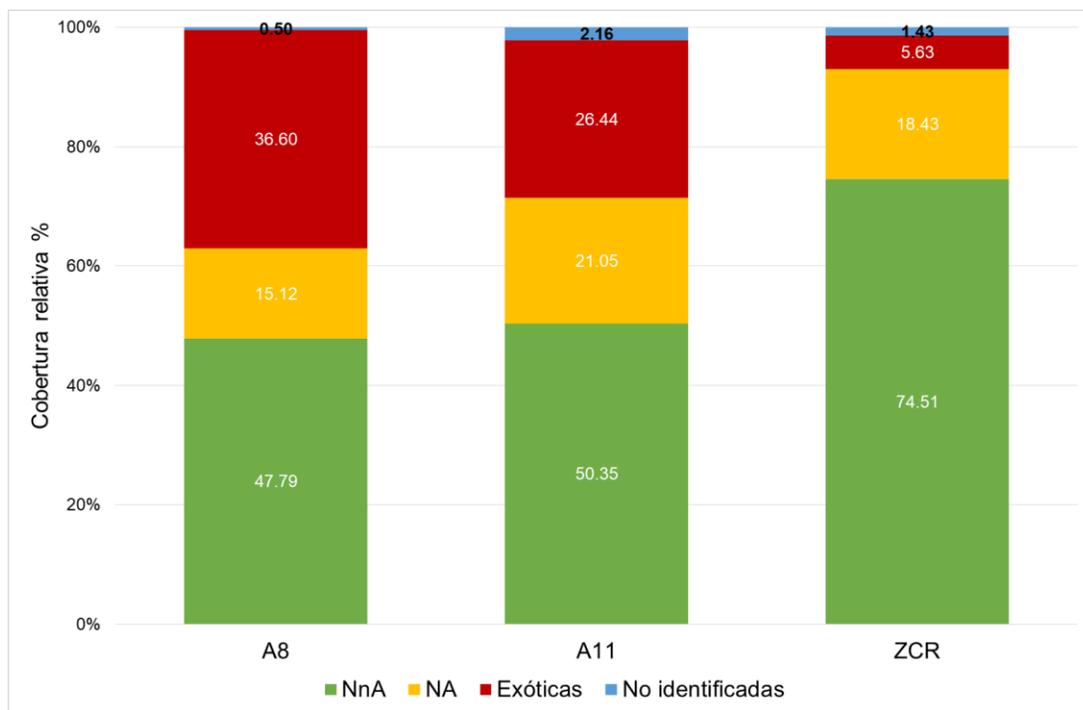


Figura 4. Cobertura relativa de plantas nativas no arvenses (NnA) (sucesionalmente tardías), nativas arvenses (NA) (sucesionalmente tempranas) y exóticas (E) (no deseables desde el punto de vista de la restauración ecológica) en los sitios A8 y A11 sujetos a restauración ecológica desde 2005, en comparación con lo que se registra en un área conservada de referencia (ZCR) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Datos de la temporada de lluvias (agosto-octubre de 2014).

En la temporada de secas en A8 el tipo de plantas que dominó en términos de cobertura fueron las exóticas con una cobertura de 48.15% (siete especies), seguidas por las nativas no arvenses con 47.97% (18 especies) y, finalmente, las nativas arvenses con 3.88% (cuatro especies) (Fig. 5). En A11 las plantas dominantes fueron las nativas no arvenses con 67.83% (13 especies), seguidas por las nativas arvenses con 19.06% (siete especies) y, finalmente, las exóticas con 13.11% (seis especies). En la ZCR, dominaron las nativas no arvenses con 78.90% de cobertura (29 especies), seguidas por las exóticas con 14.68% (tres especies) y, finalmente, las nativas arvenses con 5.54% (cinco especies) (Fig. 5).

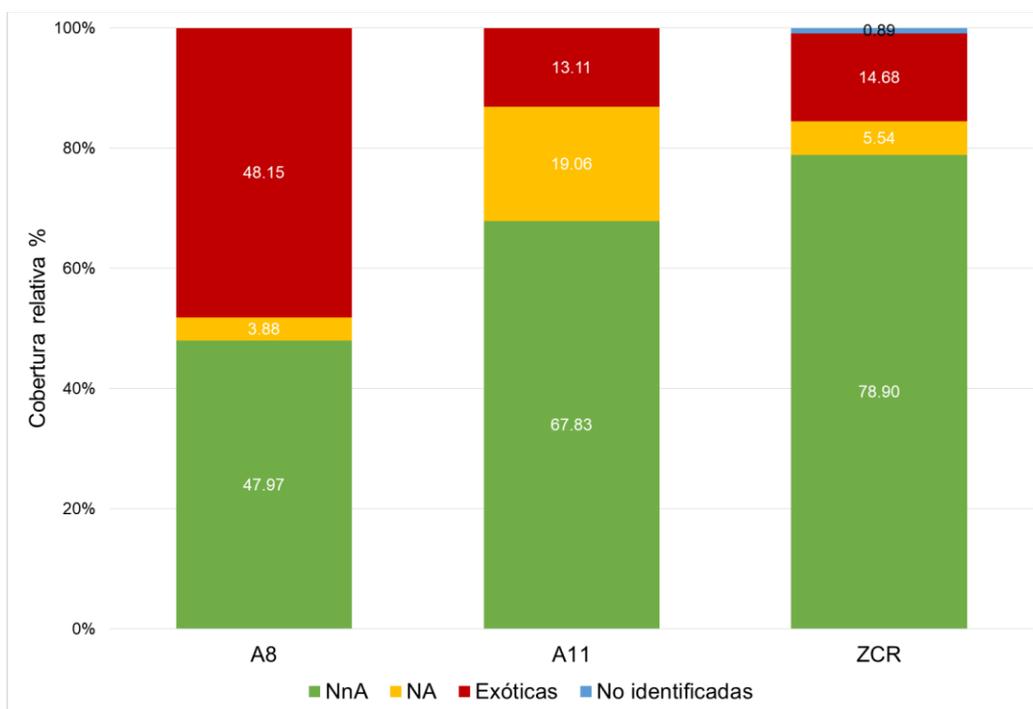


Figura 5. Cobertura relativa de plantas nativas no arvenses (NnA) (sucesionalmente tardías), nativas arvenses (NA) (sucesionalmente tempranas) y exóticas (E) (no deseables desde el punto de vista de la restauración ecológica) en los sitios A8 y A11 sujetos a restauración ecológica desde 2005, en comparación con lo que se registra en un área conservada de referencia (ZCR) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Datos de la temporada de secas (diciembre de 2015).

Los índices de dominancia de Simpson registrados tanto en la temporada de lluvias como secas en los sitios A8 y A11 (0.056 a 0.224) fueron mayores a los que se encontraron en la ZCR (0.039 y 0.057), y A8 registró valores menores (0.056-0.093) que A11 (0.085-0.224) (Tabla 3). En cuanto al índice de diversidad de Shannon-Wiener, la ZCR tuvo valores mayores (3.578 y 3.153) a los que se registraron en A8 (3.340 y 2.695) y A11 (2.988 y 2.221) en ambas temporadas, y A8 tuvo valores más altos que A11 (Tabla 3). El número de especies en ambas temporadas fue mayor en la ZCR (68 y 38), seguida por A8 (60 y 30) y finalmente A11 (45 y 26). En la temporada de lluvias hubo diferencias significativas en la diversidad entre A8 y la ZCR ($t = 4.475$, g.l. = 1436.2, $P < 0.001$), así como entre A11 y la ZCR ($t = 10.062$, g.l. = 1159.9, $P < 0.001$). En el mismo sentido, en la temporada de secas hubo diferencias significativas en la diversidad entre A8 y la ZCR ($t = 6.510$, g.l. = 684.8, $P < 0.001$), así como entre A11 y la ZCR ($t = 9.909$, g.l. = 479.4, $P < 0.001$).

Tabla 3. Riqueza de especies e índices de dominancia de Simpson y de diversidad de Shannon-Wiener en la comunidad vegetal de dos zonas sujetas a restauración ecológica (A8 y A11) y una zona conservada de referencia en la Reserva del Pedregal de San Ángel, Cd. Mx. Los asteriscos (***) señalan diferencias significativas entre los valores del índice de Shannon-Wiener y la ZCR ($P < 0.001$).

Temporada	A8	A11	ZCR
	Número de especies		
Lluvias 2014	60	45	68
Secas 2015	30	26	38
	Índice de dominancia de Simpson		
Lluvias 2014	0.056	0.085	0.039
Secas 2015	0.093	0.224	0.057
	Índice de Shannon-Wiener		
Lluvias 2014	3.340***	2.988***	3.578
Secas 2015	2.695***	2.221***	3.153

4.2. Estructura de la comunidad vegetal en los parches recuperados

Tomando en cuenta los datos de cobertura relativa de las especies de plantas que proyectaban tejidos aéreos en los parches de sustrato basáltico recuperado tanto de las que enraizaban dentro como fuera de éstos, se obtuvieron los siguientes resultados. Durante la temporada de lluvias (julio de 2015) en los seis parches estudiados se registraron 24 especies en total. En esos sitios las especies dominantes fueron *Buddleia cordata* (parches Erandi 1, María y Dinosaurio en A8), *Lepechinia caulescens* (parche Erandi 2 en A8), *Echeveria gibbiflora* (parche Palo Dulce en A11) y *Archibaccharis serratifolia* (parche Borde en A11), especies que llegaron a alcanzar coberturas relativas de entre 17.9 y 46.1 % (Fig.6).

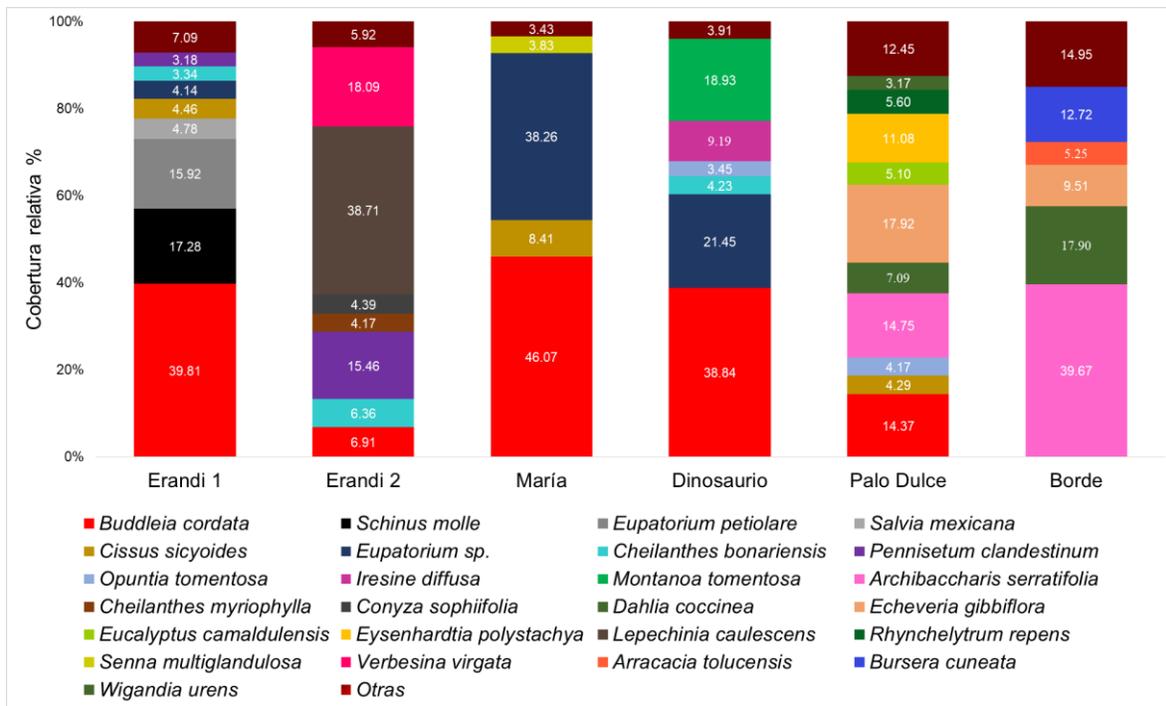


Figura 6. Cobertura relativa en temporada de lluvias de diferentes especies de plantas en seis parches de sustrato basáltico recuperados de los sitios sujetos a restauración A8 y A11 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Cd. Mx. Datos de la temporada de lluvias (julio de 2015). Incluye datos de las plantas establecidas en los parches, así como de las plantas que proyectan tejidos al mismo desde afuera. En "Otras" se agrupan a las plantas no dominantes que individualmente tienen una cobertura relativa <3%.

En la época de secas (diciembre de 2015) se registraron un total de 21 especies en estos parches. En los parches de A8; Erandi 1 y Erandi 2 la especie con mayor cobertura fue *Pennisetum clandestinum*, en tanto que en el parche María lo fue *Buddleia cordata*, al igual que en el parche Dinosaurio, mientras que los parches de A11; Palo Dulce tuvo mayor dominancia *Echeveria gibbiflora* y en el parche Borde *Archibaccharis serratifolia* (Fig. 7).

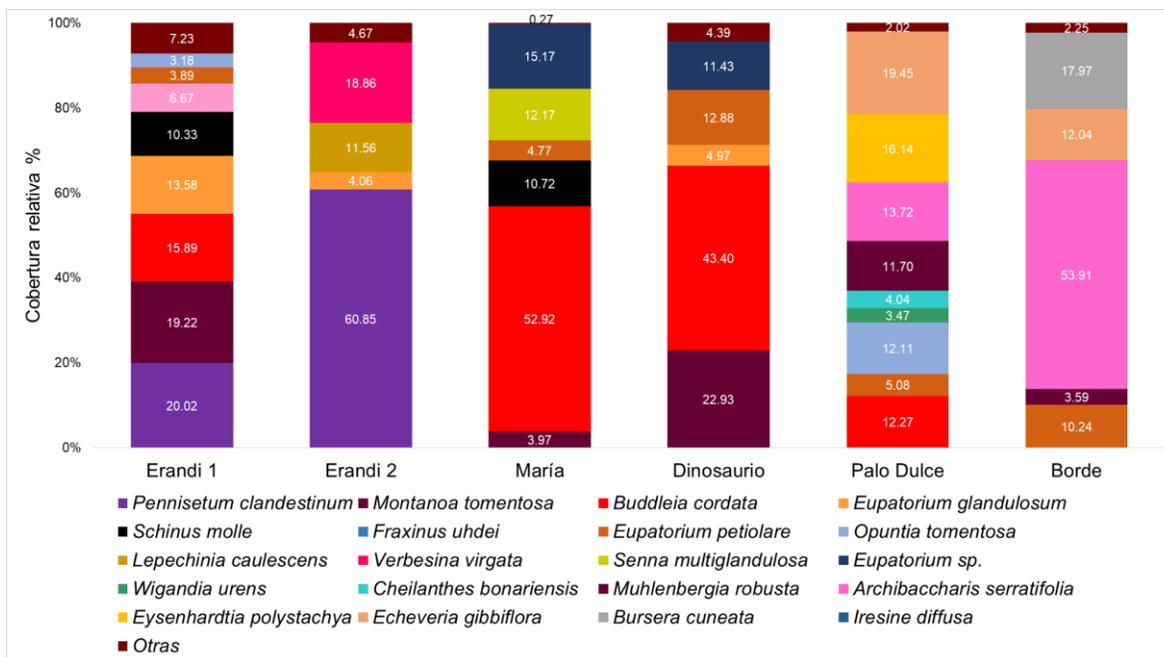


Figura 7. Cobertura relativa en temporada de secas de diferentes especies de plantas en los parches de sustrato basáltico recuperados de los sitios sujetos a restauración A8 y A11 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Cd. Mx. Datos de la temporada de secas (diciembre de 2015). Incluye datos de las plantas establecidas en los parches, así como de las que proyectan tejidos al mismo desde afuera. En “Otras” se agrupan a las plantas no dominantes que individualmente tienen una cobertura relativa <3%.

El sustrato vacío en la temporada de lluvias varió en los parches entre 0%, en Borde en A11 y 68.6%, en Erandi 1 en A8 (Tabla 4). Mientras que en secas el sustrato vacío en esos parches varió entre 0% en Borde y 68.9 % en María en A8 (Tabla 4).

Tabla 4. Porcentaje de sustrato vacío en cada parche de sustrato basáltico recuperado en las áreas sujetas a restauración A8 y A11, en las temporadas de lluvias (julio 2015) y secas (diciembre 2015).

Temporada	Erandi 1	Erandi 2	María	Dinosaurio	Palo Dulce	Borde
	A8	A8	A8	A8	A11	A11
Lluvias	68.6	22.0	43.1	17.5	24.6	0
Secas	27.4	28.7	68.9	31.3	12.8	0

La mayor parte de la cobertura que aportan las especies que enraizan fuera de los parches está dada por especies exóticas, como *Pennisetum clandestinum* y *Schinus molle* (Tabla 5).

Tabla 5. Cobertura relativa de especies enraizadas fuera de los sitios pero cuyos tejidos aéreos tienen influencia sobre los parches de sustrato basáltico recuperado en las áreas sujetas a restauración A8 y A11. En las temporadas de lluvias (julio 2015) y secas (diciembre 2015).

Parque ¹	Especie	Tipo de planta ²	Cobertura relativa ³ (%)
Temporada de lluvias			
E1 (A8)	<i>Pennisetum clandestinum</i>	E	4.44
	<i>Phytolacca icosandra</i>	NA	1.11
E2 (A8)	<i>Pennisetum clandestinum</i>	E	18.8
M (A8)	<i>Eupatorium</i> sp.	NnA	22.46
D (A8)	<i>Buddleia cordata</i>	NnA	11.73
	<i>Eupatorium</i> sp.	NnA	5.70
PD (A11)	<i>Archibaccharis serratifolia</i>	NA	24.68
	<i>Buddleia cordata</i>	NnA	7.08
	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	E	8.54
B (A11)	<i>Arracacia toluensis</i>	NA	10.68
	<i>Bursera cuneata</i>	NnA	25.9
	<i>Eupatorium petiolare</i>	NnA	2.67
Temporada de secas			
E1 (A8)	<i>Pennisetum clandestinum</i>	E	28
	<i>Eupatorium glandulosum</i>	NnA	19
	<i>Eupatorium petiolare</i>	NnA	5.44
E2 (A8)	<i>Pennisetum clandestinum</i>	E	40
M (A8)	<i>Eupatorium</i> sp.	NnA	18.64
	<i>Schinus molle</i>	E	17.34
D (A8)	<i>Buddleia cordata</i>	NnA	9.83
	<i>Eupatorium</i> sp.	NnA	0.62
PD (A11)	<i>Archibaccharis serratifolia</i>	NA	17.70
	<i>Buddleia cordata</i>	NnA	10.41
B (A11)	<i>Bursera cuneata</i>	NnA	26.7
	<i>Buddleia cordata</i>	NnA	1.33

¹Parches: E1, Erandi 1; E2, Erandi 2; M, María; D, Dinosaurio; PD, Palo dulce; B, Borde

²E, exóticas; NA, nativa arvense; NnA; nativas no arvenses

³Cobertura relativa en relación con la longitud total de la línea de Canfield

Al hacer el análisis por tipo de especie, se encontró que en la temporada de lluvias en los seis parches dominaron las especies nativas no arvenses (Fig. 8), seguidas por las especies nativas arvenses particularmente en los parches Borde y Palo Dulce en A11 y Dinosaurio y María en A8. Finalmente, se encuentran las exóticas en los parches de A8 Erandi 1 y Erandi 2 y Palo Dulce en A11 (Fig. 8.). No se registraron plantas exóticas en los parches María, Dinosaurio y Borde.

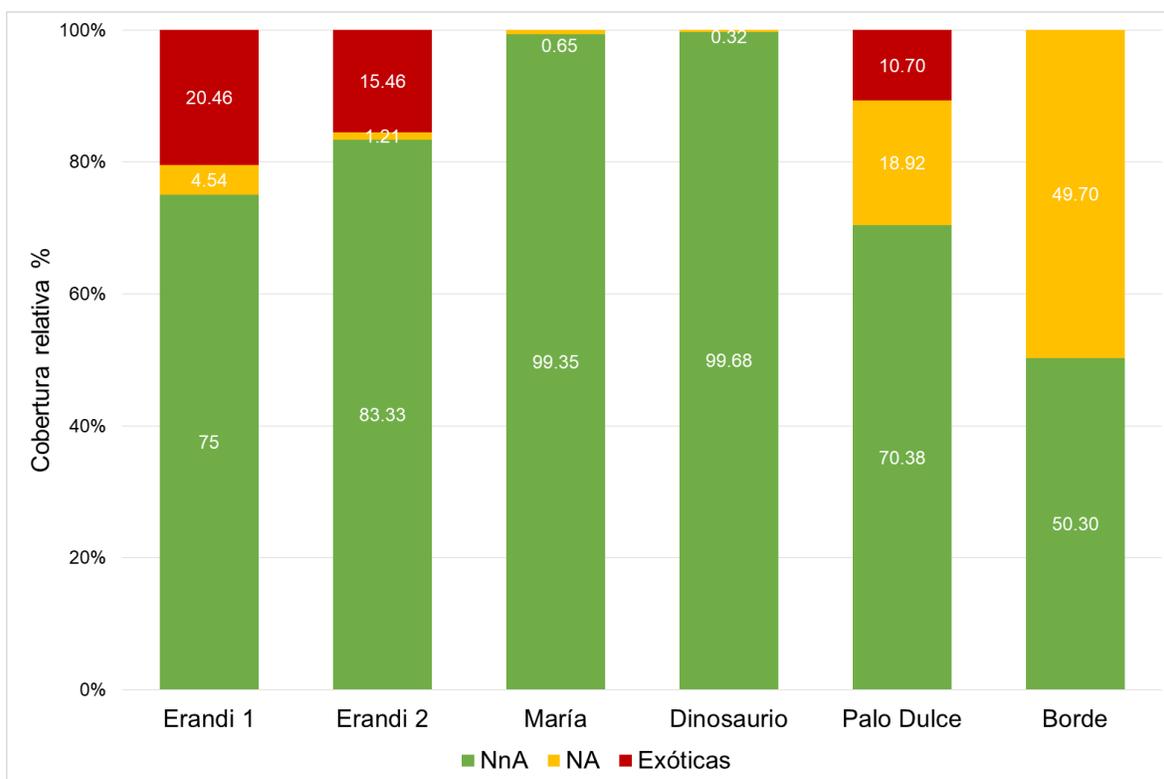


Figura 8. Cobertura relativa de plantas nativas no arvenses (NnA) (sucesionalmente tardías), nativas arvenses (NA) (sucesionalmente tempranas) y exóticas (E) (no deseables desde el punto de vista de la restauración ecológica) en los parches de sustrato basáltico recuperados de los sitios sujetos a restauración A8 y A11. Datos temporada de lluvias, julio 2015. Incluye datos de las plantas establecidas en los parches así como de las que proyectan tejidos al mismo desde afuera.

En la temporada de secas se encontró que, en general, en todos los parches dominaron también las especies nativas no arvenses, excepto en Erandi 2

en A8 donde dominaron las especies exóticas y en el parche Borde en A11, dominaron las especies nativas arvenses (Fig. 9).

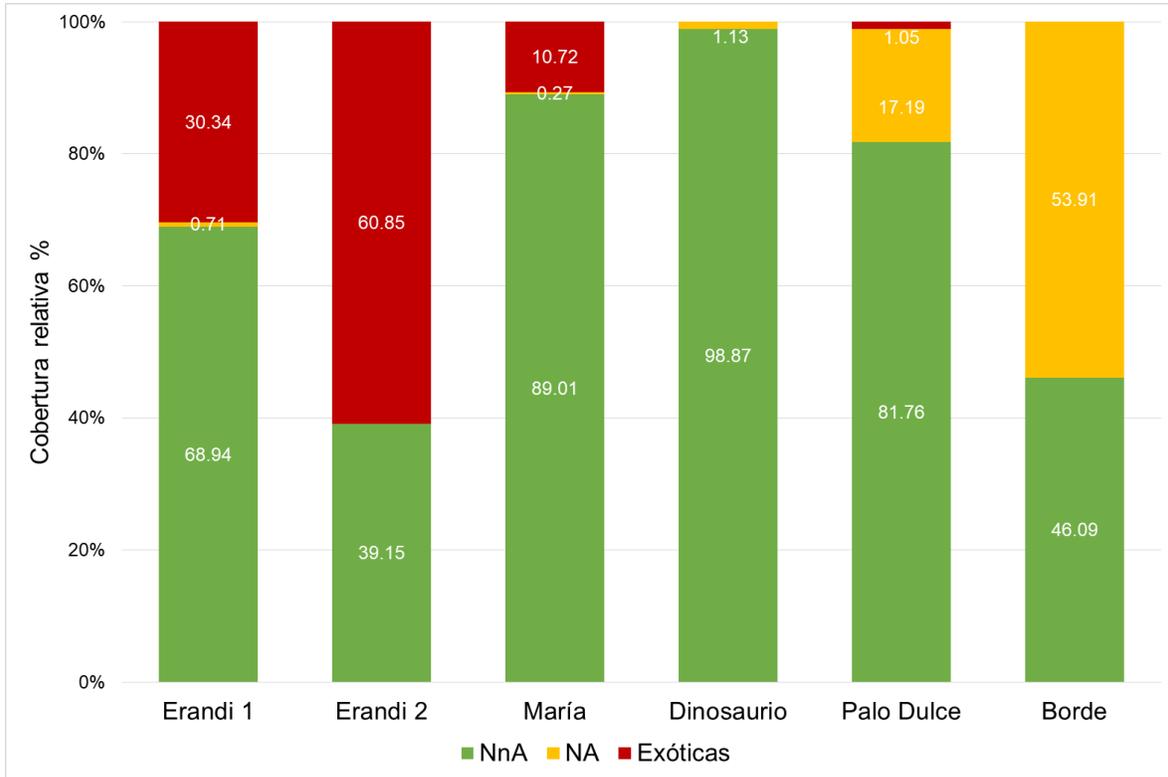


Figura 9. Cobertura relativa de plantas nativas no arvenses (NnA) (sucesionalmente tardías), nativas arvenses (NA) (sucesionalmente tempranas) y exóticas (E) (no deseables desde el punto de vista de la restauración ecológica) en los parches de sustrato basáltico recuperados de los sitios sujetos a restauración A8 y A11. Datos temporada de secas diciembre 2015. Incluye datos de las plantas establecidas en los parches así como de las que proyectan tejidos al mismo desde afuera.

4.3. Listado florístico

Durante la elaboración de los listados florísticos de las plantas presentes entre septiembre de 2014 y septiembre de 2015 se registraron un total de 155 especies, de las cuales se identificaron al menos hasta género 140, tres hasta familia y 12 no pudieron ser identificadas a ningún nivel taxonómico. A8 tuvo un total de 95 especies, en A11 81 y la ZCR 79. A8 compartió con la ZCR 41 especies y A11

compartió con la ZCR 43 (Tabla A3.1 del Anexo 3). El índice de similitud de Jaccard entre A8 y ZCR fue de 0.308, mientras que entre A11 y ZCR se obtuvo un valor un poco mayor de 0.367. Por otra parte, el índice de Sørensen entre A8 y la ZCR fue de 0.471 y entre A11 y la ZCR fue de 0.537.

El sitio con mayor número de especies exóticas fue A8 con 13 especies, A11 tuvo 11, y la ZCR sólo tres. Igualmente, en A8 se presentó el mayor número de especies nativas arvenses, con 37 especies, A11 presentó 25 especies y la ZCR tuvo 19. El sitio con mayor riqueza de especies nativas no arvenses fue la ZCR con 49 especies, mientras que A8 y A11 registraron cada una, 41 especies de este tipo (Tabla A4.1 del Anexo 4).

En los seis parches recuperados de sustrato basáltico se registraron un total de 60 especies colonizadoras que se encontraban enraizadas dentro del sustrato basáltico; 40 de ellas fueron especies nativas no arvenses, 18 nativas arvenses y solamente dos exóticas. Por otro lado, se registraron 11 especies enraizadas fuera de estos parches pero que proyectaban sombra dentro de los mismos; cinco fueron nativas no arvenses, tres nativas arvenses y tres fueron exóticas. Las especies que se registraron en más de dos parches de sustrato basáltico recuperado, todas las cuales son nativas, fueron *Archibaccharis serratifolia*, *Bidens serrulata*, *Buddleia cordata*, *Cheilanthes bonariensis*, *Cheilanthes myriophylla*, *Cissus sicyoides*, *Commelina coelestis*, *Conyza sophiifolia*, *Crusea longiflora*, *Dahlia coccinea*, *Dicliptera peduncularis*, *Dioscorea galeottiana*, *Echeveria gibbiflora*, *Eupatorium glandulosum*, *Eupatorium petiolare*, *Eupatorium sp.*, *Fraxinus uhdei*, *Geranium semannii*, *Gnaphalium canescens*,

Ipomoea purpurea, *Iresine diffusa*, *Montanoa tomentosa*, *Muhlenbergia robusta*, *Opuntia tomentosa*, *Passiflora subpeltata*, *Plumbago pulchella*, *Verbesina virgata* y *Wigandia urens* (Tablas A4.2 y A4.3 del Anexo 4). Todas estas especies colonizan parches desnudos de sustrato basáltico.

La riqueza de especies enraizadas en cada parche varió de 12 (en sitio María) a 26 (en el sitio Palo Dulce) (Tabla A4.2 del Anexo 4). La riqueza de especies nativas no arvenses enraizadas dentro de los parches varió entre 10 (en el parche María) y 19 (en el parche Palo Dulce), mientras que la riqueza de especies nativas arvenses enraizadas varió entre dos (encontradas en el parche María) y ocho (en el parche Erandi 2). Finalmente, la riqueza de especies exóticas que enraizaban dentro de los parches en general fue de cero, pero se encontró una especie en el parche Erandi 1 (*Schinus molle*) y otra en el parche Palo Dulce (*Rhynchelytrum repens*) (ver Tabla A4.2 del Anexo 4). Por otra parte, el número de especies que enraizaban fuera de los parches, pero que dieron sombra a éstos varió entre parches de una (en el parche Erandi 1) a cinco (en Borde) (Tabla 5).

4.4. Estructura de la comunidad vegetal: método con área

4.4.1. Densidad, cobertura y área basal.

4.4.1.1. Árboles. En el estrato arbóreo se registraron $4.7 \pm e.e. 1.27$ árboles/100 m² en A8, 13.6 ± 2.86 árboles/100 m² en A11 y 4.6 ± 1.07 árboles/100 m² en la ZCR (Tabla 6). La densidad de árboles fue significativamente diferente entre sitios ($F = 6.602$, g.l. = 2,27, $P = 0.004$), pues A11 registró casi tres veces más árboles que los otros dos sitios, entre los cuales no difirió la densidad de árboles. En los

tres sitios dominó en densidad *B. cordata*, pero en A8 también destacaron *Fraxinus uhdei* y *Wigandia urens*, en tanto que en A11 lo fueron *F. uhdei*, *Eucalyptus camaldulensis* y *W. urens*, y en la ZCR *Eucalyptus camaldulensis* y *Eysenhardtia polystachya* (Tabla 6).

La cobertura de los árboles cubrió en A8 $43.6 \pm 12.46 \text{ m}^2/100 \text{ m}^2$, en A11 $94.4 \pm 18.81 \text{ m}^2/100 \text{ m}^2$ en A11 y $60.17 \pm 19.8 \text{ m}^2/100 \text{ m}^2$ en la ZCR (Tabla 6). La cobertura de los árboles no fue significativamente diferente entre sitios ($F = 2.146$, g.l. = 2,27, $P = 0.136$). En los tres sitios dominó en cobertura *B. cordata*, pero en A8 también destacaron *F. uhdei* y *Eucalyptus camaldulensis*, mientras que en A11 lo fueron *W. urens* y *Eysenhardtia polystachya* y en la ZCR *Eucalyptus camaldulensis* y *Eysenhardtia polystachya* (Tabla 6).

El DAP varió entre 0.95 y 61.91 cm en A8, entre 0.47 y 105.67 cm en A11 y entre 2.86 y 95.49 cm en la ZCR. El área basal de los árboles cubrió $998.52 \pm 340.78 \text{ cm}^2/100 \text{ m}^2$ en A8, en A11 $2,298.96 \pm 880.35 \text{ cm}^2/100 \text{ m}^2$ y $2,053.11 \pm 787.01 \text{ cm}^2/100 \text{ m}^2$ (Tabla 6). El área basal no fue significativamente diferente entre sitios ($F = 1.011$, g.l. = 2,27, $P = 0.377$). En A8 dominó en área basal *Eucalyptus camaldulensis* pero también destacaron *B. cordata* y *F. uhdei*, mientras que en A11 dominó en área basal *B. cordata* pero también destacaron *Eucalyptus camaldulensis* y *W. urens* y en la ZCR dominó en área basal *B. cordata*; sin embargo, también destacaron *Eucalyptus camaldulensis* y *Eysenhardtia polystachya* (Tabla 6).

Tabla 6. Densidad, cobertura y área basal de árboles ($n=10$) (\pm e.e.) en dos sitios sujetos a restauración (A8 y A11) y uno conservado de referencia (ZCR) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Datos de la temporada de secas de diciembre 2014 a diciembre 2015. Letras diferentes en los datos de la suma de plantas por estrato denotan diferencias significativas con $P < 0.05$ (prueba de Tukey).

Especie	Densidad (No./100 m ² \pm e.e.)			Cobertura (m ² /100 m ² \pm e.e.)			Área basal (cm ² /100 m ² \pm e.e.)		
	A8	A11	ZCR	A8	A11	ZCR	A8	A11	ZCR
<i>Buddleia cordata</i>	2.0 \pm 0.8	9.8 \pm 2.2	2.1 \pm 0.7	22.82 \pm 8.93	78.4 \pm 17.77	31.37 \pm 12.47	306.57 \pm 122.2	1247.33 \pm 326.71	1393.39 \pm 797.64
<i>Bursera cuneata</i>	0	0.1 \pm 0.1	0.1 \pm 0.1	0	0.25 \pm 0.25	0.26 \pm 0.26	0	10.60 \pm 10.60	2.03 \pm 2.03
<i>Dodonaea viscosa</i>	0	0	0.1 \pm 0.1	0	0	0.22 \pm 0.22	0	0	2.72 \pm 2.72
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	0.3 \pm 0.1	0.8 \pm 0.3	1.0 \pm 0.5	6.29 \pm 4.22	1.63 \pm 0.83	12.17 \pm 7.25	378.35 \pm 301.70	885.14 \pm 876.26	292.94 \pm 186.39
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	0	0.3 \pm 0.3	0.9 \pm 0.3	0	4.24 \pm 4.24	10.70 \pm 4.55	0	47.88 \pm 47.880	281.09 \pm 136.84
<i>Fraxinus uhdei</i>	1.5 \pm 0.9	1.2 \pm 0.3	0.2 \pm 0.2	6.76 \pm 4.92	3 \pm 1.37	2.35 \pm 2.35	242.11 \pm 237.75	19.59 \pm 6.85	40.13 \pm 40.13
<i>Nicotiana glauca</i>	0	0.2 \pm 0.1	0	0	1.58 \pm 1.09	0	0	19.96 \pm 16.14	0
<i>Schinus molle</i>	0.2 \pm 0.1	0	0.2 \pm 0.1	4.72 \pm 4.57	0	3.06 \pm 2.08	10.64 \pm 10.46	0	40.78 \pm 31.9
<i>Senna multiglandulosa</i>	0	0.4 \pm 0.4	0	0	0.3 \pm 0.3	0	0	2.65 \pm 2.65	0
<i>Wigandia urens</i>	0.7 \pm 0.6	0.8 \pm 0.2	0	2.98 \pm 2.97	4.96 \pm 2.59	0	60.83 \pm 40.92	65.77 \pm 34.73	0

Especie	Densidad (No./100 m ² ± e.e.)			Cobertura (m ² /100 m ² ± e.e.)			Área basal (cm ² 100 m ² ± e.e.)		
	A8	A11	ZCR	A8	A11	ZCR	A8	A11	ZCR
Todos los árboles	4.7 ± 1.27 ^b	13.6 ± 2.86 ^a	4.6 ± 1.07 ^b	43.6 ± 12.46	94.4 ± 18.81	60.17 ± 19.8	998.52 ± 340.78	2298.96 ±	787.01

4.4.1.2. Estrato medio. En el estrato medio se registraron 6.6 ± 1.15 individuos/25 m² en A8, 3.1 ± 1.06 individuos/25 m² en A11 y 7.3 ± 1.14 individuos/25 m² en la ZCR (Tabla 7). La densidad de plantas del estrato medio fue significativamente diferente entre sitios ($F = 5.390$, g.l. = 2,27, $P = 0.010$) pues en A11 se encontraron menos de la mitad de las plantas que los otros dos sitios. En A8 dominaron en densidad *Archibaccharis serratifolia*, *Opuntia tomentosa*, *Eupatorium petiolare* y *Phytolacca icosandra*, mientras que en A11 dominaron en densidad *Leonotis nepetifolia*, *Opuntia tomentosa*, *Pittocaulon praecox* y *Eupatorium petiolare* y en la ZCR dominó en densidad *Opuntia tomentosa* pero también destacaron *Echeveria gibbiflora* y *Pittocaulon praecox* (Tabla 7).

La cobertura de los individuos de este estrato cubrió en A8 11.64 ± 1.7 m²/25 m², en A11 5.41 ± 2.24 m²/25 m² y 8.27 ± 1.1 m²/25 m² en la ZCR. La cobertura las plantas de este estrato fue significativamente diferente entre sitios ($F = 4.843$, g.l. = 2,27, $P = 0.015$), ya que en A8 hay más del doble de cobertura que en A11. En A8 dominó en cobertura *Eupatorium glandulosum*, pero también destacaron *E. petiolare* y *A. serratifolia*, en A11 dominaron en cobertura *E. petiolare* y *A. serratifolia*, mientras que en la ZCR dominó en cobertura *P. praecox*, sin embargo, también destacaron *E. petiolare* y *O. tomentosa* (Tabla 7).

Tabla 7. Densidad y cobertura de plantas del estrato medio ($n=10$) (\pm e.e.) en dos sitios sujetos a restauración (A8 y A11) y uno conservado de referencia (ZCR) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Datos de la temporada de secas de diciembre 2014 a diciembre 2015. Letras diferentes en los datos de la suma de plantas por estrato denotan diferencias significativas con $P < 0.05$ (prueba de Tukey).

Especie	Densidad (No./25 m ² ± e.e.)			Cobertura (m ² /25 m ² ± e.e.)		
	A8	A11	ZCR	A8	A11	ZCR
<i>Agave salmiana</i>	0	0	0.6 ± 0.5	0	0	0.50 ± 0.41
<i>Archibaccharis serratifolia</i>	1.1 ± 0.7	0.2 ± 0.2	0	2.31 ± 2.02	1.35 ± 1.35	0
<i>Baccharis pteronioides</i>	0	0	0.2 ± 0.1	0	0	0.42 ± 0.29
<i>Baccharis sordescens</i>	0	0	0.1 ± 0.1	0	0	0.05 ± 0.05
<i>Calliandra grandiflora</i>	0	0.1 ± 0.1	0	0	0.09 ± 0.09	0
<i>Dodonaea viscosa</i>	0	0	0.2 ± 0.2	0	0	0.61 ± 0.61
<i>Echeveria gibbiflora</i>	0	0	1.4 ± 0.4	0	0	0.08 ± 0.03
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	0.1 ± 0.1	0	0	0.15 ± 0.15	0	0
<i>Eupatorium glandulosum</i>	0.8 ± 0.4	0.2 ± 0.2	0	3.54 ± 1.58	0.61 ± 0.61	0
<i>Eupatorium petiolare</i>	0.9 ± 0.5	0.4 ± 0.2	0.5 ± 0.3	2.35 ± 1.66	1.97 ± 1.38	1.82 ± 1.06
<i>Fraxinus uhdei</i>	0.2 ± 0.2	0	0	0.03 ± 0.02	0	0
<i>Lantana velutina</i>	0	0.3 ± 0.1	0.2 ± 0.2	0	0.29 ± 0.18	0.11 ± 0.11
<i>Leonotis nepetifolia</i>	0.3 ± 0.1	0.7 ± 0.7	0	0.02 ± 0.01	0.09 ± 0.09	0
<i>Malva parviflora</i>	0.1 ± 0.1	0	0	0.25 ± 0.25	0	0
<i>Montanoa tomentosa</i>	0.5 ± 0.4	0	0	0.98 ± 0.68	0	0
<i>Nicotiana glauca</i>	0.1 ± 0.1	0	0	0.02 ± 0.02	0	0
<i>Opuntia tomentosa</i>	1 ± 0.8	0.5 ± 0.2	2.3 ± 0.6	0.06 ± 0.05	0.19 ± 0.17	1.35 ± 0.72

Especie	Densidad (No./25 m ² ± e.e.)			Cobertura (m ² /25 m ² ± e.e.)		
	A8	A11	ZCR	A8	A11	ZCR
<i>Phytolacca icosandra</i>	0.9 ± 0.8		0.2 ± 0.1	0.84 ± 0.60	0	0.14 ± 0.11
<i>Pittocaulon praecox</i>	0	0.5 ± 0.4	1.3 ± 0.3	0	0.73 ± 0.73	2.57 ± 1.51
<i>Ricinus communis</i>	0.1 ± 0.1		0.2 ± 0.2	0.67 ± 0.67	0	0.49 ± 0.49
<i>Salvia mexicana</i>	0.4 ± 0.3	0	0	0.36 ± 0.30	0	0
<i>Sedum</i> sp.	0	0.1 ± 0.1	0.1 ± 0.1	0	0.0006 ± 0.0006	0.08 ± 0.08
<i>Verbesina virgata</i>	0	0.1 ± 0.1	0	0	0.04 ± 0.04	0
<i>Wigandia urens</i>	0.1 ± 0.1	0	0	0.01 ± 0.01	0	0
Todas las plantas del estrato medio	6.6 ± 1.15 ^b	3.1 ± 1.06 ^a	7.3 ± 1.14 ^b	11.64 ± 1.7 ^a	5.41 ± 2.24 ^b	8.27 ± 1.1 ^{ab}

4.4.1.3. Estrato bajo. En el estrato bajo se registraron 1.1 ± 0.54 individuos/m² en A8, 0.8 ± 0.31 individuos/m² en A11 y 0.9 ± 0.24 individuos/m² en la ZCR (Tabla 8). La densidad de plantas no fue significativamente diferente entre sitios ($H = 1.285$, g.l. = 2, $P = 0.525$). En A8 dominó en densidad *Iresine diffusa*, en tanto que en A11 dominó en densidad *Echeveria gibbiflora*, pero también destacaron *Opuntia tomentosa* y *Lantana velutina* y en la ZCR la especie que dominó en densidad fue *Echeveria gibbiflora* (Tabla 8).

La cobertura de plantas del estrato bajo cubrió en A8 82.66 ± 0.003 cm²/m², en A11 127.64 ± 60.95 cm²/m² y 687.32 ± 256.47 cm²/m² en la ZCR (Tabla 8). La cobertura las plantas de este estrato no fue significativamente diferente entre sitios ($H = 3.398$, g.l. = 2, $P = 0.182$). En A8 dominó en densidad *Iresine diffusa*, pero

también destacó *Salvia mexicana*, en A11 dominó en cobertura *Lantana velutina*, siendo también importantes *E. gibbiflora* y *Eupatorium* sp., mientras que en la ZCR dominó en cobertura *C. bonariensis*, sin embargo, también destacaron *E. gibbiflora* y *Plumbago pulchella* (Tabla 8).

Tabla 8. Densidad y cobertura de plantas perenne del estrato bajo ($n= 30$) (\pm e.e.) en dos sitios sujetos a restauración (A8 y A11) y uno conservado de referencia (ZCR) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Datos de la temporada de secas de diciembre 2014 a diciembre 2015.

Especie	Densidad (No./m ² ± e.e.)			Cobertura (cm ² /m ² ± e.e.)		
	A8	A11	ZCR	A8	A11	ZCR
<i>Cheilanthes bonariensis</i>	0	0	0.1 ± 0.07	0	0	285.69 ± 221.23
<i>Echeveria gibbiflora</i>	0	0.3 ± 0.1	0.6 ± 0.2	0	28.87 ± 18.22	194.03 ± 112.28
<i>Eupatorium</i> sp.	0	0.06 ± 0.04	0	0	24.9 ± 22.8	0
<i>Iresine diffusa</i>	0.7 ± 0.5	0	0	46.23 ± 0.003	0	0
<i>Lantana velutina</i>	0	0.1 ± 0.1	0	0	54.92 ± 54.92	0
<i>Leonotis nepetifolia</i>	0.1 ± 0.1	0	0	4.65 ± 0.0004	0	0
<i>Loeselia mexicana</i>	0	0	0.06 ± 0.06	0	0	11.33 ± 11.33
<i>Opuntia tomentosa</i>	0	0.2 ± 0.2	0	0	0.7 ± 0.7	0
<i>Pittocaulon praecox</i>	0	0.03 ± 0.03	0	0	3.46 ± 3.46	0
<i>Plumbago pulchella</i>	0	0	0.06 ± 0.04	0	0	163.11 ± 119.97
<i>Salvia mexicana</i>	0.06 ± 0.06	0	0	18.03 ± 0.001	0	0
<i>Sedum</i> sp.	0	0	0.03 ± 0.03	0	0	30.26 ± 30.26
Sp. 55	0.1 ± 0.01	0.03 ± 0.03	0	12.26 ± 0.001	14.76 ± 14.76	0
<i>Viguiera buddleiiformis</i>	0	0	0.03 ± 0.03	0	0	2.88 ± 2.88

Especie	Densidad (No./m ² ± e.e.)			Cobertura (cm ² /m ² ± e.e.)		
	A8	A11	ZCR	A8	A11	ZCR
<i>Wigandia urens</i>	0.03 ± 0.03	0	0	1.47 ± 0.0001	0	0
Todas las plantas del estrato bajo	1.1 ± 0.54	0.83 ± 0.31	0.9 ± 0.24	82.66 ± 0.003	127.64 ± 60.95	687.32 ± 256.47

4.4.2. Estructura de tamaños.

4.4.2.1. Altura, cobertura y área basal de los árboles. En A8 los árboles midieron entre 1.51 y 7.87 m de altura y la mayoría (el 36.17%) tuvo entre 1.51 y 2.41 m, en tanto que en A11 éstos alcanzaron entre 1.55 y 7.3 m, y la mayoría (el 51.48%) tuvieron entre 2.42 y 4.23 m, mientras que en la ZCR los árboles alcanzaron entre 1.51 y 13.52 m, y la mayoría (el 21.74%) tuvieron entre 3.33 y 4.23 m (Fig. 10).

La frecuencia a la que se encuentran los árboles en las distintas categorías de alturas depende significativamente del sitio ($\chi^2 = 62.709$, g.l. = 12, $P < 0.001$). La frecuencia a la que se encuentran los árboles de 1.51-2.41 m de altura en A8 es significativamente más alta a la esperada. Mientras que en A11 la frecuencia a la que se observan árboles de 6.6-6.97 m de es significativamente menor a la esperada. Por otra parte, en la ZCR la frecuencia observada de árboles de 1.51–2.41 m de altura es significativamente menor a la esperada, sin embargo, cabe destacar que también se encontró una frecuencia de árboles de 5.15-6.97 m de altura significativamente mayor a la esperada (Fig. 10).

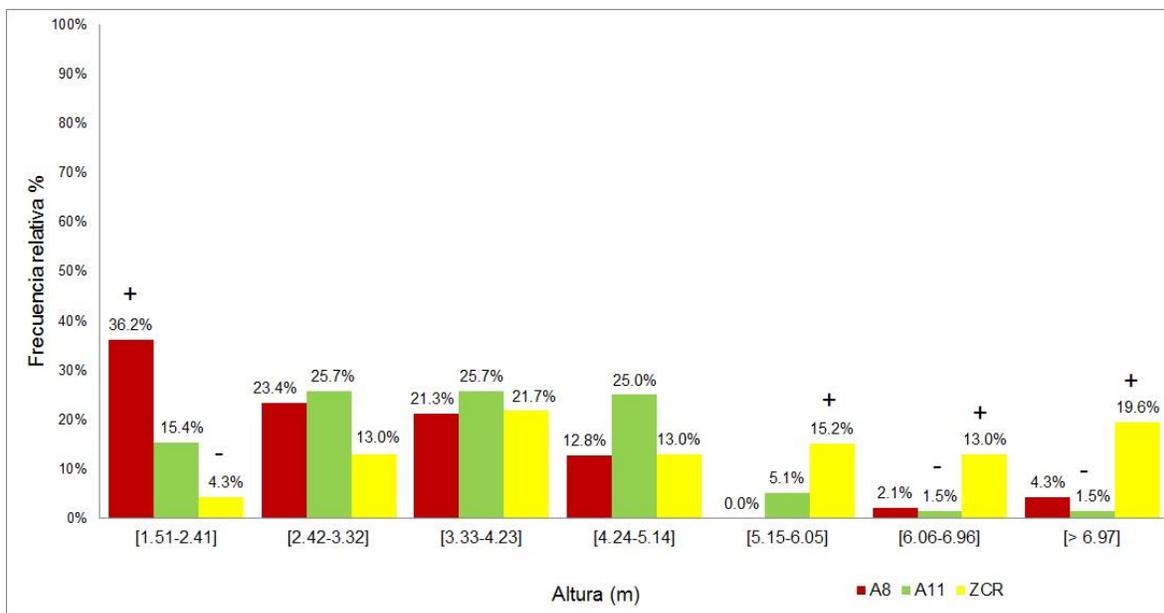


Figura 10. Frecuencia relativa de alturas de árboles en dos sitios sujetos a restauración ecológica: A8 (N = 47) y A11 (N = 136), y una zona conservada de referencia (ZCR; N = 46) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (temporadas de secas diciembre 2014 a diciembre 2015). Los signos representan frecuencia observada mayor (+) o menor (-) a la esperada, según la tabla de contingencia (prueba de residuos estandarizados).

En A8 los árboles tuvieron una cobertura entre 0.10 y 50.01 m² y la mayoría (el 55.32%) tuvo una cobertura individual de entre 0.10 y 6.85 m², mientras en A11 la cobertura estuvo entre 0.03 y 54.63 y la mayoría (el 58.09%) de los árboles tuvo entre 0.03 y 6.85 m² de cobertura, en tanto que en la ZCR los árboles alcanzaron coberturas entre 0.79 y 36.16 m² y la mayoría (el 60.86%) registró entre 0.79 y 13.68 m² (Fig. 11)

La distribución de frecuencias de coberturas de los árboles en los tres sitios dependió significativamente del sitio ($\chi^2 = 44.534$, g.l. = 14, $P < 0.001$). La frecuencia observada de los árboles con 41.01–54.66 m² de cobertura en A8 fue significativamente mayor a la esperada. Por otra parte, en A11 la frecuencia de árboles de 34.18–47.83 m² es significativamente menor a la esperada, en tanto

que en la ZCR la frecuencia observada de árboles de 13.69–20.51 m² y de 34.18 a 41 m² es significativamente mayor a la esperada (Fig. 11).

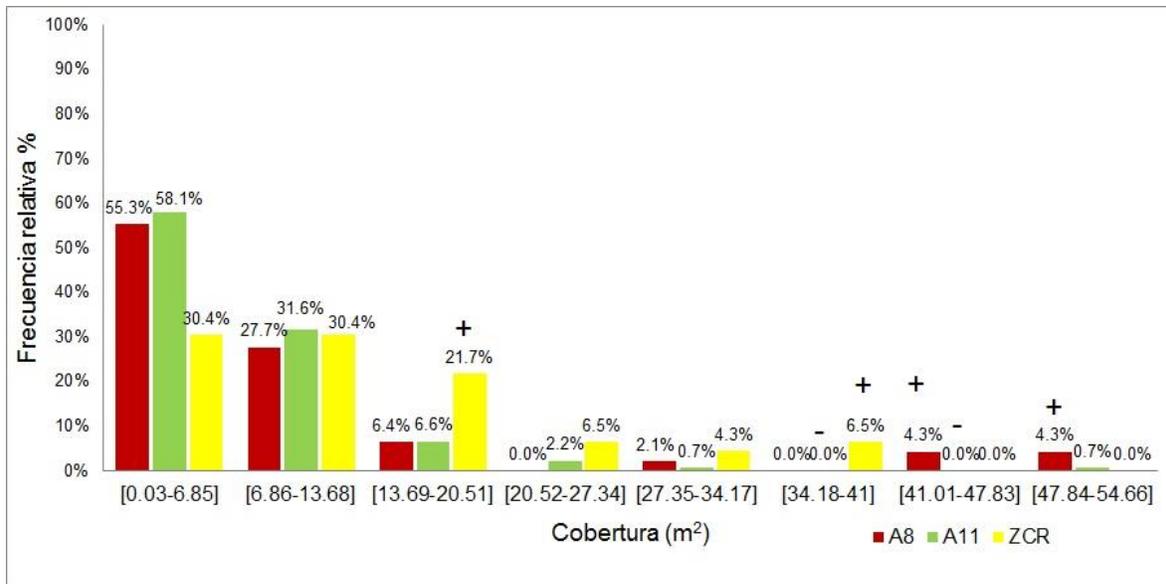


Figura 11. Frecuencia relativa de coberturas de árboles en dos sitios sujetos a restauración ecológica: A8 (N = 47) y A11 (N = 136), y una zona conservada de referencia (ZCR; N = 46) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (temporadas de secas diciembre 2014 a diciembre 2015). Los signos representan frecuencia observada mayor (+) o menor (-) a la esperada, según la tabla de contingencia (prueba de residuos estandarizados).

En A8 los árboles tuvieron un área basal entre 0.71 y 3,010.43 cm² y la mayoría (el 89.36%) tuvo entre 0.71 y 430.88 cm², en tanto que en A11 el área basal alcanzó entre 0.17 y 8,771.34 cm² y la mayoría (96.32%) se encontró entre 0.17 y 430.88 cm², mientras que en la ZCR los árboles tuvieron un área basal entre 6.44 y 7,161.97 cm², y la mayoría (73.91%) se encontraron entre 6.44 y 430.88 cm² (Fig.12). La distribución de frecuencias de área basal de los árboles en las tres zonas dependió significativamente del sitio ($\chi^2 = 28.58$, g.l. = 10, $P = 0.001$). La frecuencia observada de los árboles con 1720.92–2150.92 cm² de área basal en A8 es significativamente mayor a la esperada (Fig.12).

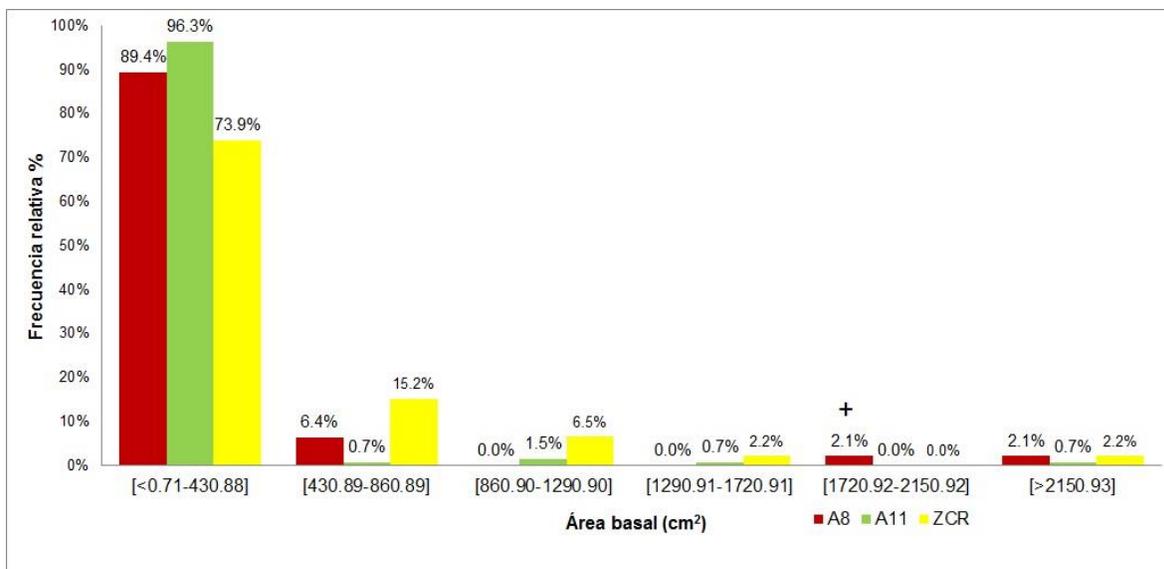


Figura 12. Frecuencia relativa de área basal de árboles en dos sitios sujetos a restauración ecológica: A8 (N = 47) y A11 (N = 136), y una zona conservada de referencia (ZCR; N = 46) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (temporadas de secas diciembre 2014 a diciembre 2015). Los signos representan frecuencia observada mayor (+) o menor (-) a la esperada, según la tabla de contingencia (prueba de residuos estandarizados).

4.4.2.2. Altura y cobertura del estrato medio. En A8 las plantas del estrato medio midieron entre 32 y 416 cm de altura y la mayoría (el 30.30%) tuvo entre 168 y 236 cm, en tanto que en A11 éstas alcanzaron entre 34 y 415 cm y la mayoría (el 29.03%) tuvieron entre 99 y 167 cm, mientras que en la ZCR las plantas midieron 30 y 505 cm de altura y la mayoría (el 41.10%) tuvieron entre 30 y 98 cm. La distribución de frecuencias de alturas de las plantas del estrato medio en los tres zonas no depende significativamente del sitio ($X^2 = 17.330$, g.l. = 12, $P = 0.138$) (Fig. 13).

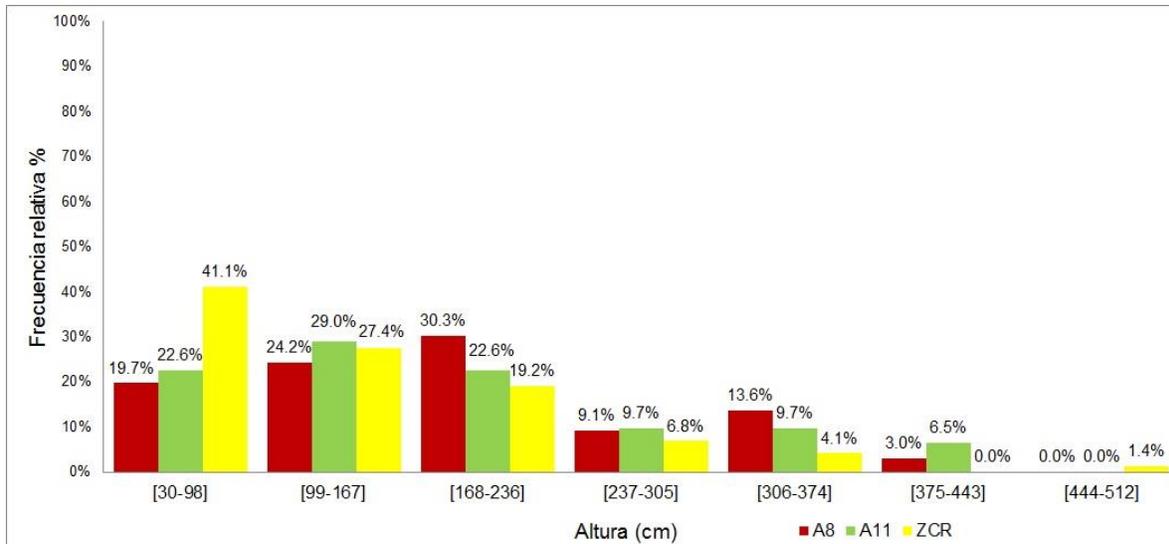


Figura 13. Frecuencia relativa de alturas en el estrato medio en dos sitios sujetos a restauración ecológica: A8 (N = 66) y A11 (N = 31), y una zona conservada de referencia (ZCR; N = 73) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (temporadas de secas diciembre 2014 a diciembre 2015).

En A8 las plantas del estrato medio tuvieron una cobertura entre 0.002 y 13.657 m² y la mayoría (el 71.21%) tuvo entre 0.002 y 1.952 m² de cobertura, en tanto que en A11 0.002 y 8.501 m² de cobertura y la mayoría (70.97 %) tuvieron entre 0.002 y 1.952 m², por su parte la ZCR tuvo entre 0.002 y 12.161 m² de cobertura y la mayoría (el 82.19%) se encontró entre 0.002 y 1.952 m² de cobertura. La distribución de frecuencias de coberturas de las plantas del estrato medio en las tres zonas no depende significativamente del sitio ($X^2 = 5.68$, g.l. = 10, $P=0.841$) (Fig. 14).

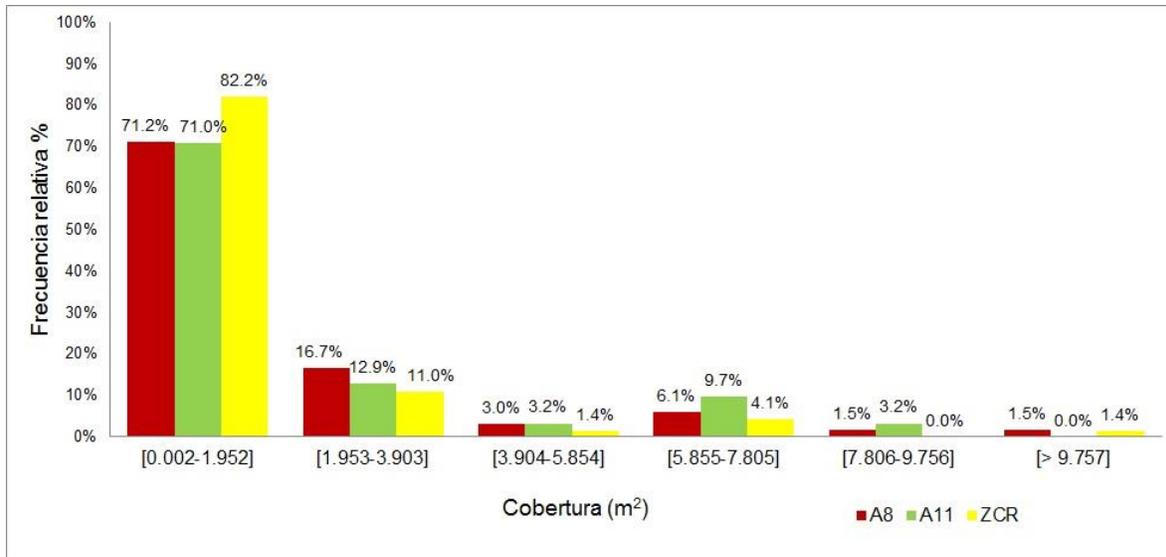


Figura 14. Frecuencia relativa de coberturas en el estrato medio en dos sitios sujetos a restauración ecológica: A8 (N = 66) y A11 (N = 31), y una zona conservada de referencia (ZCR; N = 73) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (temporadas de secas diciembre 2014 a diciembre 2015).

4.2.3. Altura y cobertura de las plantas del estrato bajo. En A8 las plantas del estrato bajo midieron entre 5 y 30 cm de altura y la mayoría (el 33.33%) tuvieron entre 24 y 30 cm de altura, por otra parte, en A11 las plantas midieron entre 1 y 28 cm y la mayoría (el 32%) tuvieron entre 1-5.5 cm, mientras que en la ZCR tuvieron una altura entre 5 y 49 cm, la mayor altura estuvo dada por el helecho *Cheilanthes bonariensis* y la mayoría (el 29.63%) estuvieron entre 24 y 49 cm. La distribución de frecuencias de alturas de las plantas del estrato bajo en las tres zonas no depende significativamente del sitio ($X^2 = 15.16$, g.l. = 10, $P = 0.126$) (Fig. 15).

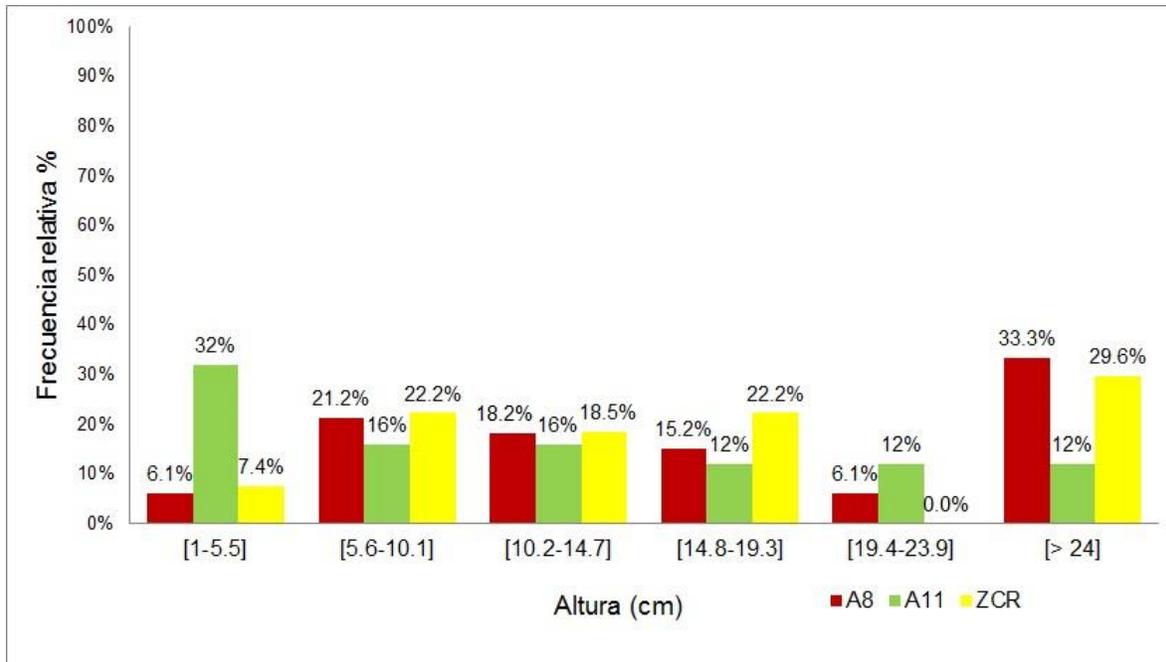


Figura 15. Frecuencia relativa de alturas en el estrato bajo en dos sitios sujetos a restauración ecológica: A8 (N = 33) y A11 (N = 25), y una zona conservada de referencia (ZCR; N = 27) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (temporadas de secas diciembre 2014 a diciembre 2015).

En A8 las plantas del estrato bajo tuvieron una cobertura entre 5.11 y 314.16 cm² y la mayoría (el 87.88%) tuvieron entre 5.11 y 125.96 cm², mientras que en A11 las plantas tuvieron entre 0.20 y 754.77 cm² y la mayoría (el 64%) tuvieron entre 0.2 y 125.96 cm²; por su parte, la ZCR tuvo plantas de entre 23.76 y 3903.63 cm² y la mayoría (el 48.15%) midió entre 23.76 y 125.96 cm². La distribución de frecuencias de coberturas las plantas del estrato bajo dependió significativamente del sitio ($\chi^2 = 20.287$, g.l. = 8, $P < 0.001$) La frecuencia observada de los árboles con >503.28 cm² de cobertura en la ZCR es significativamente mayor a la esperada (Fig. 16).

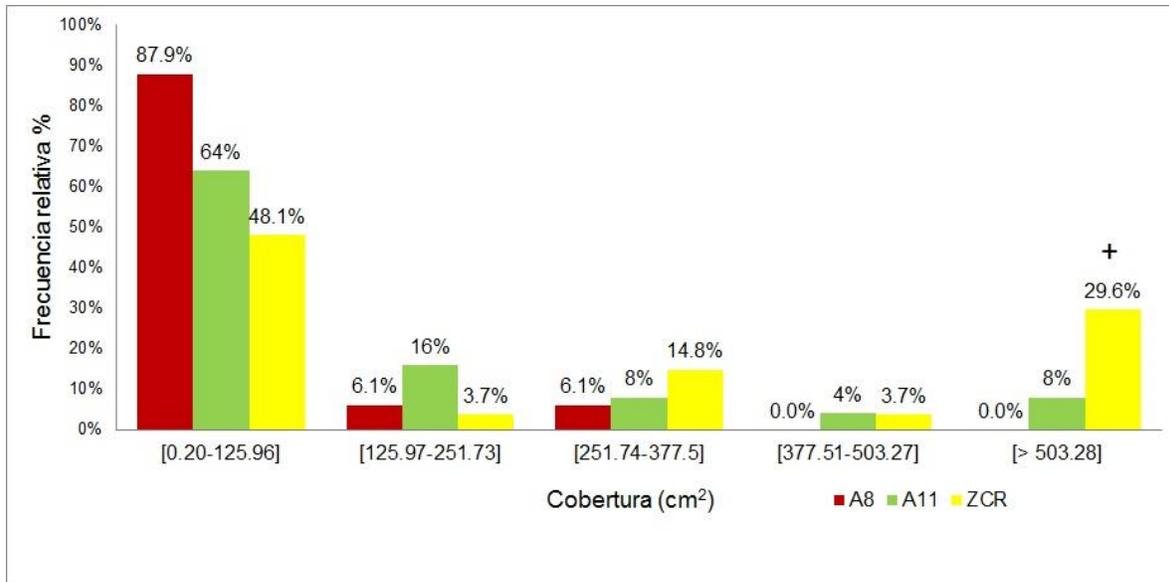


Figura 16. Frecuencia relativa de coberturas en el estrato bajo en dos sitios sujetos a restauración ecológica: A8 (N = 33) y A11 (N = 25), y una zona conservada de referencia (ZCR; N = 27) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (temporadas de secas diciembre 2014 a diciembre 2015). Los signos representan frecuencia observada mayor (+) o menor (-) a la esperada, según la tabla de contingencia (prueba de residuos estandarizados).

4.4.3. *Diversidad*. No hubo diferencias significativas en la diversidad de Shannon-Wiener (H') de árboles (calculado con los datos de abundancia) entre A8 y la ZCR ($t = 0.634$, g.l. = 87, $P = 0.527$), pero sí entre A11 y la ZCR ($t = 2.021$, g.l. = 112, $P = 0.045$), pues A11 registra un valor menor (Tabla 9). Por otra parte, hubo diferencias significativas en el valor de H' de las plantas del estrato medio entre A8 y la ZCR ($t = 2.108$, g.l. = 136.9 $P = 0.036$), pero no entre A11 y la ZCR ($t = 0.262$, g.l. = 77.7 $P = 0.793$), en este caso A8 registró mayor diversidad de plantas del estrato medio que la ZCR (Tabla 9). Finalmente, no hubo diferencias significativas en el valor de H' de plantas perennes del estrato bajo entre A8 y la ZCR ($t = 0.025$, g.l. = 53.2, $P = 0.979$) ni entre A11 y la ZCR ($t = 1.37$, g.l. = 46.7, $P = 0.176$). En este estrato los valores de H' variaron entre 1.105, registrado en A8 y 1.506, registrado en A11 (Tabla 9).

Tabla 9. Comparación de los índices de diversidad de Shannon-Wiener de la comunidad de plantas en tres estratos de vegetación entre dos sitios sujetos a acciones de restauración desde 2005 (A8 y A11) y una zona conservada de referencia (ZCR) de la Reserva del Pedregal de San Ángel, Cd. Mx. Datos de la temporada de secas. El asterisco denota diferencias significativas entre el sitio sujeto a restauración y ZCR (prueba de *t*).

Estrato	A8	A11	ZCR
Arbóreo	1.322	1.070*	1.448
Medio	2.313*	2.101	1.987
Bajo	1.105	1.506	1.144

4.4.4. *Éxito del uso de semillas al voleo en A8.* En el muestreo con área se registró la presencia de solo dos especies de las 29 especies dispersadas al voleo en A8: *Opuntia tomentosa*, con 10 individuos en el estrato medio y *Salvia mexicana* con seis individuos: cuatro en el estrato medio y dos en el estrato bajo (ver datos de Tabla A1.1, 7 y 8). Tampoco se detectaron indicios de supervivencia de los seis ejemplares de *Quercus* sp. introducidos por trasplante por Ayala-López de Lara (2014) en 2009.

4.5 Rebrote y reclutamiento de eucaliptos

Se encontraron 30 eucaliptos en A8 los cuales se distribuyeron al este del borde norte, en la parte central y al oriente del borde sur de A8 (Fig. 17). Mientras en A11 hubo 52 eucaliptos que estuvieron presentes en toda el área (Fig. 18).



Figura 17. Ubicación de los eucaliptos en el área sujeta a restauración A8, datos de noviembre, 2015 (Los tocones se muestran subrayados).



Figura 18. Ubicación de los eucaliptos en el área sujeta a restauración A11, datos de octubre 2015. (Los tocones se muestran subrayados)

De los 30 eucaliptos de A8, ocho fueron tocones (27%) que rebrotaron después del programa de manejo llevado a cabo en abril de 2012 y 22 fueron plantas completas derivadas de semillas (ver Fig. 17). Las alturas variaron entre 0.26 y 23 m de altura, y la mayoría (el 46.66%) se encontraron entre 0.26 y 4.05 m de altura (Fig. 19). El individuo de 23 m fue una planta completa superviviente de las jornadas de restauración, el cual que fue anillado en noviembre 2015. La cobertura varió entre 0.0004 y 237.38 m² por árbol, y la mayoría (el 53.33%) tuvieron entre 0.0004 y 3.21 m² (Fig. 20). El número de ramas a la altura del pecho variaron entre cero y 13, pero la mayoría (el 68.97%) tuvieron entre una y tres ramas (Fig. 21). El DAP varió entre cero y 99.91 cm y un área basal que varió entre 0.33 y 7840.02 cm², pero la mayoría (el 92.59 %) tuvieron entre 0.33 y 515.73 cm² (Fig. 22).

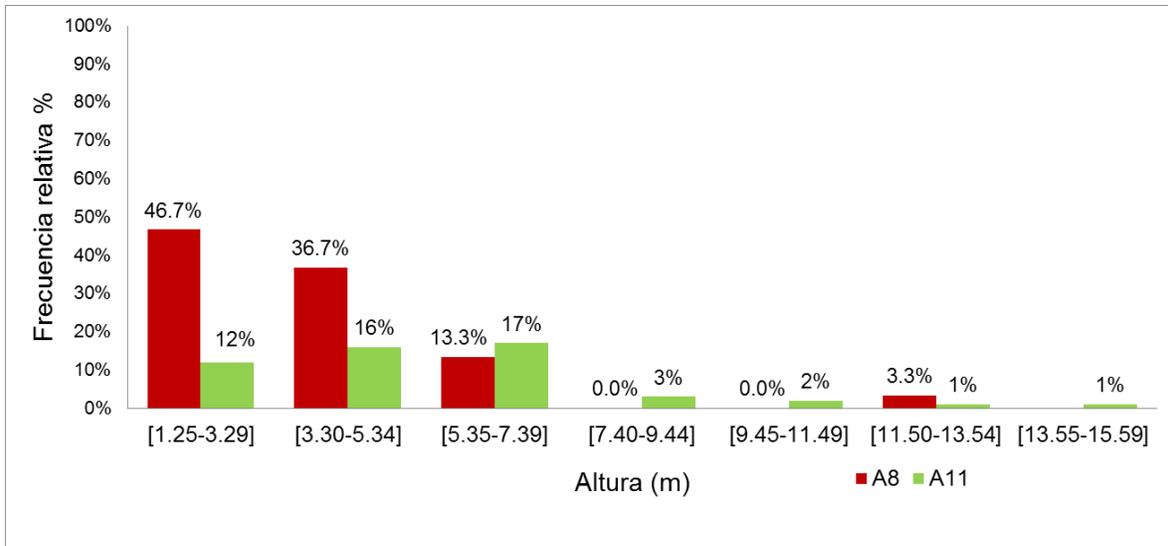


Figura 19 Frecuencia relativa de alturas de los eucaliptos en las áreas sujetas a restauración A8 (N= 30) y A11 (N= 52). Datos de octubre y noviembre 2015.

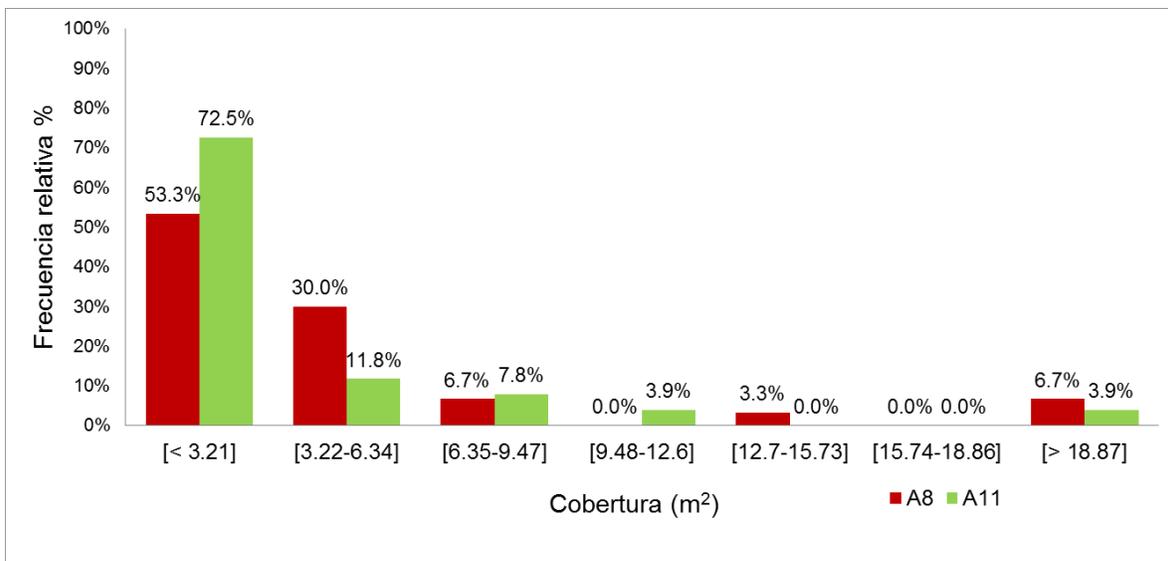


Figura 20 Frecuencia relativa de coberturas de los eucaliptos en las áreas sujetas a restauración A8 (N= 30) y A11 (N= 51). Datos de octubre y noviembre 2015.

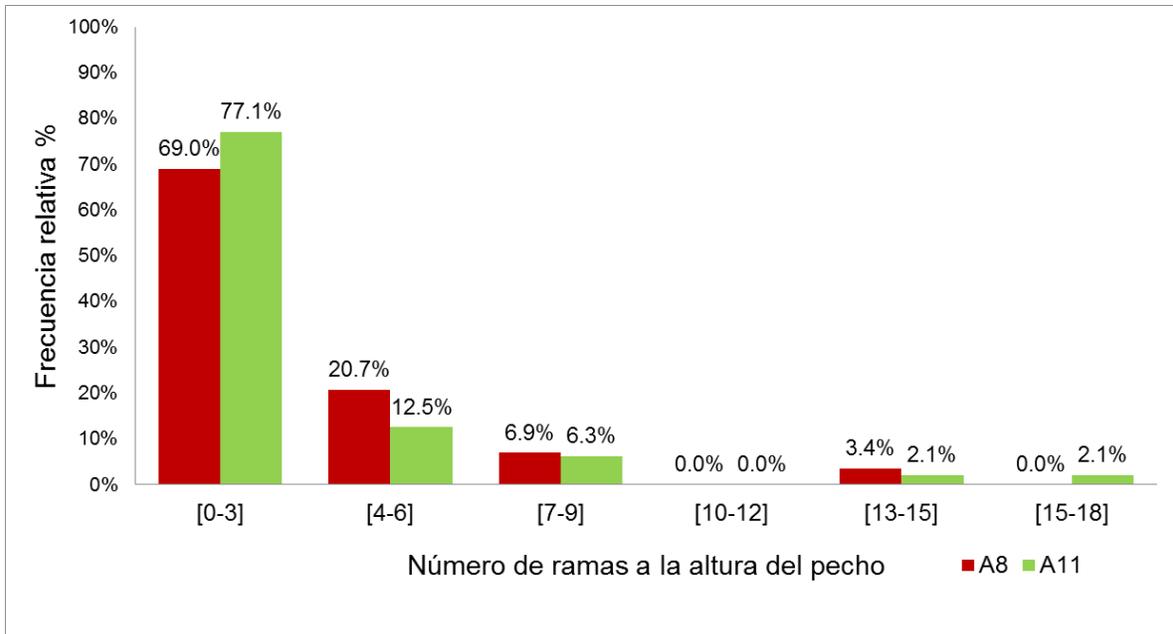


Figura 21 Frecuencia relativa de número de ramas a la altura del pecho de los eucaliptos en las áreas sujetas a restauración A8 (N= 30) y A11 (N= 51). Datos de octubre y noviembre 2015.

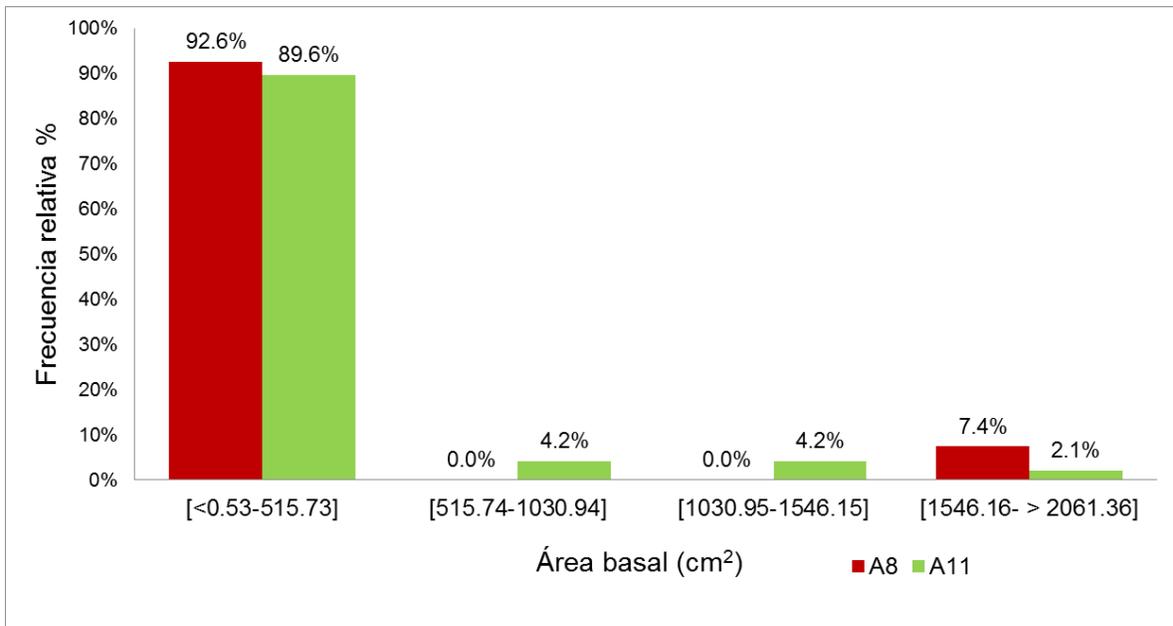


Figura 22. Frecuencia relativa de área basal de los eucaliptos en las áreas sujetas a restauración A8 (N= 30) y A11 (N= 51). Datos de octubre y noviembre 2015.

Por otra parte, de los 52 individuos registrados en A11, seis fueron tocones (12%) y 46 plantas completas derivadas de semillas (ver Fig. 18) Las alturas

variaron entre 1.25 y 15.54 m de altura y la mayoría (el 59.62%) se encontraron entre 5.35 y 7.39 m (Fig. 19). La cobertura varió entre 0.09 y 21.94 m² por árbol, y la mayoría (el 72.55%) tuvieron entre 0.09 y 3.21 m² (Fig. 20). El número de ramas a la altura del pecho variaron de cero a 18, pero la mayoría (el 77.08 %) tuvieron entre una y tres ramas (Fig. 21). El DAP varió entre cero y 67.76 cm, y un área basal que varió entre 0.53 y 3606.96 cm², pero la mayoría (el 89.58%) tuvieron entre 0.53 y 515.73 cm² (Fig. 22).

5. DISCUSIÓN

5.1. Recuperación de la comunidad vegetal

5.1.1 *El desarrollo histórico de los sitios A8 y A11.* Diez años después de las acciones de restauración llevadas a cabo en A8 y A11 se encontró que estos sitios ha cambiado notablemente la composición vegetal. Al comparar los datos de dominancia vegetal obtenidos en A8 durante 2006 por Antonio Garcés (2008), en 2007 por Peña-Mendoza (2016), en 2008 por Saucedo-Morquecho (2011), en 2009 por Ayala-López de Lara (2014) y en 2010 por Muñoz-Saavedra (2013) (ver también Antonio Garcés *et al.*, 2009) con los en agosto-octubre del 2014 (obtenidos en este estudio) puede verse que hay un cambio en la dominancia de las especies en el tiempo, comenzando por el aumento en la dominancia de especies nativas no arvenses, dada principalmente por dos especies nuevas *Eupatorium* sp. y *Eupatorium petiolare*, además de las ya dominantes desde el inicio, *Montanoa tomentosa* y *Buddleia cordata*, que han disminuido su cobertura. Por otro lado, la cobertura relativa de las especies arvenses ha disminuido. Por ejemplo, *Phytolacca icosandra* y *Mirabilis jalapa* ya no dominan, y *Dicliptera peduncularis* ha disminuido su cobertura. Finalmente, las especies exóticas también han disminuido en su cobertura relativa muy poco, como *Pennisetum clandestinum* y *Schinus molle* y pero se registran nuevas especies dominantes exóticas, como es el caso de *Leonotis nepetifolia* y *Ricinus communis* (Figs. 23a y 24).

Por su parte, la estructura de la comunidad vegetal de A11 también ha cambiado desde 2006, esto de acuerdo con los datos reportados en 2006 por Villeda-Hernández (2010), en 2008 por E. Valdez del Ángel (en prep.) y en 2010 por González-Rebeles Guerrero (2012) (ver también Antonio Garcés *et al.*, 2009), en comparación con los registros de cobertura relativa obtenidos en agosto-octubre de 2014 en este estudio. Puede verse, por ejemplo, un gran aumento en la cobertura de nuevas especies nativas no arvenses, como *Dahlia coccinea*, *Fraxinus uhdei* y *Eupatorium* sp., además de que *Buddleia cordata* y *Cissus sicyoides* han disminuido su cobertura en el sitio; sin embargo, también se registran especies nativas no arvenses que ya no dominan, como es el caso de *Verbesina virgata*, *Eupatorium petiolare*, *Gnaphalium* sp. y *Muhlenbergia robusta*. De igual manera han aumentado las especies nativas arvenses a pesar de que ya no dominan como *Wigandia urens* y *Phytolacca iccosandra*, pero se detecta un aumento de cobertura de *Dicliptera peduncularis* y *Archibaccharis serratifolia*. También puede verse que hay una reducción en la dominancia de las especies exóticas, como *Pennisetum clandestinum*, la cual aunque aún domina en el sitio, su cobertura se ha visto notablemente reducida en el tiempo; además, las especies también exóticas *Ricinus communis* y *Nicotiana glauca* ya no dominan en el sitio, no obstante, otra exótica, *Tropaeolum majus* ha aumentado su cobertura principalmente en los bordes del sitio (obs. pers., 2015) (ver Figs. 23 b y 24). Es importante destacar que la ZCR también ha cambiado en el tiempo. El cambio más notable es el decremento de la dominancia de especies exóticas y un aumento de la cobertura de las especies nativas arvenses (Fig. 24).

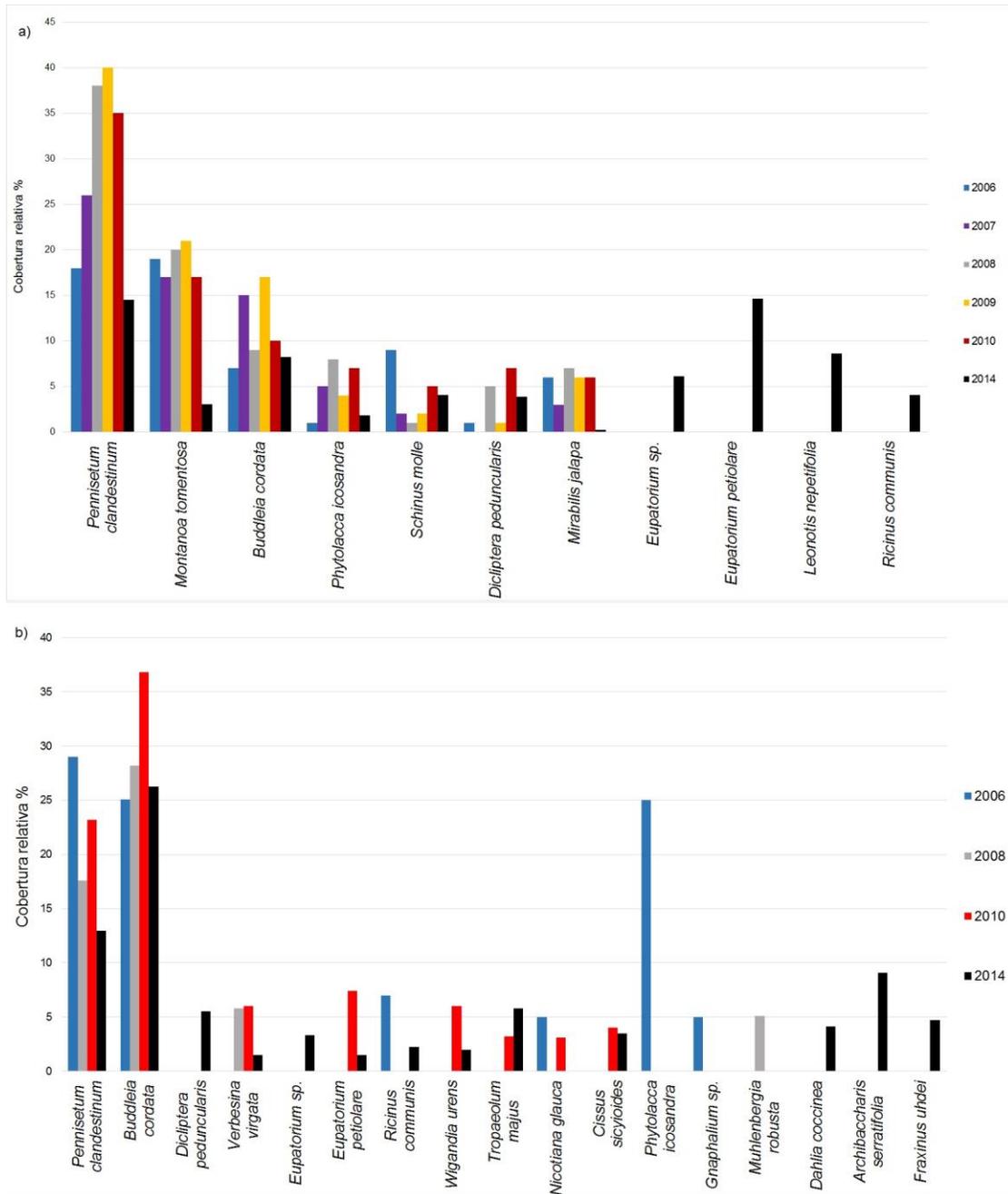


Figura 23. a) Porcentaje de cobertura relativa promedio de las especies dominantes en el noreste del área de amortiguamiento A8 sujeta a restauración ecológica en la REPSA entre 2006 y 2015. Los datos se basan en los obtenidos en el sitio en 2006 por Antonio Garcés (2008), en 2007 por Peña-Mendoza (2016), en 2008 por Saucedo-Morquecho (2011), en 2009 por Ayala-López de Lara (2014) y en 2010 por Muñoz-Saavedra (2013), así como los obtenidos en este estudio en la temporada de lluvias agosto-octubre de 2014 Modificada de Muñoz-Saavedra, 2013. b) Porcentaje de cobertura relativa promedio de las especies dominantes en el área de amortiguamiento A11 sujeta a restauración ecológica en la REPSA entre 2006 y 2014. Los datos se basan en los obtenidos en el sitio 2006 por Villeda-Hernández (2010), en 2008 por E. Valdez del Ángel (en prep.), en 2010 por González-Rebeles Guerrero (2012) en comparación con los obtenidos en la temporada de lluvias de agosto-octubre de 2014.

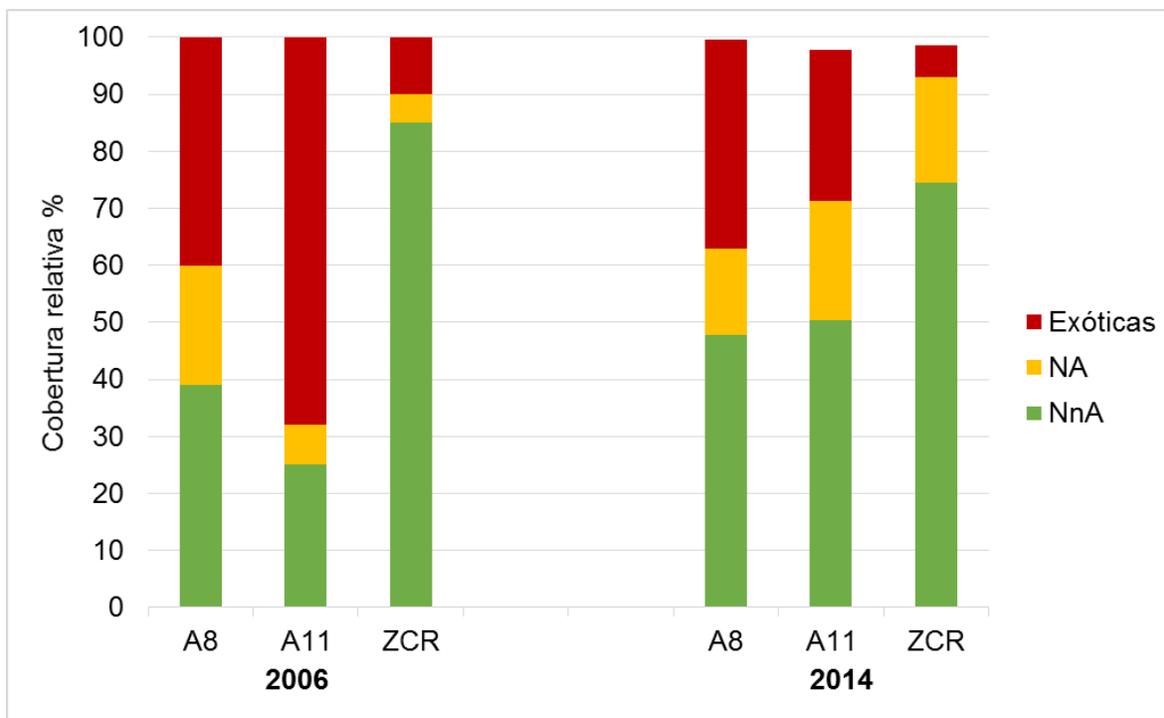


Figura 24. Cobertura relativa de plantas nativas no arvenses (NnA) (sucesionalmente tardías), nativas arvenses (NA) (sucesionalmente tempranas) y exóticas (E) (no deseables desde el punto de vista de la restauración ecológica) en los sitios A8 y A11 sujetos a restauración ecológica desde 2006, en comparación con lo que se registra en un área conservada de referencia (ZCR) en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Los datos se basan en los obtenidos en el sitio A8 en 2006 por Antonio-Garcés (2008) y en A11 por Villeda-Hernández, (2010) en comparación con los obtenidos en la temporada de lluvias agosto-octubre, 2014. Modificada de Antonio-Garcés, *et al.* (2009).

También se ha detectado que ha aumentado la diversidad en los sitios A8 y A11 después de las acciones de restauración. Al comparar los datos obtenidos en este estudio con los reportados en 2010 por Muñoz-Saavedra (2013) y 2009 por González-Rebeles Guerrero (2012) ninguno de los dos sitios tienen la misma diversidad que la ZCR, no obstante, A8 es el sitio que tiene un índice de diversidad más cercano al reportado en la ZCR en los datos obtenidos en este estudio (Fig. 25).

Las especies compartidas entre los sitios con la ZCR también han tenido cambios, sin embargo, entre A8 y la ZCR a pesar de haberse visto un incremento

en 2010, A8 en 2015 tiene la misma similitud con la ZCR que en el año 2007 (Fig. 26 a). No sucede lo mismo con A11 ya que ha aumentado el valor los índices de Sørensen y Jaccard en el tiempo, a pesar de que en 2009 disminuyeron. Esto demuestra que de 2007 a 2015 las especies compartidas entre A11 y ZCR han aumentado (Fig. 26 b).

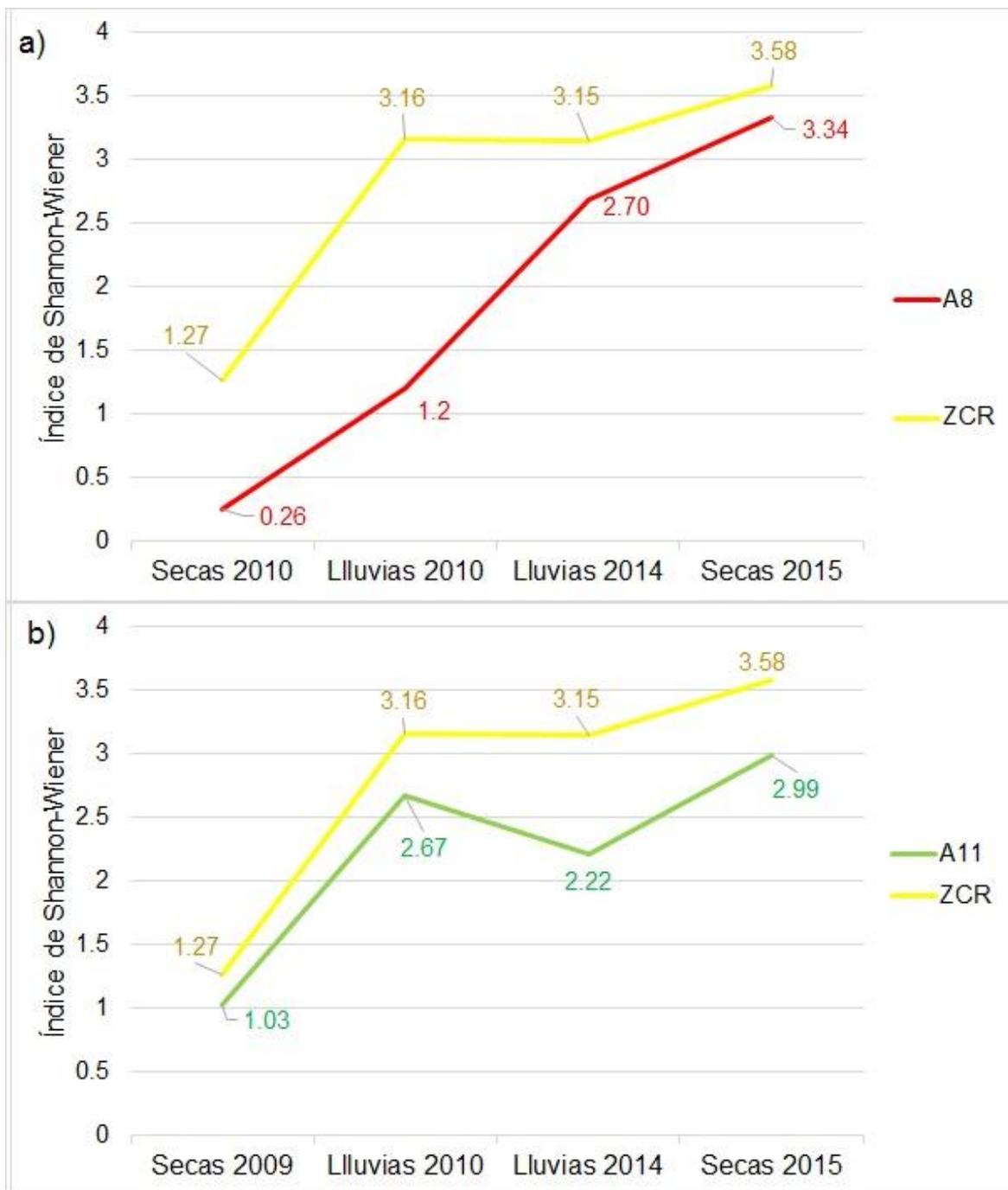


Figura 25. a) Cambio de los índices de Shannon-Wiener (H') en la comunidad vegetal de la zona sujeta a restauración ecológica A8 (datos obtenidos en 2010 por Muñoz-Saavedra, 2013, y en este estudio 2014-2015) y una zona conservada de referencia en la Reserva del Pedregal de San Ángel, Cd. Mx. b) Cambio de los índices de Shannon-Wiener (H') en la comunidad vegetal de la zona sujeta a restauración ecológica A11 (datos obtenidos en 2009 por González-Rebeles Guerrero, 2012 y en este estudio en 2014-2015) y una zona conservada de referencia en la Reserva del Pedregal de San Ángel, Cd. Mx.

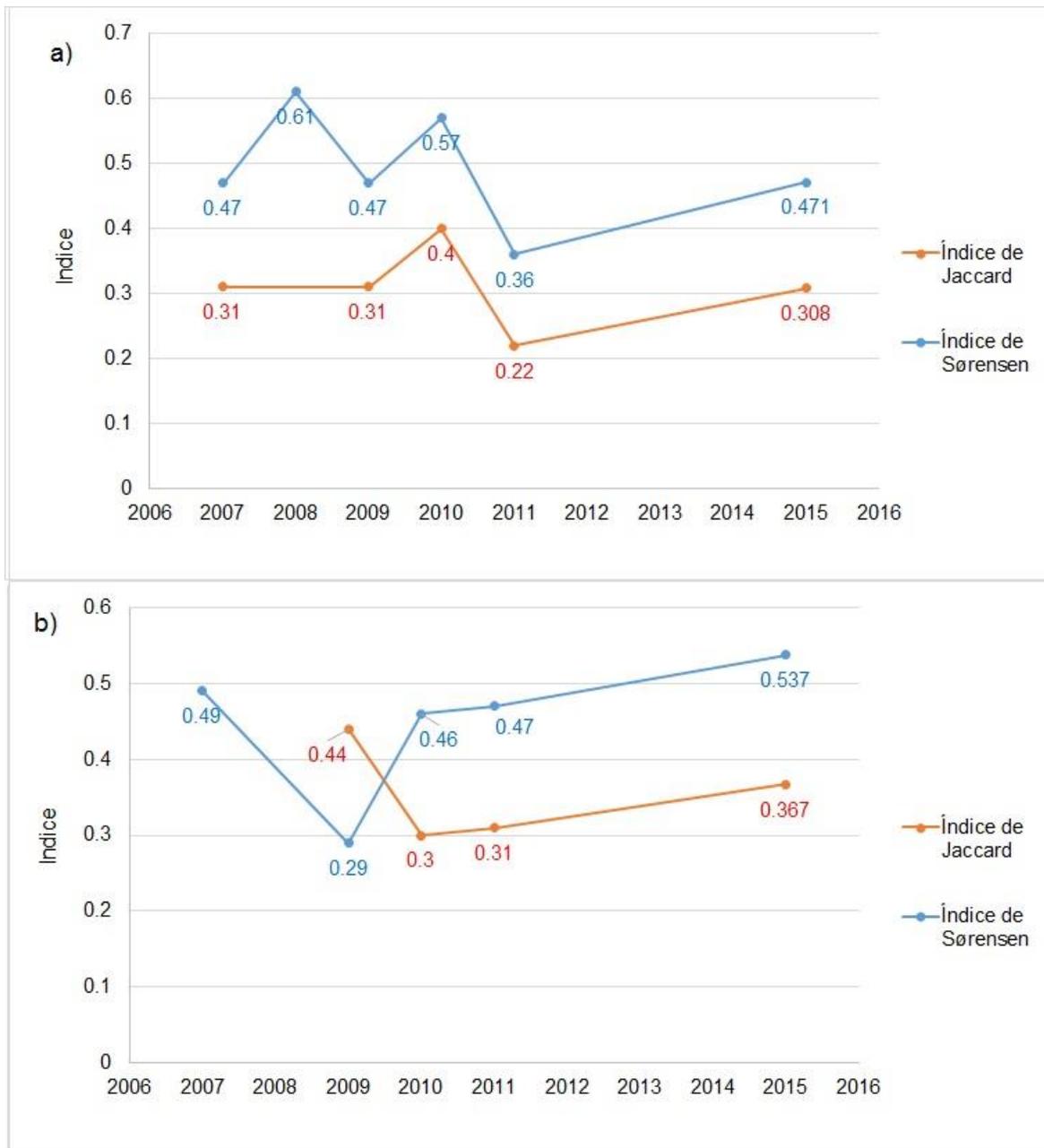


Figura 26. a) Cambio de los índices de Sørensen y Jaccard en la comunidad vegetal de la zona sujeta a restauración ecológica A8 y una zona conservada de referencia en la Reserva del Pedregal de San Ángel, Cd. Mx. Datos obtenidos en 2007 por Peña-Mendoza (2016), en 2008 por Saucedo-Morquecho (2011), en 2009 por Ayala-López de Lara (2014), en 2010 por Muñoz-Saavedra (2013), en 2011 por Estañol-Tecuatl (2014) y en este estudio en 2015. b) Cambio de los índices de Sørensen y Jaccard en la comunidad vegetal de la zona sujeta a restauración ecológica A11 y una zona conservada de referencia en la Reserva del Pedregal de San Ángel, Cd. Mx. Datos obtenidos en 2007 Villeda-Hernández, (2010); en 2009 por E. Valdez del Ángel, (en prep.); en 2010 González-Rebeles Guerrero, (2012); en 2011 Estañol-Tecuatl, (2014) y en este estudio en 2015.

5.1.2. *La zona conservada de referencia.* Un pedregal conservado es heterogéneo por naturaleza debido a que la roca volcánica forma parte del paisaje donde se acumula poco suelo conformando una variedad de micrositios con características particulares, por ejemplo, la presencia de planicies, oquedades, grietas, paredes, hondonadas, promontorios y cuevas, en el cual, debido a la gran capacidad de infiltración de agua a través de las grietas de la lava y a la baja capacidad de retención de agua en el suelo, prospera una mezcla de especies de climas secos, entre estas especies nativas se encuentran árboles de baja altura como *Eysenhardtia polystachya*, *Bursera cuneata*, *B. fagaroides*, *Buddleia cordata* y *B. parviflora*; arbustos, como el palo loco (*Pittocaulon praecox*), nopales (*Opuntia* spp) *Agave* spp., pastos como *Muhlenbergia robusta*, así como distintos tipos de hierbas, como helechos, orquídeas terrestres (*Habenaria novemfida*) y los mayitos (*Milla biflora* y *Zephyranthes longiflora*) (Mendoza-Hernández, 2008; Mendoza-Hernández *et al.*, 2016).

La Zona Conservada de Referencia fue seleccionada por el grupo de trabajo desde el inicio de los estudios sobre restauración ecológica debido a su cercanía con A11 (Z. Cano-Santana, com. pers.); sin embargo, este sitio presenta árboles con alturas grandes de *Eucalyptus camaldulensis* con una frecuencia mayor a la esperada y que no son deseables para los sitios sujetos a restauración (Figs. 10 y 11). No obstante, Estañol-Tecuatl y Cano-Santana (2017) reportan que, de acuerdo con la dominancia en cobertura de las especies vegetales, esta zona conservada de referencia no difiere de otros sitios conservados de las zonas núcleo de la REPSA.

5.1.3. *Las zonas sujetas a restauración ecológica.* Después de 10 años de acciones de restauración ecológica, ninguno de estos dos sitios se parece totalmente a la Zona Conservada de Referencia. En éstos la presencia de sustratos diferentes a la roca basáltica ha tenido repercusiones en la comunidad vegetal. A8 ocupa una hondonada en la que se encuentran promontorios de cascajo en sus bordes Peña-Mendoza, (2016), lo cual parece incrementar la heterogeneidad del sitio, pues se mezclan áreas que siguen destruidas por el recubrimiento de escombros donde se facilita la entrada de especies exóticas, áreas bien conservadas con sustrato basáltico original que nunca fue destruido, cuatro parches de sustrato basáltico recuperado de distinta edad y el efecto benéfico de la remoción de los eucaliptos y de desechos inorgánicos (Saucedo-Morquecho, 2011; Ayala-López de Lara, 2014; Estañol-Tecuatl, 2014; Zambrano *et al.*, 2016). Esta zona comparte pocas especies con la ZCR lo cual se ve reflejado en bajos índices de similitud, además tiene dominancia de especies exóticas como *P. clandestinum* y *Schinus molle* y, particularmente en la temporada de secas, la cobertura de éstas es mayor que las especies nativas no arvenses (Tablas 3 y 10; Figs. 2 a 5). Por otra parte, en este sitio son más frecuentes los árboles con tallas más pequeñas que en la ZCR (Tablas 6 y 10; Figs. 10 a 12), esto por la presencia de eucaliptos de alturas grandes en la ZCR. También en el estrato medio son más frecuentes plantas leñosas de alturas intermedias, a diferencia de la ZCR donde son más frecuentes plantas xerófitas pequeñas como agaves, crasuláceas y cactáceas (Tablas 7 y 10; Figs. 13 y 14). Por otra parte, las plantas del estrato bajo registran menor cobertura que las encontradas en la ZCR, ya que en este último, el helecho *Cheilanthes bonariensis*

y la crasulácea *Echeveria gibbiflora* son las que aportaron mayor cobertura, en contraste con A8 donde fue una planta más pequeña, *Iresine diffusa* la dominante (Tablas 8 y 10; Figs. 15 y 16).

En A11 también el tipo de sustrato juega un papel fundamental, debido a que el relleno de roca basáltica de hasta 1.2 m de diámetro (Cano-Santana *et al.*, 2010) dejó espacios en los cuales se asoma el sustrato no consolidado que se intentó recubrir, los cuales dejan intersticios donde se establecen los tepozanes (*B. cordata*) (Cano-Santana, 1994a, b; Arango-Galván, 2006; Cano-Santana *et al.*, 2010). El hecho de adicionar rocas de basalto en A11 no logró restaurar ciertas características físicas propias del ecosistema original, como la presencia de planicies, oquedades, grietas, paredes, hondonadas, promontorios y cuevas, que le conferirían una mayor variedad de microambientes que tienen un papel importante en el mantenimiento de la diversidad de plantas (Castillo-Argüero *et al.* 2007; Estañol-Tecuatl y Cano-Santana, 2017). Por lo anterior, en este sitio se vio favorecido un estrato arbóreo denso dominado por *B. cordata*, con menor frecuencia de árboles altos y con coberturas y áreas basales pequeñas, a diferencia de lo encontrado en la ZCR (Tablas 6 y 10; Figs. 10 a 12): Esta alta densidad del estrato arbóreo está relacionada directamente con la baja densidad de plantas en el estrato medio (Tablas 7 y 10; Figs. 13 y 14), y probablemente esté relacionado con que en el estrato bajo haya una frecuencia observada de plantas con baja cobertura más alta de la esperada (Tablas 8 y 10; Figs. 15 y 16). Por otra parte, a pesar de tener especies compartidas con la ZCR, en A11 aún se registra dominancia de especies exóticas, como *Pennisetum clandestinum*, sin embargo, tanto en lluvias como en secas, es mayor la cobertura de especies

nativas no arvenses (Tabla 10; Figs. 2 a 5). Un aspecto que es favorable para A11 es que se encuentra cercano a la Zona Núcleo Poniente, lo que ha permitido la colonización y el establecimiento de especies nativas a través de la lluvia de semillas y del transporte de las mismas realizada por tlacuaches y cacomixtles (San José-Alcalde, 2010). No obstante, también este sitio ha estado sujeto a disturbios, como la acumulación de desechos de jardinería por parte de los jardineros del Vivero Alto (Antonio-Garcés *et al.*, 2009; Farfán-Beltrán, 2016).

La ubicación del sitio también ha tenido un papel importante en la trayectoria sucesional que ha tomado este, ya que A8 se encuentra alejado y aislado del resto de la REPSA, lo que favorece que sea afectada por los procesos de urbanización circundante (ver Lot *et al.*, 2012 y Zambrano *et al.*, 2016), así mismo es más vulnerable al depósito de basura y al pisoteo debido a su cercanía con las canchas de fútbol las cuales se encuentran activas cada fin de semana, que es cuando los visitantes de las canchas de futbol vierten desechos inorgánicos sólidos; de hecho de manera lamentable son los mismos jardineros que depositan los residuos de las actividades de jardinería (obs. pers., 2015), además de ser ocupado por los taxistas como sanitario al aire libre (Saucedo-Morquecho, 2011; Farfán-Beltrán, 2016). Asimismo, no se debe olvidar que tanto A8 como A11 están sujetos a un intenso efecto de borde, lo cual, según datos de P. Noguez-Ledesma (en prep.), favorece la dominancia de plantas exóticas y la reducción de la diversidad vegetal, debido a que los bordes están sujetos a diversos disturbios, como el depósito de residuos orgánicos e inorgánicos que incrementan el establecimiento de flora exótica, además de tener mayor

susceptibilidad a la colonización por este tipo de plantas, cuyos propágulos provienen del exterior.

Tabla 10. Rasgos de los sitios sujetos a restauración en A8 (camellón afectado por eucaliptos y depósito de residuos de jardinería) y A11 (estacionamiento cancelado) sujetos a 10 años de acciones de restauración en comparación con la zona conservada de referencia de la Reserva del Pedregal de San Ángel, Cd. Mx. Datos de 2015.

Rasgo	Estatus en comparación con la zona conservada de referencia	
	A8	A11
Cobertura y riqueza de plantas exóticas	Mayor	Mayor
Cobertura y riqueza de plantas nativas sucesionalmente tardías	Menor	Menor
Riqueza vegetal	Mayor	Mayor
Diversidad de árboles	Igual	Menor
Diversidad de las plantas del estrato medio	Mayor	Igual
Diversidad de plantas perennes del estrato bajo	Igual	Igual
Estructura de alturas de los árboles	Diferente	Diferente
Estructura de alturas de las plantas del estrato medio	Igual	Igual
Estructura de alturas de las plantas del estrato bajo	Igual	Igual
Estructura de área basal de los árboles	Diferente	Diferente
Estructura de coberturas de árboles	Diferente	Diferente
Estructura de coberturas de las plantas del estrato medio	Igual	Igual
Estructura de coberturas de las plantas perennes del estrato bajo	Diferente	Diferente
Densidad de árboles	Igual	Diferente
Densidad de las plantas del estrato medio	Igual	Diferente
Densidad de plantas del	Igual	Igual

Rasgo	Estatus en comparación con la zona conservada de referencia	
	A8	A11
estrato bajo		
Área basal de los árboles	Igual	Igual
Cobertura de árboles	Igual	Igual
Cobertura de las plantas del estrato medio	Igual	Igual
Cobertura de plantas perennes del estrato bajo	Igual	Igual
Índice de dominancia de Simpson	Mayor	Mayor
Similitud de Sørensen	0.471	0.537
Similitud de Jaccard	0.308	0.367

5.2. La colonización en los parches de sustrato basáltico

En los ambientes recién formados es común la carencia de suelo; sin embargo, esta característica es efímera, ya que poco tiempo después por medios físicos, químicos y biológicos se inician los procesos de pedogénesis, y ciertos componentes de la vegetación empiezan a colonizar y establecerse en estos sitios, lo cual se conoce como sucesión primaria (Cano-Santana-Meave, 1996). En este sentido, la recuperación de sustrato basáltico ha sido fundamental en las acciones de restauración ecológica, ya que en ellos se lleva a cabo una sucesión primaria y, de acuerdo con un estudio realizado en 2011 por Estañol-Tecuatl (2014), conservar sustrato basáltico original permite el establecimiento de especies nativas, pues no sucede lo mismo en áreas perturbadas donde abunda el cascajo, tierra y desechos inorgánicos en los que se ve facilitada la colonización de especies exóticas que necesitan materia orgánica acumulada para invadir el área, como de *Pennisetum clandestinum* (Wilén y Holt, 1995). Esto es consistente

con los resultados obtenidos en los parches de sustrato basáltico recuperado, donde se detectó una colonización de especies nativas, ya que sólo dos de las 60 especies enraizadas dentro de estos parches fueron exóticas. Es esencial decir que en estos parches no hubo dominancia de especies exóticas enraizadas, pues éstas, cuando fueron registradas, se trataba casi siempre de individuos que enraizaban fuera de los parches (Tabla 5); no obstante, estas especies exóticas aportan cobertura y sombra hacia los parches como en el caso de los parches Erandi 1 y Erandi 2 en la temporada de secas, en los que la especie que más cobertura aportó fue la exótica *P. clandestinum* (Fig.7).

Saucedo-Morquecho (2011) discute que las especies colonizadoras que llegaron a la subzona Dinosaurio en 2008 fueron en su mayoría especies nativas que colonizaron al ser dispersadas probablemente por el viento, como las Asteraceae y las Poaceae, como *Eupatorium petiolare* y *Montanoa tomentosa*, las cuales siguen dominando en el parche Dinosaurio (Fig. 7). Esta misma autora registra en el parche un total de 39 especies, siendo las dominantes *B. cordata*, *P. icosandra*, *Montanoa tomentosa*, *P. clandestinum* y *Conyza canadiensis* (L.) Cronq (Asteraceae). En el presente estudio, se encontró que *B. cordata* y *M. tomentosa* siguen dominando en el parche Dinosaurio; sin embargo, *P. clandestinum* y *Conyza canadiensis* ya no dominan (Figs. 6 y 7). En general, las Asteraceae son las colonizadoras más importantes en los parches con 21 de las 60 especies registradas, entre las que destaca *Eupatorium petiolare*, la cual se encontró colonizando todos los parches (Tabla A4.2).

5.3. La especie dominante *Pennisetum clandestinum*

Una de las especies exóticas dominantes en los sitios sujetos a restauración (A8 y A11) desde que se iniciaron las acciones de restauración es el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*). Este pasto como ya se mencionó, se ve favorecido por la presencia de basura y sedimentos no consolidados, ya que éstos le proveen de suelo y humedad (Cano-Santana *et al.*, 2010; Lot *et al.*, 2012; Estañol-Tecuatl y Cano-Santana, 2017). Esta especie impide el establecimiento de otras especies, lo que favorece la incidencia de incendios, lo que, a su vez, facilita la proliferación de este pasto, ocurriendo un ciclo que mantiene al ecosistema en estado degradado (Cano-Santana *et al.*, 2010; Estañol-Tecuatl y Cano-Santana, 2017). Es nativo de África y se ha considerado como especie invasora (FAO, 1996). Fue introducido para forrajeo en varias zonas de ambos hemisferios del planeta (FAO, 1996). La capacidad invasora de *P. clandestinum* radica en su rápido sistema de colonización, el cual se da por medio de rizomas, lo que le permiten ocupar nuevas áreas que contengan materia orgánica, además de que puede sobrevivir en un amplio espectro de condiciones ambientales, sobre todo en las áreas abiertas localizadas en los bordes, donde hay mayor incidencia de luz solar y la prevalencia de temperaturas relativamente mayores, por lo que se le facilita convertirse en la especie dominante en los ecosistemas en los que se introduce (Wilén y Holt, 1995).

A pesar de las acciones de restauración llevadas a cabo, se registra una dominancia de esta especie, esto debido a que es una especie muy agresiva, ya que sus rizomas pueden penetrar en el suelo de 20 a 30 cm de profundidad y sus

semillas permanecer viables hasta 10 años, lo que hace muy difícil su erradicación (FAO, 1996). Se requiere prevenir la propagación de esta especie por medio de la extracción de las partes subterráneas de la planta hacia la superficie para su desecación natural, quemarlas para evitar rebrotes posteriores, o utilizar herbicidas (FAO, 1996). Su dominancia en A11 se debe también a que los cargamentos de roca basáltica que se utilizaron para rellenar el área venían acompañados con rizomas de pasto kikuyo, y su establecimiento no pudo ser impedido a pesar de las acciones de extracción mecánica que se llevaron a cabo en 2005 (Antonio-Garcés *et al.*, 2009; Cano-Santana *et al.*, 2010; San José-Alcalde, 2010; Estañol-Tecuatl y Cano-Santana, 2017).

5.4. Efectividad del voleo de semillas

Con base en los resultados obtenidos, puede inferirse que la adición de semillas al voleo fue una práctica que no cumplió con los objetivos deseados, debido a que el registro de las especies en A8 en 2014-2015 con respecto a las introducidas al voleo en el sitio en junio 2009 (Ayala-López de Lara, 2014; Tabla A1.1 del Anexo 1) fue muy baja, pues se encontraron indicios de sólo 14 individuos de dos especies (*Opuntia tomentosa* y *Salvia mexicana*), a pesar de que se introdujeron poco más de 1.4 millones de semillas. Es importante destacar que no puede saberse con exactitud si las plantas que se encuentran en el sitio son las mismas que se introdujeron a partir de semillas, pues, por ejemplo, ya se tenían registradas estas especies previo a la introducción de semillas (Antonio-Garcés, 2008; Antonio-Garcés *et al.*, 2009) y los parches de sustrato basáltico muestran reclutamiento previo de estas dos especies (Saucedo-Morquecho, 2011).

Al adicionar las semillas al sitio A8 no se tomaron en cuenta muchos aspectos determinantes para que esta fuera efectiva; por ejemplo, no se consideró que las semillas introducidas de algunas especies podrían requerir un proceso previo de escarificación, sobre todo en el caso de *Opuntia tomentosa*, cuyas semillas pueden germinar solo si previamente se rompe su latencia, simulando el paso por el tracto digestivo de vertebrados que la consumen (Flores y Jurado, 2011).

Por otra parte, de acuerdo con González-Mateos (1999), un aspecto esencial para la germinación y el establecimiento de las plantas son los microambientes en los cuales se depositan las semillas; por ejemplo, *Salvia mexicana* emerge de manera óptima cuando se entierra a 1 cm de profundidad, además de requerir un aporte constante de humedad para germinar, y probablemente requiere permanecer periodos largos en el banco de semillas antes del reclutamiento de plantas. Otro punto importante que menciona esta autora y que determina la germinación son las características morfofisiológicas de cada especie, las cuales deben ser tomadas en cuenta en su propagación.

5.5. Rebrote y reclutamiento de eucaliptos

Los resultados obtenidos de los eucaliptos encontrados después de 3.5 años demuestran la importancia de tener un manejo sobre estas especies exóticas en los sitios sujetos a restauración, pues se registraron 30 eucaliptos en el sitio sujeto a restauración A8 (27% proveniente de regeneración de tocones) y 52 el sitio sujeto a restauración A11 (12% proveniente de regeneración de tocones), lo

que ratifica el destacable poder de regeneración de los eucaliptos a partir de sus tocones (Figs. 16 y 17), pues se encontró que éstos pueden regenerar hasta 18 ramas que pueden emerger de los tocones llegando a medir hasta 9.6 m de altura en ese periodo de tiempo (Figs. 18 a 20).

De acuerdo con Martínez (1990), *Eucalyptus camaldulensis* es una especie que rebrota vigorosamente creciendo hasta en las condiciones más adversas, teniendo su mejor crecimiento en zonas bajas y en bosques secos tropicales, y sus mayores incrementos en altura son durante los primeros 7 a 10 años de edad, lo cual podría explicar el rápido crecimiento después de ser cortados, ya que no se extrae su raíz. Muchas veces el eucalipto no es extraído completamente quedando una parte del tronco con raíz bajo la tierra, lo que genera un rebrote después. Existe un método alternativo que podría ser aplicado para eliminar a los eucaliptos evitando la posibilidad de que éstos rebroten. Este método consiste en triturar los tocones sobrantes después de la corta convencional con una desbrozadora (Alonso-Louro *et al.*, 2008).

5.6 Evaluación de las acciones de restauración ecológica

El éxito de la restauración ecológica es un aspecto complejo y difícil de evaluar, debido a que se depende del grado de conocimientos que se tienen sobre el ecosistema predisturbio, la falta de criterios establecidas para conocer si la restauración fue exitosa o no, y el tiempo de restauración en comparación con el tiempo de evolución del ecosistema pre disturbio (Hilderbrand *et al.*, 2005; Wortley *et al.*, 2013).

Por todo esto, es difícil dar una evaluación definitiva después de 10 años de acciones de restauración en A8 y A11, además de la falta de estudios sobre la estructura vertical de la vegetación, los procesos ecológicos, y la particularidad de que en este estudio sólo se tomó un sitio de referencia. No obstante, con base en los nueve atributos de ecosistemas restaurados de la SER (2004; p. 5 y 6) (ver sección 1.1; ver sección 1.1) puede detectarse una restauración parcial en los dos sitios, y en mayor grado en A11 que en A8; esto porque si bien A8 ha tenido un aumento en las especies nativas, su estructura y composición de la comunidad vegetal no es similar a la ZCR, y en él siguen constantes los disturbios permitiendo la entrada de especies exóticas, además se encuentra lejos de las zonas núcleo, lo cual hace difícil la colonización de especies nativas. Adicionalmente, el sitio es susceptible al depósito de basura y residuos de jardinería proveniente de las canchas de fútbol aledañas (obs. pers., 2015).

Por otra parte, A11 muestra una mayor similitud con la ZCR debido en gran parte a la cercanía con la Zona Núcleo Poniente, la cual le provee de la lluvia de semillas que el sitio necesita para restaurar la composición de especies nativas. A pesar de esto la estructura de la comunidad vegetal no es la misma que la ZCR, pues la adición de rocas no le confirió características similares a la ZCR, además de que la dominancia de *Pennisetum clandestinum* se debió a la adición involuntaria de rizomas.

Aunque en este estudio sólo se tuvo una zona conservada de referencia, lo obtenido coincide con estudios previos en los que se toman varios sitios de referencia; por ejemplo en el trabajo realizado en 2011 por Estañol-Tecuatl y

Cano-Santana (2017), encontraron que los dos sitios sujetos a restauración aún no han recuperado en su totalidad su trayectoria histórica, y se necesitan llevar a cabo más estudios para conocer la dirección de la sucesión, además de enfatizar que todos los estudios posteriores a la restauración llevados a cabo en estos sitios muestran que la comunidad vegetal en A8 es más cercana a los sitios perturbados mientras que A11 está siguiendo una trayectoria distinta enfocada a un ensamblaje distinto al que tienen los sitios conservados. A pesar de esto, Farfán-Beltrán (2016), encontró que las comunidades de artrópodos colectados con trampas jabonosas de colores de A8 y A11 no difieren en riqueza, abundancia total y diversidad con los datos registrados en varios sitios conservados, pero sí en composición y abundancia relativa, por lo que concluye que la restauración ecológica está incompleta, en tanto que Corona-Tejeda (2017), al comparar las comunidades de artrópodos epífitos colectados con red de golpeo en A8 y A11 con los de varias zonas conservadas de referencia, encontró que la restauración ecológica en A11 ha sido parcialmente más exitosa que en A8.

Sin embargo, los estudios con las comunidades de vertebrados (herpetofauna, aves y mamíferos) sugieren resultados más exitosos, ya que los trabajos de San José-Alcalde (2010) y San José-Alcalde, *et al.*, (2010, 2013), encontraron que las dos zonas sujetas a restauración no difieren en abundancia con los registros en la ZCR usada en este estudio. Sus datos muestran que los sitios sujetos a restauración ya cuentan con las condiciones y recursos necesarios para favorecer la presencia, actividad y diversidad de la fauna nativa de vertebrados.

Este estudio demuestra que los sitios, al mostrar una restauración parcial, aún necesitan de nuestra ayuda para llegar a una trayectoria ecológica más parecida a la que tiene una Zona Núcleo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, para lo cual se necesitan llevar a cabo más acciones de restauración ecológica de la mano con un monitoreo de cada sitio, tomando en cuenta sus particularidades.

6. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

Dados los resultados obtenidos y la discusión de los mismos, se formulan las siguientes conclusiones:

1. La restauración de los sitios A8 y A11 tras 10 años de acciones es parcial, ya que ninguno de los sitios es completamente similar en estructura y composición a la zona conservada de referencia (ZCR); sin embargo, en ambos sitios se ve un aumento en la dominancia de las especies nativas no arvenses en el tiempo.
2. La presencia de especies exóticas en los sitios se debe principalmente a la falta de sustrato basáltico original, además de que las fuentes de disturbios no han sido eliminadas del todo, como la invasión de nuevas especies exóticas y el depósito de desechos orgánicos e inorgánicos.
3. La composición de la comunidad vegetal de A11 es más parecida a la zona conservada de referencia (ZCR) ubicada en la zona núcleo poniente, debido a su cercanía. En contraste, A8, que se ubica en un lugar más accesible a las actividades humanas que causan diversos disturbios y tiene menos parecido debido a que se encuentra lejos de la matriz ecológica que ofrecen las zonas núcleo.
4. La estructura de la comunidad vegetal de los sitios sujetos a restauración ecológica es diferente a la ZCR, ya que A8 solamente es similar en área basal en los árboles, densidad y cobertura en sus tres estratos a la ZCR, pero con diferencias en cómo se estructuran éstas en la comunidad; mientras que A11

tiene una gran densidad de árboles de *Buddleia cordata*, pues aún existen espacios entre las rocas en los cuales permanece suelo que favorece la presencia de un estrato arbóreo más denso con menor frecuencia de árboles altos y con coberturas y áreas basales pequeñas, un estrato medio menos denso y un estrato bajo con plantas de bajas coberturas.

5. En la época de secas, en A8 la cobertura de las especies exóticas aumenta principalmente por el pasto *Pennisetum clandestinum*.
6. La composición vegetal en los parches de sustrato basáltico recuperado muestra la importancia de restaurar este tipo de sitios como acción de restauración ecológica, ya que en éstos se da una sucesión primaria en la que colonizan en su gran mayoría especies nativas.
7. El establecimiento y supervivencia de plantas dispersadas al voleo depende de diversos factores tanto microambientales como características morfofisiológicas de las especies las cuales se deben tomar en cuenta, así como las técnicas que se deben aplicar para romper la latencia.
8. El método de manejo de eucaliptos no ha funcionado de la manera esperada, ya que éstos, después de ser cortados con machete en 2012, rebrotaron, 3.5 años después y llegaron a alcanzar hasta 9.6 m de altura.
9. Se recomienda implementar otros métodos de manejo de la especie exótica *Eucalyptus camaldulensis*, como el que menciona Alonso-Louro *et al.* (2008), el cual consiste en triturar los tocones sobrantes de después de la corta convencional con una desbrozadora.

10. *Pennisetum clandestinum* sigue siendo un problema en estos sitios, por lo cual se deben implementar técnicas que permitan su manejo, como la recuperación de sustrato basáltico original, aunado al retiro de cascajo y tierra que favorecen la presencia y dominancia de esta especie.

Por otra parte, de acuerdo con los resultados obtenidos, se formulan las siguientes recomendaciones. Sería deseable llevar a cabo un programa de difusión del estado e importancia de estos sitios, principalmente con las personas cercanas a ellos. Por ejemplo, en el caso de A8 con las personas que acuden a las canchas de fútbol de “Los pumitas”, y en el caso de A11 con trabajadores y jardineros del Vivero Alto. Esto con el fin de evitar que estas dos zonas sean vistas como depósitos de basura y desechos de jardinería. También se sugiere realizar jornadas de restauración más frecuentes para retirar desechos inorgánicos y tener un programa de manejo continuo de los eucaliptos. En estas jornadas se invitaría a participar a toda la comunidad universitaria con el fin de que haya una apropiación de estos espacios que garanticen su cuidado en el futuro.

También se recomienda mejorar el programa de extracción de eucaliptos probando nuevos métodos, tales como la destrucción del tocón que permanece después de la corta convencional. La recomendación más importante es tener como prioridad la recuperación de sustrato basáltico original del sitio mediante actividades de retiro de sustrato no consolidado, ya que la adición de sustrato basáltico no provee las características propias del pedregal, como su heterogeneidad.

Adicionalmente, se sugiere tomar en cuenta los rasgos particulares de cada uno de los sitios. A8; al ser un camellón, está sujeto a la entrada de personas que hacen un mal uso del sitio, por ejemplo, los taxistas que lo ocupan como sanitario, los visitantes a las canchas de futbol que vierten desechos inorgánicos sólidos, y los mismos jardineros que depositan los residuos de las actividades de jardinería (obs. pers., 2015). Particularmente, en este último caso, una de las acciones podría ser informar a los jardineros de la importancia de preservar las especies nativas. En este sitio una de las acciones debería ser la remoción de los desechos. En ambos sitios, y debido a la dominancia de eucaliptos, sería importante enfocarse a la extracción de éstos.

LITERATURA CITADA

- Alonso-Louro, S., Asensio-Fandiño, A.B. y J. Montalvo-Rodríguez. 2008. Control de eucalipto y reforestación con especies caducifolias: innovación y efectos ecológicos. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 28: 37-42.
- Antonio-Garcés, J.I. 2008. Restauración ecológica de la Zona de Amortiguamiento 8 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, D.F. (México). Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 65 pp.
- Antonio-Garcés, J.I., M. Peña, Z. Cano-Santana, A. Orozco-Segovia y M. Villeda. 2009. Cambios en la estructura de la vegetación derivados de acciones de restauración ecológica en las Zonas de Amortiguamiento Biológicas y Vivero Alto. Pp. 465-481, en: Lot, A. y Z. Cano-Santana (eds.). *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Arango-Galván, A. 2006, Heterogeneidad espacial y dinámica de la descomposición de hojarasca de cuatro especies abundantes en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 78 pp.
- Ayala-López de Lara, M. 2014. La comunidad vegetal y abundancia de dos artrópodos en el área A8 de la Reserva del Pedregal de San Ángel tras cuatro años de acciones de restauración. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 73 pp.

- Brown, S. y A.E. Lugo. 1994. Rehabilitation of tropical lands: A key to sustaining development. *Restoration Ecology*, 2: 97-111.
- Canfield, R. 1941. Application of the line-intercept method in sampling range vegetation. *Forestry*, 39: 388-396.
- Cano-Santana, Z. 1994a. Flujo de energía a través de *Sphenarium purpurascens* (Orthoptera: Acrididae) y productividad primaria neta aérea en una comunidad xerófila. Tesis doctoral. Unidad Académica de los Ciclos Profesionales y Posgrado del Colegio de Ciencias y Humanidades/Centro de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 198 pp.
- Cano-Santana, Z. 1994b. La Reserva del Pedregal como ecosistema: estructura trófica. Pp. 149-157, en: Rojo, A. (comp.). *Reserva Ecológica El Pedregal de San Ángel: ecología, historia natural y manejo*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Cano-Santana, Z. y J.A. Meave. 1996. Sucesión primaria en derrames volcánicos: el caso del Xitle. *Ciencias*, 41: 58-68.
- Cano-Santana, Z., M. San José, M. Ayala, E. Saucedo-Morquecho, A. Garmendia-Corona, J. Antonio-Garcés, M. Peña, M. Villeda, A. Orozco, G. González-Rebeles Guerrero y R. Muñoz-Saavedra. 2010. Cambios de la vegetación y la fauna de un pedregal sometido a restauración ecológica. III Simposio Internacional de Restauración Ecológica. Santa Clara, Cuba.
- Cano-Santana, Z., I. Pisanty, S. Segura, P.E. Mendoza-Hernández, R. León-Rico, J. Soberón, E. Tovar, E. Martínez-Romero, L.C. Ruiz y A. Martínez-Ballesté. 2006. Ecología, conservación, restauración y manejo de las áreas naturales y protegidas del Pedregal del Xitle. Pp. 203-226, en:

- Oyama, K. y A. Castillo (coords.). *Manejo conservación y restauración de recursos naturales en México: perspectivas desde la investigación científica*. Siglo XXI/Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Castillo-Argüero, S., Y. Martínez-Orea, J.A. Meave, M. Hernández-Apolinar, O. Núñez-Castillo, G. Santibáñez-Andrade y P. Guadarrama-Chávez. 2009. Flora: susceptibilidad de la comunidad a la invasión de malezas nativas y exóticas. Pp. 107-133, en: Lot, A. y Z. Cano-Santana (eds.). *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Castillo-Argüero, S., Y. Martínez-Orea, M.A. Romero-Romero, P. Guadarrama-Chávez, O. Núñez-Castillo, I. Sánchez-Gallén y J.A. Meave. 2007. *La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: aspectos florísticos y ecológicos*. Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria/Coordinación de la Investigación Científica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 294 pp.
- Castillo-Argüero, S., Y. Martínez-Orea, M. Nava-López y L. Almeida-Leñero. 2016. El matorral xerófilo de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel y sus servicios ecosistémicos. Pp. 50-69, en: *La biodiversidad en la Ciudad de México*, vol. III. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad/Secretaría del Medio Ambiente, México.
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2016. Especies exóticas presentes en México. Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/Invasoras/pdf/presentes_confinedos.pdf>, consultado el 10 octubre de 2016.

- Corona-Tejeda, P. 2017. Estructura de comunidades de artrópodos epífitos de sitios perturbados, conservados y sujetos a restauración ecológica de la Reserva del Pedregal de San Ángel, Ciudad de México, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. 80 pp.
- Costa-Pérez, J.C., D. Villaverde-Omil, I. Pedrosa-Roldán, P. Caballero-Javierre, P. Otero-Omil y R. De la Mata-Pombo. 2006. *Agentes forestales de la Xunta de Galicia*, vol. 1. MAD, Madrid. 371 pp.
- Espinosa-García, F.J. 1996. Revisión sobre la alelopatía de *Eucalyptus* L' Herit, *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 58: 57-74.
- Espinosa-García, F. y J. Sarukhán. 1997. *Manual de malezas del Valle de México*. Ediciones Científicas Universitarias, Universidad Nacional Autónoma de México/Fondo de Cultura Económica, México. 407 pp.
- Espinosa-García, F. y J.L. Villaseñor-Ríos. 1998. *Catálogo de malezas de México*. Universidad Nacional Autónoma de México/Fondo de Cultura Económica, México. 448 pp.
- Espinosa-García, F. y J.L. Villaseñor-Ríos. 2004. The alien flowering plants of Mexico. *Diversity and Distributions*, 10: 113-123.
- Estañol-Tecuatl, F. 2014. Estructura de la comunidad vegetal en zonas perturbadas, conservadas y sujetas a restauración ecológica en la Reserva del Pedregal de San Ángel. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 69 pp.

- Estañol-Tecuatl, F y Z. Cano-Santana. 2017. Recovery of basalt substrate for xeric scrub restoration in a lava field in Mexico City. *Ecological Restoration*, 35: 41-51.
- Ezcurra, E., M. Mazari, I. Pisanty y G.A. Aguilar. 1999. *The basin of Mexico*. United Nations of University Press, Tokio. 236 pp.
- FAO, Food and Agriculture Organization, 1996. *Manejo de malezas para países en desarrollo*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia. 403 pp.
- Farfán-Beltrán, E. 2016. Estructura de la comunidad de artrópodos en sitios conservados, perturbados y sujetos a restauración ecológica en el Pedregal de San Ángel, D.F, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. 67 pp.
- Flores, J. y E. Jurado. 2011. Germinación de especies de cactáceas en categoría de riesgo del desierto chihuahuense. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8): 59-70.
- Gálvez, J. 2002. *La restauración ecológica: conceptos y aplicaciones*. Serie de Documentos Técnicos No. 8. Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas/Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, Universidad Rafael Landívar, Guatemala. 22 pp.
- González-Mateos, S.N. 1999. Estudio ecofisiológico de la germinación y emergencia de *Marrubium vulgare*, *Reseda luteola* y *Salvia mexicana* en diferentes microambientes. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios

- Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, Los Reyes, Estado de México. 95 pp.
- González-Rebeles Guerrero, G. 2012. Efecto de cinco años de restauración sobre la comunidad vegetal y dos poblaciones de artrópodos en el Área A11 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 86 pp.
- Hernández-Herrerías, L.B. 2011. Estructura de la comunidad vegetal y de dos poblaciones animales en zonas conservadas y perturbadas de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 52 pp.
- Hilderbrand, H.R., A. Watts y A.M. Randle. 2005. The myths of restoration ecology. *Ecology and Society*, 10: 1-19.
- Hobbs, R.J. y J.A. Harris. 2001. Restoration ecology: repairing the Earth's ecosystems in the new millennium. *Restoration Ecology*, 9: 239-246.
- INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2013. *El disturbio y su importancia en la ecología. Restauración ecológica*. Disponible en: <<http://www.inecc.gob.mx>>, consultado el 1 de abril de 2014.
- Lot, A. y P. Camarena. 2009. El Pedregal de San Ángel de la ciudad de México: reserva ecológica urbana de la Universidad Nacional. Pp. 19-25, en: Lot, A. y Z. Cano-Santana (eds.). *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Lot, A., M. Pérez-Escobedo, G. Gil-Alarcón, S. Rodríguez-Palacios y P. Camarena. 2012. *La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Atlas*

- de riesgos*. Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 51 pp.
- Louman, B., D. Quirós y M. Nilsson. 2001. *Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica. 265 pp.
- Martínez, H.H. 1990. *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, especie de árbol de uso múltiple en América Central. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica. 49 pp.
- Meli, P. y V. Carrasco-Carballido. 2011. *Restauración ecológica de riberas. Manual para la recuperación de la vegetación ribereña en arroyos de la Selva Lacandona*. Colección Corredor Biológico Mesoamericano. Serie Diálogos No. 5. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 62 pp.
- Mendoza-Hernández, P.E. 2008. Elementos de rehabilitación ecológica: primeros pasos en la reintroducción de plantas. Pp. 61-69, en: SEREPSA (Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel). *Manual de procedimientos de adopción de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (PROREPSA)*. Secretaría Ejecutiva REPSA, Coordinación de la Investigación Científica, Universidad Nacional Autónoma de México, México, México.
- Mendoza-Hernández, P.E., A. Rosete-Rodríguez, L. Peredo-López, J.A. Martínez-Villegas, M.E. Sánchez-Coronado y A. Orozco-Segovia. 2016. Estrategias para la restauración de un pedregal urbano: el caso del Parque Ecológico de la Ciudad de México. Pp. 237-254, en: Ceccon, E. y C. Martínez-Garza

(coord.) *Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas*. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Nacional Autónoma de México/Universidad Autónoma del Estado de Morelos/Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Ciudad de México.

Muñoz-Saavedra, R. 2013. Efecto de cinco años de restauración sobre la comunidad vegetal y dos poblaciones de artrópodos en el área A8 de la Reserva del Pedregal de San Ángel. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 69 pp.

Nava-López, M., J. Jujnovsky, R. Salinas-Galicia, J. Álvarez-Sánchez y L. Almeida-Leñero. 2009. Servicios ecosistémicos. Pp. 51-60, en: Lot, A. y Z. Cano-Santana (eds.). *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Noguez-Ledesma, L.P. (en prep.). Efecto de borde sobre la estructura de la comunidad vegetal de la Reserva del Pedregal de San Ángel, Cd. Mx. (México). Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. 46 pp.

Peña-Mendoza, M.T. 2016. Regeneración de la comunidad vegetal y de dos poblaciones de animales importantes en el NE de la Zona de Amortiguamiento 8 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel en respuesta a acciones de restauración ecológica. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 114 pp.

- Pomeroy, R.S., J.E. Parks y L.M Watson. 2007. *Cómo evaluar una AMP: Manual de indicadores naturales y sociales para evaluar la efectividad de la gestión de áreas marinas protegidas*. Unión Mundial para la Conservación de la Naturaleza, Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido. 216 pp.
- REPSA, Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. 2014. Portal: *Historia*. Disponible en: <www.repsa.unam.mx>, consultado el 1 de abril de 2014.
- Rojo, A. (comp.). 1994. *Reserva Ecológica "El Pedregal" de San Ángel: ecología, historia natural y manejo*. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 410 pp.
- Rzedowski, J. 1954. Vegetación del Pedregal de San Ángel, México. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional*, 8: 59-129.
- Rzedowski J. 1978 *Vegetación de México*. Limusa, México. 505 pp.
- San José-Alcalde, M. 2010. Monitoreo de las actividades de la fauna de vertebrados en dos sitios sujetos a restauración en la Reserva del Pedregal de San Ángel. México, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 74 pp.
- San José-Alcalde, M., A. Garmendia y Z. Cano-Santana. 2010. Monitoreo de aves en dos zonas sujetas a restauración ecológica y una de referencia, en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, México, México. *El Canto del Centzontle*, 1(2): 148-164.
- San José-Alcalde, M., A. Garmendia y Z. Cano-Santana. 2013. Vertebrate fauna evaluation after habitat restoration in a reserve within Mexico City. *Ecological Restoration*, 31 (3): 249-252.

- Sánchez, O., E. Peters, R. Márquez-Huitzil, E. Vega, G. Portales, M. Valdez y D. Azuara. 2005. *Temas sobre restauración ecológica*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. 401 pp.
- Saucedo-Morquecho, E.A. 2011. Regeneración de la comunidad vegetal y de dos poblaciones de artrópodos durante un proceso de restauración ecológica en el área de amortiguamiento 8 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, D.F. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 95 pp.
- SEDEMA, Secretaría del Medio Ambiente. 2014. *Pedregal de San Ángel, nuestra riqueza ignorada*. Disponible en: <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/areasverdesvidaparatodos/reserva_pedregal.html#.WgYRf1XibIU>, consultado el 1 de mayo de 2014.
- Segura-Burciaga, S. 2009. Introducción de especies: la invasión y control de *Eucalyptus resinifera*. Pp. 533-538, en: Lot, A. y Z. Cano-Santana, Z. (eds.). *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Segura-Burciaga, S. y J. Meave. 2001. Effect of the removal of the exotic *Eucalyptus resinifera* on the floristic composition of a protected xerophytic shrubland in southern Mexico City. Pp. 319-330, en: Brundu, G., J. Brock, I. Camarda, L. Child y M. Wade (eds.). *Plant invasions: species ecology and ecosystem management*. Backhuys Publishers, Leiden, Holanda.
- SER, Society for Ecological Restoration International Science. 2004. Disponible en: <www.ser.org>, consultado el 1 de abril de 2014.

- Siebe, C. 2009. La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670 +/- 35 años AP y sus implicaciones. Pp. 43-49, en: Lot, A. y Z. Cano-Santana, Z. (eds.). *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Siegel, S. y N. Castellan. 1995. *Estadística no paramétrica aplicada a las ciencias de la conducta*. Cuarta Edición. Trillas, México. 437 pp.
- Valiente-Banuet, A. y E. De Luna. 1990. Una lista florística actualizada para la Reserva del Pedregal de San Ángel, México, México. *Acta Botanica Mexicana*, 9: 13-30.
- Valdez del Ángel, E. (en prep.). Comunidad vegetal y abundancia de dos artrópodos en la zona A11 de la Reserva del Pedregal de San Ángel sujeta a restauración. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 76 pp.
- Valverde, V.T., Z. Cano-Santana, J.A. Meave del Castillo y J. Carabias. 2005. *Ecología y medio ambiente*. Pearson, México. 230 pp.
- Villeda- Hernández, M. 2010. Estructura de la comunidad vegetal y abundancia de *Sphenarium purpurascens* (Orthoptera) y *Peromyscus gratus* (Rodentia) en el área "Vivero Alto" de la Reserva del Pedregal de San Ángel sujeta a acciones de restauración. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 62 pp.
- Wilén, C.A. y J.S. Holt. 1995. Physiological mechanism for the rapid growth of *Pennisetum clandestinum* in Mediterranean climates. *Weed Research*, 36: 213-225.

Wortley L., M. Hero y M. Howes. 2013. Evaluating ecological restoration success: a review of the literature. *Restoration Ecology*, 21: 537-543.

Zambrano, L., S. Rodríguez-Palacios, M. Pérez-Escobedo, G. Gil-Alarcón, P. Camarena y A. Lot. 2016. *La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: Atlas de riesgos*. 2da. edición. Secretaría Ejecutiva de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel, Universidad Nacional Autónoma de México, México. 52 pp.

Zar, J.H. 1999 *Bioestatistical analysis* Prentice-Hall, Upper Saddle River, Nueva Jersey. 663 pp.

ANEXO 1

Tabla A1.1. Número de semillas de especies nativas del Pedregal de San Ángel colectadas en la temporada seca de 2008-2009 y dispersadas en área sujeta a restauración A8. Tomado de Ayala-López de Lara (2014).

Especie	Familia	Número
<i>Ageratum corymbosum</i>	Asteraceae	89,216
<i>Arracacia toluensis</i>	Apiaceae	12,402
<i>Baccharis sordescens</i>	Asteraceae	97,500
<i>Bouvardia ternifolia</i>	Rubiaceae	18,032
<i>Brickellia secundiflora</i>	Asteraceae	19,933
<i>Brickellia veronicifolia</i>	Asteraceae	22,554
<i>Cardiospermum halicacabum</i>	Sapindaceae	1,278
<i>Commelina coelestis</i>	Commelinaceae	2,700
<i>Dahlia coccinea</i>	Asteraceae	93,100
<i>Dioscorea galeotiana</i>	Dioscoreaceae	5,814
<i>Dodonea viscosa</i>	Sapindaceae	2,022
<i>Echeveria gibbiflora</i>	Crassulaceae	13,464
<i>Gaudichaudia cynanchoides</i>	Malpighiaceae	157
<i>Ipomoea purpurea</i>	Convolvulaceae	4,800
<i>Lantana velutina</i>	Verbenaceae	738
<i>Manfreda scabra</i>	Agavaceae	68,174
<i>Muhlenbergia robusta</i>	Poaceae	640,800
<i>Opuntia tomentosa</i>	Cactaceae	2,709
<i>Penstemon halicacabum</i>	Poaceae	2,136
<i>Piqueria trinervia</i>	Asteraceae	23,001
<i>Plumbago pulchella</i>	Plumbaginaceae	2,780
<i>Salvia mexicana</i>	Lamiaceae	4,800
<i>Salvia tiliifolia</i>	Lamiaceae	3,858
<i>Senna multiglandulosa</i>	Fabaceae	3,600
<i>Stevia ovata</i>	Asteraceae	7,337
<i>Stevia serrata</i>	Asteraceae	7,680
<i>Stevia</i> sp.	Asteraceae	23,100
<i>Tagetes lunulata</i>	Asteraceae	2,000
<i>Verbesina virgata</i>	Asteraceae	252,672
TOTAL		1,428,357

ANEXO 2

Acciones detalladas de restauración ecológica en A8 y A11 de la REPSA.

Las acciones detalladas de restauración ecológica llevadas a cabo en el sitio A8 son las siguientes:

1) En el 2005 Antonio-Garcés (2008) llevó a cabo un censo de los eucaliptos presentes registrando un total de 74 individuos. Posteriormente, removió 62 de ellos, también llevó a cabo siete jornadas de limpieza en las que retiró basura inorgánica y cascajo, en un área de 464 m² extrayendo 164.3 m³ de tierra, desechos de orgánicos de jardinería, cascajo y basura inorgánica (ver más detalles en Antonio-Garcés, 2008; Antonio-Garcés *et al.*, 2009).

2) En el 2006, Peña-Mendoza (2016) llevó a cabo un total de cuatro jornadas de restauración ecológica en las que retiró un total de 19.4 m³ de desechos inorgánicos, basura inorgánica y cascajo, además de introducir 584 plántulas de cuatro especies nativas. Las especies exóticas retiradas fueron *P. clandestinum*, *Eucalyptus* spp., y arvenses como *Mirabilis jalapa*.

3) En el 2009, Ayala-López de Lara (2014) realizó cuatro jornadas de restauración, en las cuales retiró residuos orgánicos de jardinería de sitios aledaños, retiró residuos inorgánicos conformados por escombros y basura de transeúntes, llevó a cabo un manejo de especies exóticas; *R. communis*, *Eucalyptus* spp. y *P. clandestinum*, retirando un total de 27.5 m³ de material consolidado, 7.75 m³ de residuos inorgánicos, 9.58 m³ de materia vegetal exótica y 5.36 m³ de escombros. Aunado a estas acciones, introdujo una máquina retroexcavadora para retirar material no consolidado (ver más detalles en Ayala-

López de Lara, 2014) con la que extrajo 174 m³ de material no consolidado y cascajo, con lo que logró llegar al nivel del sustrato basáltico en pequeñas áreas, las cuales también limpió en las jornadas. Además de esas acciones de restauración llevó a cabo una introducción de 1,428,357 semillas de 28 especies nativas provenientes de la Zona Núcleo de la REPSA, de la cual colectó durante la temporada de sequía de 2008-2009 y en junio de 2009 (ver Tabla A.1). Antes de la época de lluvia las esparció al voleo en la zona sujeta a restauración, utilizando cuatro cuadrados de 4 x 4 m en los que fueron adicionadas las semillas, además de introducir por trasplante seis encinos (*Quercus* sp.) con una altura promedio de 65 cm en la parte central del sitio. Sin embargo, las semillas que fueron esparcidas no llevaron tratamiento previo, lo cual podría representar un factor que dificultara la germinación como en el caso de las semillas de *Opuntia tomentosa*, la cual es una especie de cactácea que necesita un tratamiento especial para romper su latencia, simulando el paso por el tracto digestivo de vertebrados que la consumen, para ello pueden utilizarse diferentes métodos como el lavado de las semillas con ácidos que remueven los compuestos químicos encontrados en la testa de dichas semillas inhibiendo su germinación (Flores y Jurado, 2011).

4) En el 2010, Muñoz-Saavedra (2013) llevó a cabo cuatro jornadas de restauración en las cuales construyó tres nucleaciones de roca volcánica (ver más detalles Muñoz-Saavedra, 2013) el fin de facilitar conexiones en el paisaje que permitieran la creación de nuevos nichos para diversas especies, adicionando rocas basálticas de 10 y 25 cm³. Las nucleaciones tenían unas dimensiones de entre 1 y 1.5 m de largo y de 80 a 120 cm de ancho, con una altura de 50 cm.

Además de esto, retiró un total de 22.98 m³ de los cuales 3.3% eran desechos inorgánicos y 13.29% de tierra, como parte de los desechos orgánicos retiró también *P. clandestinum* (11.74 m³) y *E. camaldulensis* (7.44 m³).

Por otra parte, las acciones detalladas de restauración ecológica llevadas a cabo en el sitio A11 son las siguientes:

1) Del 2006 al 2007, Villeda-Hernández (2010) llevó a cabo cuatro jornadas de restauración ecológica, en las cuales se retiró material no consolidado, desechos inorgánicos y plantas exóticas como *P. clandestinum*, *R. communis* y *E. camaldulensis*, retirando un total de 13.8 m³ de material.

2) Entre el 2008 y 2009, E. Valdez del Ángel (en prep.) llevó a cabo seis jornadas de restauración en las que extrajo plantas exóticas como *P. clandestinum*, *E. camaldulensis*, *E. globulus*, *R. communis*, *Nicotiana glauca* y *Tropaeolum majus*, además de extraer especies arvenses como *Wigandia urens* y *Phytolacca iccosandra*. Además de extraer sedimentos no consolidados y desechos inorgánicos, y limpieza del sustrato basáltico original de los bordes del sitio y reacomodo de rocas basálticas del interior, extrayendo un total de 273.1 m³.

3) Entre el 2009 y el 2010, González-Rebeles Guerrero (2012) organizó cinco jornadas de restauración ecológica, en las que recuperó sustrato basáltico de los bordes del área, llevó a cabo remoción y manejo de eucaliptos, removió otras plantas exóticas como *Tropaeolum majus* y *Ricinus communis* y extrajo tierra, escombros y desechos inorgánicos, sacando un total de 97.7 m³.

ANEXO 3

Descripción de los parches de sustrato basáltico recuperado en los sitios sujetos a restauración estudiados en esta tesis.

Sitios localizados en A8 (Fig. A 2.1).



Figura A2.5. En la siguiente figura se muestra la localización de los parches de sustrato basáltico recuperados en el sitio A8. E1= Erandi 1, E2= Erandi 2, M= María, D= Dinosaurio.

- 1) Erandi 1: se encuentra en el norte del sitio (Fig. A2.2), en un lugar donde hay presencia de luz moderadamente, ya que fuera de él hay unos arbustos de *Eupatorium petiolare* que le dan un poco de sombra al parche en los bordes. Mide 6.10×5.59 m y tiene un área de 107.12 m².



Figura A2.2. Aspecto del parche de sustrato basáltico recuperado Erandi 1 en diciembre 2016. Foto: Surya González.

- 2) Erandi 2: se encuentra al sur del sitio (Fig. A2.3), es un sitio abierto, donde la luz llega a todo el parche, se encuentra rodeado por *Pennisetum clandestinum*. Mide 3.20 x 2.70 m y tiene un área de 27.14 m².



Figura A2.3. Aspecto del parche de sustrato basáltico recuperado Erandi 2 en diciembre 2016. Foto: Surya González.

- 3) María: también se encuentra al sur en A8 (Fig. A2.4), es un sitio que se encuentra aproximadamente dos metros debajo de la avenida dentro de A8, el cual está cubierto casi completamente por árboles de gran tamaño

como *Schinus molle*, *Buddleia cordata* y arbustos como *Eupatorium* sp., que le dan sombra a todo el sitio. En él aún se encuentran desechos de basura. Mide 4.80 × 3.50 m y tiene un área de 52.77 m².



Figura A2.4. Aspecto del parche de sustrato basáltico recuperado María en diciembre 2016. Foto: Surya González.

4) Dinosaurio: se encuentra al sureste de A8 (Fig. A2.5) este sitio tiene un efecto de sombra por árboles de *Buddleia cordata* y arbustos de *Eupatorium* sp. Como el sitio María debido a su cercanía con el borde, también ha estado sujeto a disturbios como presencia de basura y destrucción de las plantas presentes en él por las personas que entran a éste. Mide 11.50 × 11.20 m y tiene un área de 404.63 m².



Figura A2.5. Aspecto del parche de sustrato basáltico recuperado Dinosaurio en diciembre 2016. Foto: Surya González.

Parches de sustrato basáltico recuperado en A11 (Fig. A2.6).

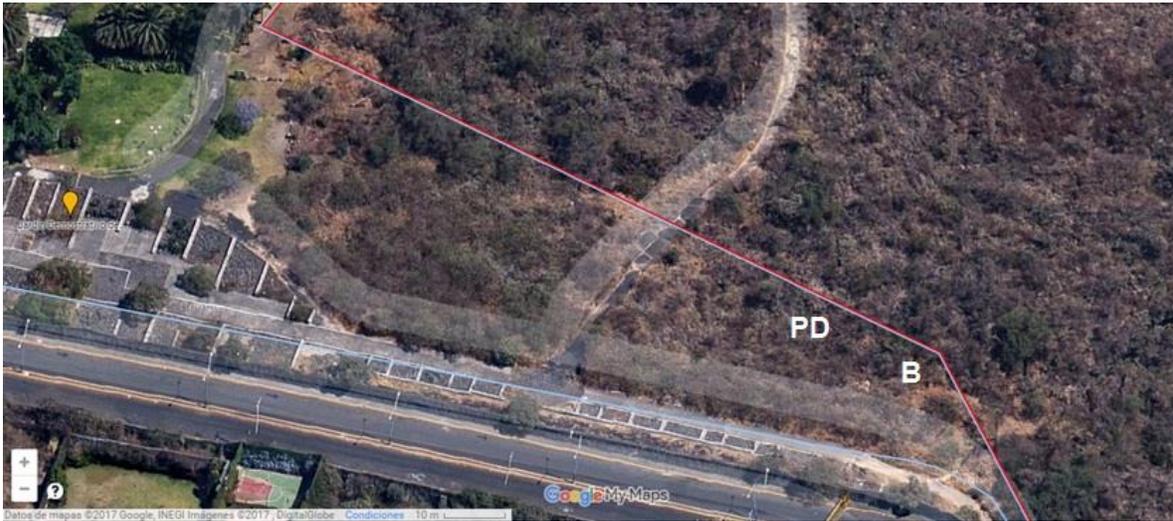


Figura A2.6. Localización de los parches de sustrato basáltico recuperados en el sitio A11. PD= Palo Dulce, B= Borde.

5) Borde. Se encuentra en el suroeste de la porción este de A11 (Fig. A2.7). Es un sitio con sombra en la mayor parte debido a especies arbóreas como *Buddleia cordata*, *Bursera cuneata* que cubren la luz, se encuentra al borde de la Zona Núcleo, sin embargo, en sus bordes tiene presencia de *Pennisetum clandestinum*. Mide 5.30×3.10 m y tiene un área de 51.61 m^2 .



Figura A2.7. Aspecto del parche de sustrato basáltico recuperado Borde en diciembre 2016. Foto: Surya González.

- 6) Palo Dulce. Se encuentra en al sureste de la porción este de A11 (Fig. A2.8). Es un sitio abierto que no tiene mucha sombra de especies externas, solamente en los bordes por arbustos de *Archibaccharis serratifolia*. Mide 7.50 x 4.61 m y tiene un área de 108.62 m².



Figura A2.8. Aspecto del parche de sustrato basáltico recuperado Palo Dulce en diciembre 2016. Foto: Surya González.

ANEXO 4

Tabla A4.1. Lista de especies en dos sitios sujetos a restauración A8 y A11 y una Zona Conservada de Referencia, ZCR de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. Cd. Mx. NA= nativa arvense, NnA= nativa no arvense, E= exótica, S= sin identificar. Datos de visitas y muestreos realizados mensualmente de septiembre 2014 a septiembre 2015.

Especie	Familia	Tipo de planta	A8	A11	ZCR
<i>Adiantum</i> sp.	Adiantaceae	NnA			*
<i>Aegopogon tenellus</i>	Poaceae	NnA	*		
<i>Agave salmiana</i>	Agavaceae	NnA			*
<i>Archibaccharis serratifolia</i>	Asteraceae	NA	*	*	*
<i>Arracacia toluensis</i>	Apiaceae	NA	*	*	*
<i>Asplenium praemorsum</i>	Aspleaniaceae	NnA			*
<i>Baccharis pteronioides</i>	Asteraceae	NnA	*		*
<i>Baccharis sordescens</i>	Asteraceae	NnA			*
<i>Begonia gracilis</i>	Begoniaceae	NnA			*
<i>Bidens ostruthioides</i>	Asteraceae	NnA		*	
<i>Bidens pilosa</i>	Asteraceae	NA	*		
<i>Bidens serrulata</i>	Asteraceae	NA	*	*	*
<i>Bouvardia ternifolia</i>	Rubiaceae	NnA			*
<i>Brickellia</i> sp.	Asteraceae	NA			*
<i>Bromus carinatus</i>	Poaceae	NA	*		
<i>Buddleia cordata</i>	Loganiaceae	NnA	*	*	*
<i>Buddleia parviflora</i>	Loganiaceae	NnA		*	
<i>Buddleia sessiliflora</i>	Loganiaceae	NA	*	*	
<i>Bursera cuneata</i>	Burseraceae	NnA		*	*
<i>Calliandra grandiflora</i>	Mimosaceae	NnA		*	
<i>Cardiospermum halicacabum</i>	Sapindaceae	NA	*		
<i>Cheilanthes bonariensis</i>	Pteridaceae	NnA	*		*
<i>Cheilanthes kaulfussii</i>	Pteridaceae	NnA			*
<i>Cheilanthes lendigera</i>	Pteridaceae	NnA		*	
<i>Cheilanthes myriophylla</i>	Pteridaceae	NnA	*	*	*
<i>Cissus sicyoides</i>	Vitaceae	NnA	*	*	*
<i>Cladocolea loniceroides</i>	Loranthaceae	NA		*	*
<i>Commelina coelestis</i>	Commelinaceae	NA	*	*	*

Especie	Familia	Tipo de planta	A8	A11	ZCR
<i>Commelina diffusa</i>	Commelinaceae	NA		*	*
<i>Commelina tuberosa</i>	Commelinaceae	NA		*	
<i>Conyza coronopifolia</i>	Asteraceae	NA	*		
<i>Conyza sophiifolia</i>	Asteraceae	NnA	*		
<i>Crusea longiflora</i>	Rubiaceae	NnA		*	
<i>Cupressus lusitanica</i>	Cupressaceae	NA	*	*	
<i>Cyperus manimae</i>	Cyperaceae	NnA	*		
<i>Cyperus seslerioides</i>	Cyperaceae	NA	*		
<i>Dahlia coccinea</i>	Asteraceae	NnA	*	*	*
<i>Dalea foliolosa</i>	Fabaceae	NA		*	*
<i>Dicliptera peduncularis</i>	Acanthaceae	NA	*	*	*
<i>Dioscorea galeottiana</i>	Dioscoraceae	NnA	*	*	*
<i>Dodonaea viscosa</i>	Sapindaceae	NnA	*		*
<i>Drymaria laxiflora</i>	Caryophyllaceae	NnA	*		
<i>Echeveria gibbiflora</i>	Crassulaceae	NnA	*	*	*
<i>Eragrostis mexicana</i>	Poaceae	NA	*		
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Myrtaceae	E	*	*	*
<i>Eupatorium deltoideum</i>	Asteraceae	NA		*	
<i>Eupatorium glandulosum</i>	Asteraceae	NnA	*	*	*
<i>Eupatorium petiolare</i>	Asteraceae	NnA	*	*	*
<i>Eupatorium sp.</i>	Asteraceae	NnA	*	*	*
<i>Euphorbia indivisa</i>	Euphorbiaceae	NnA			*
<i>Evolvulus alsinoides</i>	Convolvulaceae	NnA		*	
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	Fabaceae	NnA	*	*	*
<i>Florestina pedata</i>	Asteraceae	NA	*		
<i>Fraxinus uhdei</i>	Oleaceae	NnA	*	*	*
<i>Gaudichaudia cynanchoides</i>	Malpighiaceae	NnA			*
<i>Gaudichaudia mucronata</i>	Malpighiaceae	NnA		*	
<i>Geranium seemannii</i>	Geraniaceae	NA	*	*	*
<i>Gnaphalium americanum</i>	Asteraceae	NnA		*	
<i>Gnaphalium canescens</i>	Asteraceae	NnA	*		*
<i>Gnaphalium chartaceum</i>	Asteraceae	NnA		*	
<i>Gnaphalium falcatum</i>	Asteraceae	NnA		*	
<i>Gnaphalium oxyphyllum</i>	Asteraceae	NA	*		
<i>Heliconia sp.</i>	Heliconiaceae	E	*		

Especie	Familia	Tipo de planta	A8	A11	ZCR
<i>Impatiens walleriana</i>	Balsaminaceae	E		*	
<i>Ipomoea purpurea</i>	Convolvulaceae	NA			*
<i>Ipomoea trifida</i>	Convolvulaceae	NnA			*
<i>Iresine cassiniiformis</i>	Amaranthaceae	NnA		*	*
<i>Iresine diffusa</i>	Amaranthaceae	NnA	*	*	
<i>Lantana velutina</i>	Verbenaceae	NA		*	*
<i>Leonotis nepetifolia</i>	Lamiaceae	E	*	*	
<i>Lepechinia caulescens</i>	Lamiaceae	NnA	*		
<i>Lepidium virginicum</i>	Brassicaceae	NA	*		
<i>Loeselia mexicana</i>	Polemoniaceae	NA	*		*
<i>Malva parviflora</i>	Malvaceae	E	*	*	
<i>Malvastrum sp.</i>	Malvaceae	NA	*		
<i>Mammillaria magnimamma</i>	Cactaceae	NnA			*
<i>Manfreda scabra</i>	Agavaceae	NnA		*	*
<i>Melilotus indica</i>	Fabaceae	E		*	
<i>Metastelma angustifolium</i>	Asclepiadaceae	NnA	*		*
<i>Milla biflora</i>	Alliaceae	NA	*		
<i>Mimosa aculeaticarpa</i>	Mimosaceae	NnA		*	
<i>Mirabilis jalapa</i>	Nyctaginaceae	NA	*	*	
<i>Monstera deliciosa</i>	Araceae	NnA			*
<i>Montanoa tomentosa</i>	Asteraceae	NnA	*	*	*
<i>Muhlenbergia robusta</i>	Poaceae	NnA	*	*	*
<i>Nicotiana glauca</i>	Solanaceae	E	*		
<i>Oenothera rosea</i>	Onagraceae	NA	*		
<i>Opuntia tomentosa</i>	Cactaceae	NnA	*	*	*
<i>Oxalis corniculata</i>	Oxalidaceae	NA	*	*	*
<i>Paspalum prostratum</i>	Poaceae	NA	*		
<i>Passiflora subpeltata</i>	Passifloraceae	NnA	*	*	*
<i>Pellaea cordifolia</i>	Pteridaceae	NnA			*
<i>Pellaea ternifolia</i>	Pteridaceae	NnA	*		
<i>Pennisetum clandestinum</i>	Poaceae	E	*	*	*
<i>Pennisetum villosum</i>	Poaceae	E	*		
<i>Phaseolus pedicellatus</i>	Fabaceae	NnA	*		
<i>Phaseolus sp.</i>	Fabaceae	NnA	*	*	
<i>Phlebodium areolatum</i>	Polypodiaceae	NnA	*	*	*

Especie	Familia	Tipo de planta	A8	A11	ZCR
<i>Phoradendron brachystachyum</i>	Viscaceae	NnA	*	*	*
<i>Physalis chenopodifolia</i>	Solanaceae	NA	*	*	*
<i>Phytolacca icosandra</i>	Phytolaccaceae	NA	*	*	
<i>Picris echioides</i>	Asteraceae	E	*		
<i>Piqueria trinervia</i>	Asteraceae	NnA	*		
<i>Pittocaulon praecox</i>	Asteraceae	NnA	*	*	*
<i>Plumbago pulchella</i>	Plumbaginaceae	NnA	*	*	*
<i>Polypodium polypodioides</i>	Polypodiaceae	NnA			*
<i>Polypodium thyssanolepis</i>	Polypodiaceae	NnA			*
<i>Pyracantha coccinea</i>	Rosaceae	E		*	
<i>Quamoclit gracilis</i>	Convolvulaceae	NA	*		
<i>Quercus deserticola</i>	Fagaceae	NnA			*
<i>Reseda luteola</i>	Resedaceae	E	*		
<i>Rhynchelytrum repens</i>	Poaceae	E	*	*	
<i>Ricinus communis</i>	Euphorbiaceae	E	*	*	
<i>Rubus liebmannii</i>	Rosaceae	NnA			*
<i>Salvia mexicana</i>	Lamiaceae	NnA	*		*
<i>Salvia tiliifolia</i>	Lamiaceae	NA	*	*	
<i>Schinus molle</i>	Anacardiaceae	E	*	*	*
<i>Sedum sp.</i>	Crassulaceae	NnA		*	*
<i>Selaginella lepidophylla</i>	Sellagineaceae	NnA	*	*	*
<i>Senna multiglandulosa</i>	Fabaceae	NnA	*	*	
<i>Sicyos deppei</i>	Curcubitaceae	NA	*	*	
<i>Sida rhombifolia</i>	Malvaceae	NA	*		
<i>Solanum nigrescens</i>	Solanaceae	NA	*	*	
<i>Solanum sp.</i>	Solanaceae	NA	*		*
<i>Sporobolus atrovirens</i>	Poaceae	NnA	*		
<i>Sporobolus indicus</i>	Poaceae	NA	*		
<i>Stevia organoides</i>	Asteraceae	NnA		*	
<i>Stevia ovata</i>	Asteraceae	NnA		*	*
<i>Stevia serrata</i>	Asteraceae	NA		*	
<i>Stevia sp.</i>	Asteraceae	NA			*
<i>Stevia subpubescens</i>	Asteraceae	NnA	*		
<i>Tagetes lunulata</i>	Asteraceae	NA	*	*	*
<i>Tillandsia recurvata</i>	Bromeliaceae	NnA			*

Especie	Familia	Tipo de planta	A8	A11	ZCR
<i>Tithonia tubiformis</i>	Asteraceae	NA		*	
<i>Tropaeolum majus</i>	Tropaeolaceae	E	*	*	
<i>Verbena carolina</i>	Verbenaceae	NA	*		
<i>Verbesina virgata</i>	Asteraceae	NnA	*	*	
<i>Viguiera buddleiiformis</i>	Asteraceae	NnA	*		
<i>Wigandia urens</i>	Hydrophyllaceae	NA	*	*	*
<i>Zinnia peruviana</i>	Asteraceae	NA	*		
Sp. 0	Asteraceae	S	*		
Sp. 16		S	*		
Sp. 46	Poaceae	S	*		
Sp. 55		S		*	*
Sp. 72		S		*	
Sp. 73		S		*	
Sp. 77		S		*	
Sp. 85		S			*
Sp. 89		S			*
Sp. 94		S			*
Sp. 100		S			*
Sp. 102		S			*
Sp.102 (b)		S			*
Sp.108		S			*
Sp. pasto 2	Poaceae	S	*		
Riqueza			95	81	79
Exóticas			13	11	3
Nativas arvenses			37	25	19
Nativas no arvenses			41	41	49
Sin identificar			4	4	8

Tabla A4.2. Lista de especies enraizadas dentro de los parches de sustrato basáltico recuperado en las zonas sujetas a restauración A8 y A11 en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. NA= nativa arvense, NnA= nativa no arvense, E= exótica. Datos septiembre 2014 a septiembre 2015.

Espece	Familia	Tipo de planta	Erandi 1 A8	Erandi 2 A8	María A8	Dinosaurio A8	Palo Dulce A11	Borde A11
<i>Aegopogon tenellus</i>	Poaceae	NnA		*				
<i>Archibaccharis serratifolia</i>	Asteraceae	NA			*	*		*
<i>Bidens serrulata</i>	Asteraceae	NA	*				*	
<i>Buddleia cordata</i>	Loganiaceae	NnA	*	*	*	*	*	
<i>Cheilanthes bonariensis</i>	Pteridaceae	NnA	*	*		*	*	*
<i>Cheilanthes lendigera</i>	Pteridaceae	NnA					*	
<i>Cheilanthes myriophylla</i>	Pteridaceae	NnA		*		*		
<i>Cissus sicyoides</i>	Vitaceae	NnA	*		*	*	*	*
<i>Commelina coelestis</i>	Commelinaceae	NA				*	*	*
<i>Commelina diffusa</i>	Commelinaceae	NA	*					
<i>Commelina tuberosa</i>	Commelinaceae	NA					*	
<i>Conyza coronopifolia</i>	Asteraceae	NA	*					
<i>Conyza sophiifolia</i>	Asteraceae	NnA	*	*				
<i>Crusea longiflora</i>	Rubiaceae	NnA					*	*
<i>Cyperus manimae</i>	Cyperaceae	NnA		*				
<i>Dahlia coccinea</i>	Asteraceae	NnA					*	*
<i>Dicliptera peduncularis</i>	Acanthaceae	NA	*	*		*	*	*
<i>Dioscorea galeottiana</i>	Dioscoraceae	NnA	*		*	*		
<i>Drymaria laxiflora</i>	Caryophyllaceae	NnA		*				
<i>Echeveria gibbiflora</i>	Crassulaceae	NnA		*			*	*
<i>Eupatorium glandulosum</i>	Asteraceae	NnA		*		*		
<i>Eupatorium petiolare</i>	Asteraceae	NnA	*	*	*	*	*	*
<i>Eupatorium sp.</i>	Asteraceae	NnA	*		*	*		
<i>Evolvulus alsinoides</i>	Convolvulaceae	NnA					*	
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	Fabaceae	NnA					*	
<i>Florestina pedata</i>	Asteraceae	NA		*				
<i>Fraxinus uhdei</i>	Oleaceae	NnA	*		*			
<i>Geranium seemannii</i>	Geraniaceae	NA		*		*		
<i>Gnaphalium americanum</i>	Asteraceae	NnA						*
<i>Gnaphalium canescens</i>	Asteraceae	NnA	*					*

Espece	Familia	Tipo de planta	Erandi 1 A8	Erandi 2 A8	María A8	Dinosaurio A8	Palo Dulce A11	Borde A11
<i>Gnaphalium chartaceum</i>	Asteraceae	NnA					*	
<i>Gnaphalium falcatum</i>	Asteraceae	NnA					*	
<i>Gnaphalium oxyphyllum</i>	Asteraceae	NA		*				
<i>Ipomoea purpurea</i>	Convolvulaceae	NA			*			*
<i>Iresine diffusa</i>	Amaranthaceae	NnA			*	*		
<i>Lepechinia caulescens</i>	Lamiaceae	NnA		*				
<i>Loeselia mexicana</i>	Polemoniaceae	NA	*					
<i>Montanoa tomentosa</i>	Asteraceae	NnA	*		*	*		
<i>Muhlenbergia robusta</i>	Poaceae	NnA					*	*
<i>Opuntia tomentosa</i>	Cactaceae	NnA	*	*	*	*	*	*
<i>Oxalis corniculata</i>	Oxalidaceae	NA		*				
<i>Passiflora subpeltata</i>	Passifloraceae	NnA	*				*	
<i>Pellaea ternifolia</i>	Pteridaceae	NnA		*				
<i>Phaseolus pedicellatus</i>	Fabaceae	NnA		*				
<i>Plumbago pulchella</i>	Plumbaginaceae	NnA	*	*		*		*
<i>Rhynchelytrum repens</i>	Poaceae	E					*	
<i>Salvia mexicana</i>	Lamiaceae	NnA	*					
<i>Salvia tiliifolia</i>	Lamiaceae	NA					*	
<i>Schinus molle</i>	Anacardiaceae	E	*					
<i>Selaginella lepidophylla</i>	Sellagineaceae	NnA					*	
<i>Senna multiglandulosa</i>	Fabaceae	NnA			*			
<i>Stevia organoides</i>	Asteraceae	NnA					*	
<i>Stevia ovata</i>	Asteraceae	NnA					*	
<i>Stevia serrata</i>	Asteraceae	NA		*				
<i>Tagetes lunulata</i>	Asteraceae	NA	*					
<i>Tillandsia recurvata</i>	Bromeliaceae	NnA						*
<i>Verbena carolina</i>	Verbenaceae	NA		*				
<i>Verbesina virgata</i>	Asteraceae	NnA	*	*			*	*
<i>Viguiera buddleiiformis</i>	Asteraceae	NnA		*				
<i>Wigandia urens</i>	Hydrophyllaceae	NA	*	*			*	*
Riqueza			23	25	12	16	26	18
Exóticas			1	0	0	0	1	0
Nativas arvenses			7	8	2	4	6	5
Nativas no arvenses			15	17	10	12	19	13

Tabla A4.3. Lista de especies enraizadas fuera de los parches de sustrato basáltico recuperado en las zonas sujetas a restauración A8 y A11 en la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel. NA= nativa arvensis, NnA= nativa no arvensis, E= exótica. Datos septiembre 2014 a septiembre 2015.

Especie	Familia	NA, NnA, E	Erandi1 A8	Erandi2 A8	María A8	Dinosaurio A8	Palo Dulce A11	Borde A11
<i>Archibaccharis serratifolia</i>	Asteraceae	NA					*	
<i>Arracacia toluensis</i>	Apiaceae	NA						*
<i>Buddleia cordata</i>	Loganiaceae	NnA			*	*	*	*
<i>Bursera cuneata</i>	Burseraceae	NnA						*
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Myrtaceae	E					*	
<i>Eupatorium glandulosum</i>	Asteraceae	NnA	*					
<i>Eupatorium petiolare</i>	Asteraceae	NnA	*					*
<i>Eupatorium</i> sp.	Asteraceae	NnA			*	*		
<i>Pennisetum clandestinum</i>	Poaceae	E	*	*				*
<i>Phytolacca icosandra</i>	Phytolaccaceae	NA	*					
<i>Schinus molle</i>	Anacardiaceae	E			*			
Riqueza			4	1	3	2	3	5
Exóticas			1	1	1	0	1	1
Nativa arvensis			1	0	0	0	1	1
Nativa no arvensis			2	0	2	2	1	3