

# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

## Caracterización de la fenología reproductiva en un ensayo de progenies de *Pinus greggii* var. *australis*

DANIEL DE GUADALUPE RUIZ FARFÁN

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2014

La presente tesis titulada: "**Caracterización de la fenología reproductiva en un ensayo de progenies de *Pinus greggii* var. *australis***", realizada por el alumno: **Daniel de Guadalupe Ruiz Farfán**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS  
EN CIENCIAS FORESTALES**

**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO

Dr. Javier López Upton

ASESOR

Dr. Carlos Ramírez Herrera

ASESOR

Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Agosto de 2014

# CARACTERIZACIÓN DE LA FENOLOGÍA REPRODUCTIVA EN UN ENSAYO DE PROGENIES DE *Pinus greggii* var. *australis*

Daniel de Guadalupe Ruiz Farfán, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2014

## RESUMEN GENERAL

Los huertos semilleros deben proveer semilla de calidad genética superior, con producción a edad temprana, suficiente y en intervalos regulares. Se evalúa el desarrollo, la sincronía y la variación temporal de la fenología floral de un ensayo de progenies de *Pinus greggii* var. *australis* establecido en dos sitios ubicados en Cuauhtepc, Hidalgo y Terrenate, Tlaxcala, que se convierten en huertos semilleros sexuales. Se monitorearon 23 familias de medios hermanos de cinco procedencias durante dos años consecutivos, con al menos cuatro árboles por familia por sitio. En 2012 se realizó una evaluación preliminar, con observaciones cada dos semanas entre marzo y junio de la copa del árbol completa. Durante 2013 se dio seguimiento a 24 brotes seleccionados por árbol, considerando los niveles de copa completa, estrato de copa y orientación de rama, dos veces por semana entre febrero y junio. Las etapas de desarrollo de estróbilos se identificaron y registraron, y se determinaron las fechas de inicio y término de floración femenina y masculina, así como su duración. La sincronización de los periodos de floración a nivel sitio ( $PO_0$ ) fue de 0.31 en Terrenate en 2012 y de 0.34 en Cuauhtepc en 2013, niveles normales considerando el origen sexual del ensayo; sin embargo, en Cuauhtepc durante 2012 fue considerablemente alta (0.57). Todas las familias presentaron algún grado de sincronización entre sí, excepto en Terrenate. Se detectaron diferencias significativas entre Cuauhtepc (más precoz y con mayor duración) y Terrenate en 2012. Únicamente se detectó variación significativa entre familias en Terrenate para la mayoría de variables, y en general se observó gran variación dentro de familias. Se observaron diferencias significativas entre estratos pero no entre orientaciones para dispersión de polen. Se determinó que la nula producción de estructuras reproductivas en Terrenate en 2013 se debe a las condiciones ambientales mayormente limitativas del sitio en ese año. El control genético fue moderado y bajo en varias variables de la fenología floral.

**Palabras clave:** *Pinus greggii* var. *australis*, fenología floral, huerto semillero, receptividad, dispersión de polen, sincronización.

# CHARACTERIZATION OF THE REPRODUCTIVE PHENOLOGY IN A PROGENY TEST OF *Pinus greggii* var. *australis*

Daniel de Guadalupe Ruiz Farfán, M.C.  
Colegio de Postgraduados, 2014

## GENERAL SUMMARY

Seed orchards should provide seed of superior genetic quality, at early age, in sufficient amounts at regular intervals. Development, synchrony and temporal variation in floral phenology is evaluated in a progeny test of *Pinus greggii* var. *australis* set at two sites in Cuauhtepc, Hidalgo and Terrenate, Tlaxcala. This tests are converting in a sexual seed orchard. Twenty-three half-sib families, with at least four trees per family per site, from five provenances were monitored for two consecutive years. In 2012 a preliminary evaluation was conducted on the whole tree crown with observations every two weeks between March and June. Between February and June of 2013 observation were conducted twice a week on 24 selected buds per tree, considering full crown, crown layers and branch orientation. Stages of development of strobili were identified and recorded, and the start and end dates of male and female flowering and its duration were determined. Synchronization of flowering periods at level site (PO<sub>0</sub>) was 0.31 in Terrenate in 2012 and 0.34 in Cuauhtepc in 2013, normal levels considering the sexual origin of the test; however, in Cuauhtepc during 2012 was considerably high (0.57). All families showed some degree of synchronization with each other, except in Terrenate. Significant differences between Cuauhtepc (earlier and longer) and Terrenate were detected in 2012. Only significant variation between families was detected in Terrenate for most variables, and generally large variation was observed within families. Significant differences between layers but not for orientation in pollen dispersion were observed. The absence of reproductive structures in Terrenate in 2013 may be due to limiting environmental conditions of this site in that year. The genetic control was moderate to low in several of the floral phenology variables.

**Keywords:** *Pinus greggii* var. *australis*, floral phenology, seed orchard, receptivity, pollen shedding, synchronization.

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios** y a la **Virgen de Guadalupe**. En quienes creo y quienes son mi fortaleza.

Al **Colegio de Postgraduados**. Institución que me dio la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado. Al personal académico y secretarial que forman parte del **Posgrado en Ciencias Forestales** y que participaron en mi formación.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**. Fuente del financiamiento para mi sustento y mis estudios de maestría.

Al **Dr. Javier López Upton**. Gran persona, profesor e investigador. Por su amistad. Por el apoyo, dirección y la gestión de recursos económicos y materiales para el desarrollo de este trabajo. Por su colaboración en la dirección, culminación y revisión de esta tesis.

Al **Dr. Carlos Ramírez Herrera**. Gran persona, profesor e investigador. Por el apoyo en el diseño, los preparativos, culminación y revisión de este trabajo. Por su valiosa amistad.

Al **Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo**. Gran persona, profesor e investigador. Por la amistad y su valiosa colaboración en el desarrollo, culminación y revisión de este trabajo.

Al **Dr. J. Jesús Vargas Hernández**. Gran persona, profesor e investigador, quien me apoyó siempre con sugerencias para este trabajo y resolviendo dudas.

A la **Ing. Sandra de Guadalupe Ruiz Farfán**. Por el gran apoyo para la conclusión de este trabajo.

A **Moisés Orlando Rivera Rodríguez, Procoro Gómez Martínez, José Luis García Pérez, Juan Carlos Cuevas Cruz, Erickson Basave Villalobos, Yesenia Gutiérrez Cuevas, Carolina López Baca, Omar Hernández Zaragoza, Alberto de Guadalupe Farfán Jiménez y Oscar G. Vázquez Cuecuecha**. Compañeros y amigos incondicionales, quienes de una u otra forma me apoyaron en los preparativos y el desarrollo de este trabajo.

Al **Fondo CONAFOR-CONACYT 148425** por el financiamiento dentro del proyecto “Establecimiento de huertos semilleros con material genéticamente superior de *Pinus patula* y *P. greggii*”. A **Margarito Cruz Castillo** por el apoyo y facilidades proporcionados. A todos los compañeros de generación y amigos del Colegio.

## DEDICATORIA

A mis Padres,

*Adolfo Ruiz Carmona y Ma. Otilia de Guadalupe Farfán Vizquez*

Ustedes son ejemplo de vida para mí, por su honestidad, su responsabilidad, su alegría, su sacrificio y su determinación inquebrantable para educar y sacar adelante a esta gran familia. Gracias por el cariño, los consejos y el apoyo incondicionales para conmigo, por nunca dejarme solo. Los quiero infinitamente.

A mis Hermanos,

*Rafael, Sandra, Luis, Miriam, Diana y Fernando*

De quienes solo he recibido cariño y apoyo a lo largo de mi vida. Con quienes he compartido un sin número de aventuras y momentos de alegría. A quienes admiro y quiero. Por animarme a seguir siempre adelante. Gracias a todos.

A mi gran amiga,

*Alicia Arteaga García*

A quien admiro, estimo y le profeso infinita y sincera gratitud. La persona que desde el día que se cruzó en mi camino ha estado siempre presente y me ha apoyado, sin tener ninguna obligación, sin esperar nada a cambio. A ti y a tu familia, simplemente gracias.

A todos mis familiares y amigos, a quienes por ser tan numerosos me es imposible nombrar aquí, pero que estimo y que han estado presentes en distintos momentos de mi vida. Quiero hacer mención especial de la familia *Farfán Jiménez*, tíos y primos quienes vieron por mí por más de siete años. Gracias al invaluable apoyo que me brindaron durante mi estancia en Chapingo he podido llegar a este momento.

A todos y cada uno, gracias por formar parte de este pequeño gran logro.

## CONTENIDO

|  |      |
|--|------|
| <b>RESUMEN GENERAL</b> .....   | ii   |
| <b>GENERAL SUMMARY</b> .....   | iii  |
| <b>AGRADECIMIENTOS</b> .....   | iv   |
| <b>DEDICATORIA</b> .....   | v    |
| <b>LISTA DE CUADROS</b> .....  | vii  |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....  | viii |
| <b>CAPITULO I - INTRODUCCIÓN GENERAL</b> .....   | 1    |
| 1.1. Distribución e importancia <i>Pinus greggii var. australis</i> .....  | 1    |
| 1.2. Principios e importancia del mejoramiento genético forestal .....   | 4    |
| 1.3. El papel de la fenología reproductiva en el mejoramiento genético forestal .....  | 6    |
| <b>CAPITULO II - CARACTERIZACIÓN DE LA FENOLOGÍA REPRODUCTIVA<br/>EN FAMILIAS DE MEDIOS HERMANOS DE <i>Pinus greggii</i> VAR. <i>australis</i></b> ..... | 8    |
| 2.1. RESUMEN .....   | 8    |
| 2.2. SUMMARY.....  | 9    |
| 2.3. INTRODUCCIÓN .....  | 10   |
| 2.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....  | 13   |
| 2.4.1. Material genético.....  | 13   |
| 2.4.2. Monitoreo y caracterización de la fenología de estructuras reproductivas .....  | 15   |
| 2.4.3. Condiciones climáticas.....   | 19   |
| 2.4.4. Evaluación de sincronía fenológica.....   | 21   |
| 2.4.5. Evaluación estadística .....  | 23   |
| 2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....  | 26   |
| 2.5.1. Caracterización de la fenología reproductiva a nivel sitio .....  | 27   |
| 2.5.2. Sincronización fenológica a nivel sitio .....   | 32   |
| 2.5.3. Sincronización fenológica a nivel familia .....   | 36   |
| 2.5.4. Sincronización fenológica en grupos de familias de interés .....  | 43   |
| 2.5.5. Variación y control genético de variables fenológicas reproductivas de tiempo .....   | 48   |
| 2.6. CONCLUSIONES .....  | 56   |
| <b>III - LITERATURA CITADA</b> .....   | 58   |

## LISTA DE CUADROS

|  |    |
|--|----|
| <b>Cuadro 2.1.</b> Comparación del número de individuos seleccionados contra individuos productivos de las familias de medios hermanos de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> evaluadas. .... | 26 |
| <b>Cuadro 2.2.</b> Inicio, término y duración promedio de las etapas de desarrollo fenológico de estructuras reproductivas en familias de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> por ciclo.....  | 27 |
| <b>Cuadro 2.3.</b> Índice de sincronización fenológica PO promedio a nivel de familias de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> .....   | 40 |
| <b>Cuadro 2.4.</b> Índices $R_d$ y de correlación fenológica $r_{ph}$ a nivel de familia en <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> . ....  | 42 |
| <b>Cuadro 2.5.</b> Índice $PO_{ij}$ para cada par de familias de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> por grupos de interés, Cuauhtepic 2012.....  | 45 |
| <b>Cuadro 2.6.</b> Índice $PO_{ij}$ para cada par de familias de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> por grupos de interés, Cuauhtepic 2013.....  | 46 |
| <b>Cuadro 2.7.</b> Índice $PO_{ij}$ para cada par de familias de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> por grupos de interés, Terrenate 2012. ....  | 47 |
| <b>Cuadro 2.8.</b> Prueba de significancia para variables fenológicas de tiempo de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> , años 2012 y 2013.....  | 48 |
| <b>Cuadro 2.9.</b> Medias ajustadas y errores estándar de variables fenológicas femeninas para grupos de procedencias de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> plantadas en Terrenate 2012..... | 53 |
| <b>Cuadro 2.10.</b> Heredabilidad ( $h^2_i$ ) de variables fenológicas de tiempo para <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> , años 2012 y 2013.....   | 54 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.1.</b> Distribución natural de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> . .....  | 2  |
| <b>Figura 2.1.</b> Localización geográfica de los dos sitios del ensayo de progenies de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> con evaluación de la fenología floral. ....                           | 13 |
| <b>Figura 2.2.</b> Localización geográfica de las procedencias de las familias de medios hermanos de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> seleccionadas en el estudio de la fenología floral. .... | 14 |
| <b>Figura 2.3.</b> Etapas del desarrollo fenológico de estróbilos femeninos de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> . ....   | 17 |
| <b>Figura 2.4.</b> Etapas del desarrollo fenológico de estróbilos masculinos de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> . ....  | 18 |
| <b>Figura 2.5.</b> Normales climatológicas para el sitio Cuatepec 2010-2013. ....  | 19 |
| <b>Figura 2.6.</b> Normales climatológicas para el sitio Terrenate 2010-2013. ....   | 20 |
| <b>Figura 2.7.</b> Registro del desarrollo fenológico de estróbilos femeninos de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> , en Cuatepec 2013. ....   | 30 |
| <b>Figura 2.8.</b> Registro del desarrollo fenológico de estróbilos masculinos de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> , en Cuatepec 2013. ....  | 31 |
| <b>Figura 2.9.</b> Traslape fenológico general para <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> en Cuatepec ( $S_1$ ) en 2012 y 2013. ....  | 33 |
| <b>Figura 2.10.</b> Comparación de la tasa general de dispersión de polen en <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> por estrato y orientación, en 2013, en Cuatepec ( $S_1$ ). ....                  | 34 |
| <b>Figura 2.11.</b> Traslape fenológico general para <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> en Terrenate ( $S_2$ ) en 2012. ....   | 35 |
| <b>Figura 2.12.</b> Fenogramas de receptividad y dispersión de polen de 23 familias de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> en Cuatepec ( $S_1$ ). ....  | 37 |
| <b>Figura 2.13.</b> Fenogramas de receptividad y dispersión de polen de 23 familias de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> en Terrenate ( $S_2$ ), en 2012. ....                                  | 39 |
| <b>Figura 2.14.</b> Medias ajustadas y errores estándar de variables fenológicas de tiempo para <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> por sitio y año. ....   | 49 |
| <b>Figura 2.15.</b> Medias ajustadas y errores estándar de variables fenológicas de tiempo para <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> por familia dentro de sitio. ....                             | 50 |
| <b>Figura 2.16.</b> Medias ajustadas y errores estándar de variables fenológicas de tiempo para <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> por estrato y orientación. ....                               | 51 |
| <b>Figura 2.17.</b> Medias ajustadas y errores estándar de variables fenológicas de tiempo para <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i> por procedencia. ....   | 53 |

## CAPITULO I

### INTRODUCCIÓN GENERAL

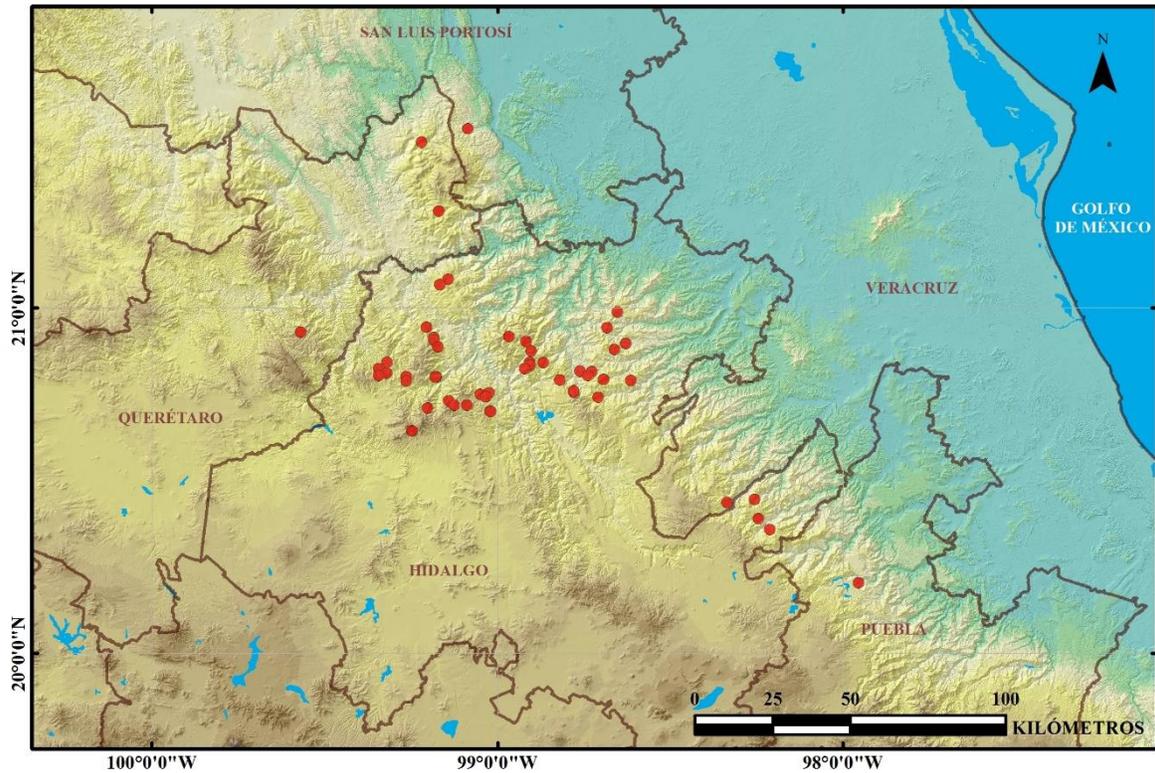
México es el país que ocupa el primer lugar en número de especies y variedades del género *Pinus*, con al rededor del 40% concentrado dentro de su territorio (Farjon *et al.*, 1997); sin embargo, esta riqueza y la amplia variación intraespecífica que algunas de estas especies presentan (Farjon, 1996), hacen casi imposible la implementación de un programa de mejoramiento para cada una de ellas. En este sentido, los esfuerzos para tal fin deben centrarse en la elección de un grupo reducido de especies que presenten una distribución amplia, capacidad adaptativa y un alto valor ecológico, económico y social.

#### **1.1. Distribución e importancia *Pinus greggii* var. *australis***

*Pinus greggii* Engelmann ex Parlatore es una especie endémica de México que se distribuye en poblaciones aisladas y dispersas a lo largo de la sierra Madre Oriental, desde los 20° 13' hasta a los 25° 29' de latitud norte (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005). Dos grandes áreas se distinguen separadas por una discontinuidad geográfica de aproximadamente 300 km. Actualmente se reconocen dos variedades taxonómicas; *P. greggii* var. *greggii* habita la porción norte del área de distribución de la especie, y *P. greggii* var. *australis* Donahue & López crece en el sur (Donahue y López-Upton, 1999; López-Upton *et al.*, 2004; Ramírez-Herrera *et al.*, 2005).

Las poblaciones de *Pinus greggii* var. *australis* se localizan en la zona centro-oriente de México, en los estados de Hidalgo, Querétaro, y escasamente en Puebla, San Luis Potosí y Veracruz (Figura 1.1), en un rango de elevación de 1100 a 2700 metros sobre el nivel del mar. La temperatura anual promedio en estos sitios oscila entre 14 y 21.5 °C, con precipitaciones promedio entre 600 y 2500 mm anuales. Los suelos sobre los que se

desarrolla son Luvisol, Leptosol, Regosol, Fozem y Cambisol, con texturas arcillosas, francas y franco-arcillosas, y un rango de pH entre 4.3 y 6.6 (Donahue y López-Upton, 1996; Hernández *et al.*, 2007).



**Figura 1.1.** Distribución natural de *Pinus greggii* var. *australis*.

*P. greggii* var. *australis* posee una alta importancia ecológica a nivel local. Esta especie se considera uno de los componentes estructurales clave en los ecosistemas donde se desarrolla, porque forma parte del dosel dominante y es la única que representa al estrato arbóreo en muchos de los casos. Además, los árboles son de alto valor económico para las poblaciones humanas que habitan en zonas aledañas. La especie se aprovecha para la obtención de madera para la industria del aserrío, postes para cerca y leña (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005). *P. greggii* var. *australis* presenta precocidad en su floración y altas tasas de crecimiento en altura y diámetro en ensayos de plantaciones (López *et al.*, 1993; López *et*

*al.*, 1999; Salazar *et al.*, 1999; Azamar *et al.*, 2000), además, esta variedad tiene un alto potencial para adaptarse a condiciones limitantes de humedad y a bajas temperaturas, lo que se considera como una gran ventaja sobre otras especies mexicanas tales como *P. patula* Schiede ex Schldl. *et. Cham.* y *P. pseudostrobus* Lind. (Vargas y Muñoz, 1988; López y Muñoz, 1991; Dvorak *et al.*, 2000), características importantes para utilizar esta variedad en plantaciones de reforestación y comerciales (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005).

Actualmente, *P. greggii* es una de las especies prioritarias de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (FAO, 2011). Esta especie fue la cuarta en términos de importancia en plantaciones del Programa Nacional de Reforestación ciclo 2012-2013, y en los estados de Hidalgo y Tlaxcala la producción en vivero de *P. greggii* var. *australis* fue la primera y una de las cuatro mayores respectivamente, en el mismo ciclo de acuerdo con Sarabia, S. (2013)<sup>[1]</sup>.

Personal del Posgrado en Ciencias Forestales del Colegio de Postgraduados inició un programa de recolección de semilla de todas las poblaciones naturales conocidas de *P. greggii* en 1983, y posteriormente estableció ensayos en campo con el propósito de evaluar características adaptativas (Salazar *et al.*, 1999; López *et al.*, 2001; Ramírez-Herrera *et al.*, 2005). Además, la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Protectora de Bosques (PROBOSQUE), la Comisión Forestal en Michoacán (COFOM), y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) en Oaxaca y Durango, hicieron pruebas de procedencia-progenies con *P. greggii*, algunas de ellas convertidas en huertos semilleros para plantaciones de reforestación (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005).

La Central America & Mexico Coniferous Resources Cooperative (CAMCORE) de la Universidad Estatal de Carolina del Norte en EUA y el Centro de Genética Forestal A.C. en

---

<sup>1</sup> Sarabia, S. Analista técnico de germoplasma, CONAFOR - Hidalgo (ssarabia@conafor.gob.mx).

México recolectaron semilla de la mayoría de las poblaciones conocidas de esta especie en el periodo entre 1985 a 1995 (López-Upton y Donahue, 1995; Donahue y López-Upton, 1996; Dvorak *et al.*, 2000) con el propósito de realizar ensayos genéticos orientados a la producción de germoplasma (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005).

Así mismo, importantes ensayos de introducción de *P. greggii* var. *australis* se establecieron en países como Argentina, Brasil, Chile, Colombia y Ecuador, en el continente americano (Picchi y Barrett, 1967; Dvorak *et al.*, 1996); India y Nepal, en Asia (Ghosh *et al.*, 1981; Pande, 1982; Neil, 1991); Angola, Lesotho, Sudáfrica y Zimbabwe, en África (Poynton, 1976; Darrow y Coetzee, 1983; Ministry of Agriculture, 1985); y, Australia y Nueva Zelanda, en Oceanía (Fielding, 1960; Dvorak *et al.*, 1996). Plantaciones con ambas variedades de *P. greggii* se establecieron en localidades con bajos niveles de precipitación pluvial en Sudáfrica, donde *P. patula* y *P. taeda* L., árboles considerados internacionalmente como altamente productivos, no pueden prosperar (Dvorak y Donahue, 1993; Dvorak *et al.*, 1996, Dvorak *et al.*, 2000).

## **1.2. Principios e importancia del mejoramiento genético forestal**

Los sistemas de reproducción de especies forestales en regiones templado-frías se caracterizan por un retraso en la edad de floración y producciones de germoplasma irregulares que carecen de calidad genética (Gerhold, 1966). Esta situación se agrava, sobre todo en términos de calidad del germoplasma, en el caso de *P. greggii* var. *australis* y de un importante número de especies de coníferas en México, debido a que las comunidades vegetales correspondientes son alteradas por causas antropógenas (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005).

Un suministro suficiente de germoplasma de calidad genética es necesario para producir plantas genéticamente superiores para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales y de restauración (Zobel y Talbert, 1988). Esto se puede lograr con la implementación de programas de mejoramiento genético forestal. Los primeros huertos semilleros se establecieron en Estados Unidos y Gran Bretaña en la década de 1930 a 1940, como consecuencia de una creciente demanda de semilla, dificultades inherentes a la recolección de germoplasma de masas forestales degradadas y propósito de emplear material genéticamente mejorado (Pardos y Gil, 1986). A partir de entonces y debido a sus ventajas, la mayoría de los programas de mejoramiento genético se han centrado en la creación de este tipo de unidades productoras de germoplasma forestal (Hopkins y Hutcher, 1994).

Un huerto semillero es una plantación de árboles genéticamente superiores, lo suficientemente aislada para reducir polinización externa y operada de forma intensiva con el objetivo de producir semilla de calidad genética superior, a edades tempranas, en intervalos regulares, y en cantidades grandes. Éstos pueden ser sexuales, establecidos con progenies de árboles previamente seleccionados, o clonales, establecidos a través de partes vegetativas (Zobel y Talbert, 1988; Kang *et al.*, 2001).

El proceso para el establecimiento de un huerto semillero se inicia con la identificación y selección de árboles superiores con base en su apariencia externa (fenotipo) (White *et al.*, 2007). Esto se considera como la base fundamental de un programa de mejoramiento genético forestal, en donde la calidad y rigurosidad de la selección influyen en la ganancia genética (Zobel y Talbert, 1988).

La calidad de los árboles se determina a través de la evaluación del crecimiento de su progenie (ensayos de progenie) en los terrenos donde se establecen las plantaciones (Zobel y

Talbert, 1988). Estos ensayos son de alto valor dentro de los programas de mejoramiento genético forestal, debido a que constituyen la base de la selección genética efectiva de los mejores progenitores y proveen la información necesaria para definir la estrategia por seguir en las etapas posteriores de dichos programas (White *et al.*, 2007).

El tiempo requerido para la evaluación del desempeño de los árboles en los ensayos se considera como uno de los principales problemas asociados al mejoramiento genético forestal. Este obstáculo se puede solventar con el uso de la selección temprana, que consiste en seleccionar genotipos con base en características que se manifiesten a edades jóvenes (Vargas-Hernández y Adams, 1992).

### **1.3. El papel de la fenología reproductiva en el mejoramiento genético forestal**

El éxito de un programa de mejoramiento genético de árboles se relaciona con el proceso de floración dentro de los huertos semilleros, donde se espera que ésta ocurra a edades tempranas y de forma consistente (Pharis *et al.*, 1987). La calidad del germoplasma en un huerto semillero se determina por las familias y los individuos seleccionados, la producción y sincronización de estróbilos femeninos y masculinos, los niveles de autofertilización y la presencia de polen externo (Ericksson *et al.*, 1973; Erickson y Adams, 1989).

El máximo nivel de diversidad genética de la semilla obtenida en un huerto semillero se alcanza cuando todas las familias aportan la misma cantidad de genes a la siguiente generación (Gömöry *et al.*, 2000); sin embargo, esta situación es difícil de conseguir debido principalmente a las diferencias en la producción de estróbilos (tiempo, sexo y cantidad), a la fertilidad (estructuras reproductivas), la distancia entre familias y la sincronización de la floración (Xie *et al.*, 1994; Gömöry *et al.*, 2003).

La fenología de la floración es probablemente el factor más importante en el manejo de un huerto semillero, debido a que afecta el patrón de cruzamiento entre familias e individuos (Weir y Zobel, 1975; El-Kassaby *et al.*, 1988; Burczyk y Prat, 1997). Así mismo, la determinación del nivel de sincronía es fundamental para tomar decisiones sobre la aplicación de actividades complementarias, como es el raleo o el uso de polinización controlada que contrarrestan el efecto de la desincronización de las familias en un huerto semillero (El-Kassaby y Ritland, 1986; Blush *et al.*, 1993).

La presente investigación se desarrolló con el propósito de evaluar la fenología reproductiva de familias de medios hermanos de *Pinus greggii* var. *australis* establecidas en un ensayo de progenies en dos localidades. En el siguiente capítulo se detalla el trabajo realizado, que se divide en tres partes principales: i) descripción, ii) evaluación de sincronía y iii) evaluación estadística de los periodos reproductivos femeninos y masculinos.

## CAPITULO II

### CARACTERIZACIÓN DE LA FENOLOGÍA REPRODUCTIVA EN FAMILIAS DE MEDIOS HERMANOS DE *Pinus greggii* VAR. *australis*

#### 2.1. RESUMEN

Los huertos semilleros deben proveer semilla de calidad genética superior, con producción a edad temprana, suficiente y en intervalos regulares. Se evalúa el desarrollo, la sincronía y la variación temporal de la fenología floral de un ensayo de progenies de *Pinus greggii* var. *australis* establecido en dos sitios ubicados en Cuauhtepic, Hidalgo y Terrenate, Tlaxcala, que se convierten en huertos semilleros sexuales. Se monitorearon 23 familias de medios hermanos de cinco procedencias durante dos años consecutivos, con al menos cuatro árboles por familia por sitio. En 2012 se realizó una evaluación preliminar, con observaciones cada dos semanas entre marzo y junio de la copa del árbol completa. Durante 2013 se dio seguimiento a 24 brotes seleccionados por árbol, considerando los niveles de copa completa, estrato de copa y orientación de rama, dos veces por semana entre febrero y junio. Las etapas de desarrollo de estróbilos se identificaron y registraron, y se determinaron las fechas de inicio y término de floración femenina y masculina, así como su duración. La sincronización de los periodos de floración a nivel sitio ( $PO_0$ ) fue de 0.31 en Terrenate en 2012 y de 0.34 en Cuauhtepic en 2013, niveles normales considerando el origen sexual del ensayo; sin embargo, en Cuauhtepic durante 2012 fue considerablemente alta (0.57). Todas las familias presentaron algún grado de sincronización entre sí, excepto en Terrenate. Se detectaron diferencias significativas entre Cuauhtepic (más precoz y con mayor duración) y Terrenate en 2012. Únicamente se detectó variación significativa entre familias en Terrenate para la mayoría de variables, y en general se observó gran variación dentro de familias. Se observaron diferencias significativas entre estratos pero no entre orientaciones para dispersión de polen. Se determinó que la nula producción de estructuras reproductivas en Terrenate en 2013 se debe a las condiciones ambientales mayormente limitativas del sitio en ese año. El control genético fue moderado y bajo en varias variables de la fenología floral.

**Palabras clave:** *Pinus greggii* var. *australis*, fenología floral, huerto semillero, receptividad, dispersión de polen, sincronización.

## 2.2. SUMMARY

Seed orchards should provide seed of superior genetic quality, at early age, in sufficient amounts at regular intervals. Development, synchrony and temporal variation in floral phenology is evaluated in a progeny test of *Pinus greggii* var. *australis* set at two sites in Cuauhtepac, Hidalgo and Terrenate, Tlaxcala. This tests are converting in a sexual seed orchard. Twenty-three half-sib families, with at least four trees per family per site, from five provenances were monitored for two consecutive years. In 2012 a preliminary evaluation was conducted on the whole tree crown with observations every two weeks between March and June. Between February and June of 2013 observation were conducted twice a week on 24 selected buds per tree, considering full crown, crown layers and branch orientation. Stages of development of strobili were identified and recorded, and the start and end dates of male and female flowering and its duration were determined. Synchronization of flowering periods at level site (PO<sub>0</sub>) was 0.31 in Terrenate in 2012 and 0.34 in Cuauhtepac in 2013, normal levels considering the sexual origin of the test; however, in Cuauhtepac during 2012 was considerably high (0.57). All families showed some degree of synchronization with each other, except in Terrenate. Significant differences between Cuauhtepac (earlier and longer) and Terrenate were detected in 2012. Only significant variation between families was detected in Terrenate for most variables, and generally large variation was observed within families. Significant differences between layers but not for orientation in pollen dispersion were observed. The absence of reproductive structures in Terrenate in 2013 may be due to limiting environmental conditions of this site in that year. The genetic control was moderate to low in several of the floral phenology variables.

**Keywords:** *Pinus greggii* var. *australis*, floral phenology, seed orchard, receptivity, pollen shedding, synchronization.

### 2.3. INTRODUCCIÓN

*Pinus greggii* Engelman ex Parlatore var. *australis* Donahue & López es endémico de México, y tiene un alto valor ecológico, económico y social, tanto a nivel local como a nivel internacional. Esta especie se distribuye en poblaciones aisladas y dispersas sobre la sierra Madre Oriental en los estados de Hidalgo, Querétaro, y escasamente en Puebla, San Luis Potosí y Veracruz, entre los 20° 13' y 21° 30' de latitud norte, en la zona centro-oriente de México (Donahue y López-Upton, 1999; López-Upton *et al.*, 2004; Ramírez-Herrera *et al.*, 2005).

*P. greggii* var. *australis* presenta precocidad en la floración y altas tasas de crecimiento en altura y diámetro (López *et al.*, 1993; López *et al.*, 1999; Salazar *et al.*, 1999; Azamar *et al.*, 2000), además, presenta un alto potencial para adaptarse a condiciones limitantes de humedad y a bajas temperaturas (Vargas y Muñoz, 1988; López y Muñoz, 1991; Dvorak *et al.*, 2000). Estas características favorecen su uso plantaciones comerciales y de reforestación (Ramírez-Herrera *et al.*, 2005), lo que ha generado el interés por probarla con fines de mejoramiento genético en México y en varios países (Dvorak *et al.*, 2000; López *et al.*, 2001; Hodge y Dvorak, 2012).

El germoplasma mejorado debe provenir de huertos semilleros, cuyo objetivo es producir semilla de calidad genética superior a edades tempranas, en intervalos regulares, y en cantidades suficientes (Zobel y Talbert, 1988). La fenología de la floración es probablemente el factor más importante en el manejo de un huerto semillero, debido a que afecta el patrón de cruzamiento entre familias e individuos y, por tanto, la composición genética de la semilla producida (Weir y Zobel, 1975; El-Kassaby *et al.*, 1988; Erickson y Adams, 1989; Burczyk y Chalupka, 1997; Burczyk y Prat, 1997).

El proceso de cruzamiento en un huerto semillero se rige teóricamente por el criterio de equilibrio panmítico que tiene los siguientes principios: a) el proceso de fertilización es al azar y debe existir completa sincronía en la floración, b) los núcleos espermáticos de cada clon o familia tienen la misma probabilidad de fecundar los óvulos de cada clon o familia y no existe incompatibilidad, c) el número de gametos (clones o familias) de cada sexo es igual, d) no existen barreras genéticas que afecten la viabilidad del embrión, e) no existe contaminación por la presencia de polen ajeno al huerto y f) el nivel de autofecundación es el mismo para todos los clones o familias del huerto (Woessner y Franklin, 1973; Weir y Zobel, 1975); sin embargo, diferentes niveles de variación fenológica y de sincronización se han reportado para especies como *Pinus nigra* Arn. (Matziris, 1994; Lario *et al.* 2001; Alizoti *et al.*, 2010), *P. radiata* D. Don (Lill y Sweet, 1977; Codesido *et al.*, 2005), *P. sylvestris* L. (Savolainen *et al.*, 1993), *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (El-Kassaby *et al.*, 1984; Erickson y Adams, 1989) y *Picea abies* Karst. (Eriksson *et al.*, 1973) revelando que la suposición de panmixia dentro de un huerto semillero no es realista.

La determinación de la variación en la sincronía de la floración en un huerto semillero es de vital importancia. A partir de esta información se pueden implementar actividades de manejo con la finalidad de contrarrestar el efecto de la desincronización (El-Kassaby y Ritland, 1986; Blush *et al.*, 1993), que puede generar una disminución de la diversidad genética del lote de semillas y un mayor porcentaje de semillas vacías por un aumento en los niveles de autopolinización (Burczyk y Chalupka, 1997).

El componente genético y las condiciones ambientales influyen en la formación, desarrollo y sincronización de estróbilos femeninos y masculinos (Owens y Blake, 1985; Nikkanen, 2001). Las condiciones climáticas tienen la capacidad de generar

descompensaciones en los niveles de agua y minerales, en la cantidad de asimilados y en la producción y reacciones de los reguladores de crecimiento endógenos de los cuales depende la diferenciación de yemas florales (Lyndon, 1992).

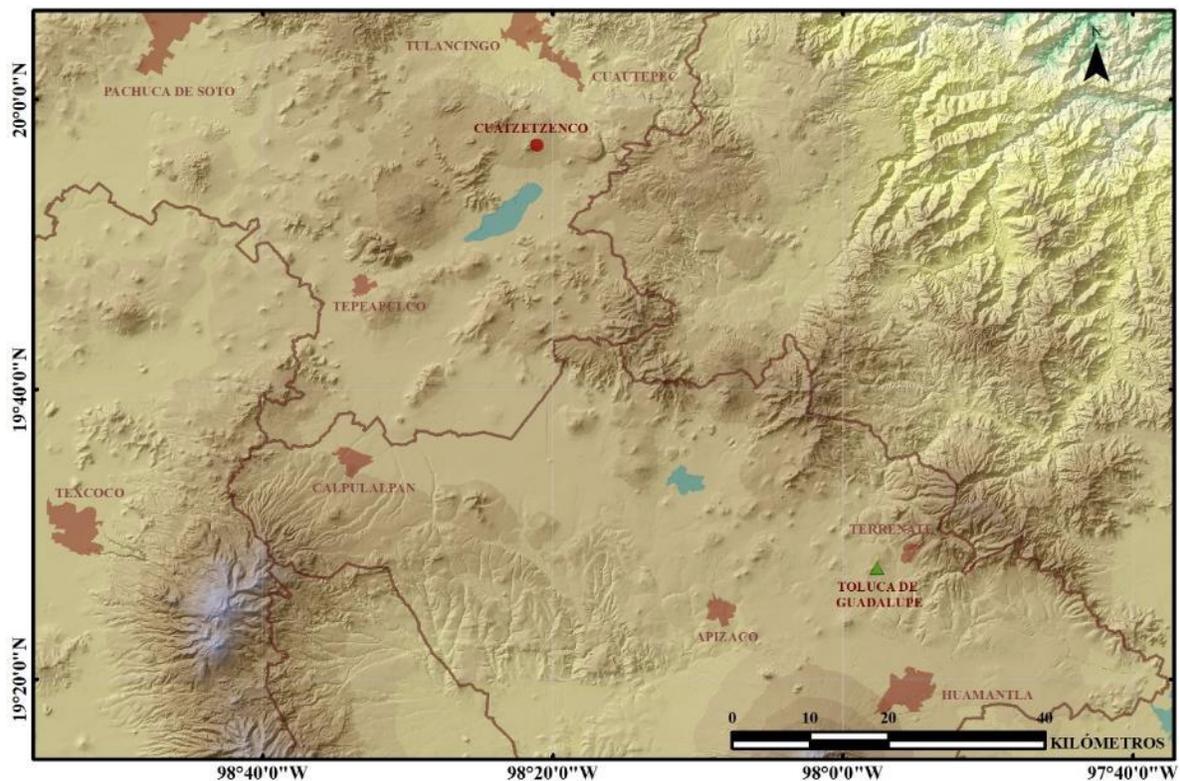
Varias técnicas se han desarrollado para cuantificar la variación de la fenología reproductiva en coníferas, la sincronización de las estructuras reproductivas y la participación de los pares coincidentes de clones o familias (Askew, 1988; Askew y Blush, 1990; Matziris, 1994; Gömöry *et al.*, 2003).

Un número importante de ensayos de progenies de *Pinus greggii* var. *australis* se estableció en los estados de Hidalgo, México, Puebla, Tlaxcala y Veracruz entre 2004 y 2008 en el marco de un proyecto de investigación impulsado por el Colegio de Postgraduados, y que en el corto plazo se convertirán a huertos semilleros sexuales. Con base en la importancia de la especie y del papel que juega el proceso de floración en la calidad de la producción de semilla, en esta investigación se evalúa la fenología reproductiva de uno de estos ensayos. Para conseguirlo: i) se caracteriza el desarrollo de estructuras reproductivas, ii) se determina el grado de sincronización entre los periodos de receptividad de los estróbilos femeninos y de dispersión del polen, y iii) se analiza la variación de estos periodos en diferentes niveles.

## 2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.4.1. Material genético

El estudio se realizó en un ensayo de progenies de *Pinus greggii* var. *australis* en dos sitios de evaluación ubicados en Cuatzetzenco, municipio de Cuauhtepic de Hinojosa, Hidalgo ( $S_1$ ) y en Toluca de Guadalupe, municipio de Terrenate, Tlaxcala ( $S_2$ ) (Figura 2.1). El ensayo está integrado por familias de medios hermanos producto de la selección de árboles superiores en nueve poblaciones naturales en los estados de Hidalgo, Querétaro y Veracruz.



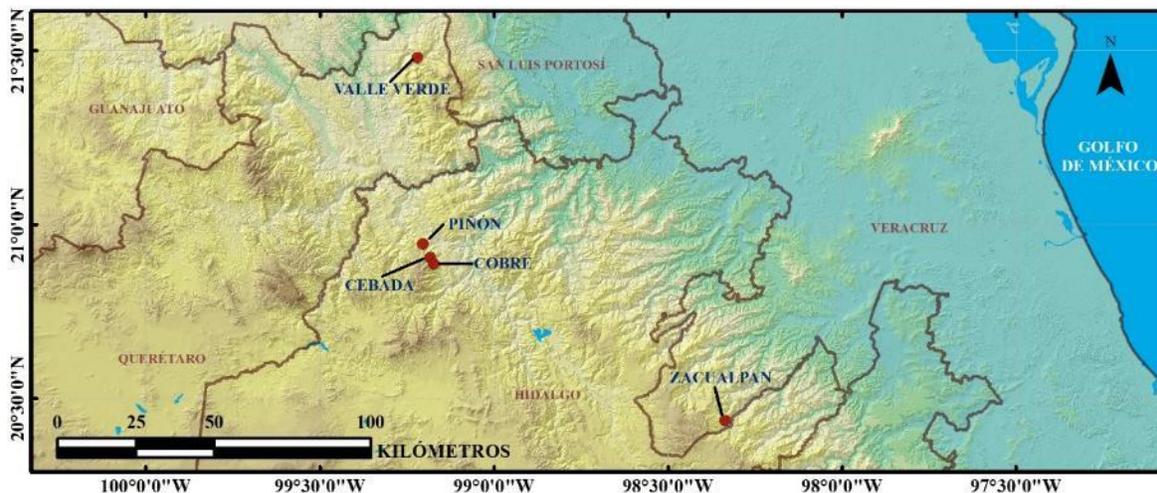
**Figura 2.1.** Localización geográfica de los dos sitios del ensayo de progenies de *Pinus greggii* var. *australis* con evaluación de la fenología floral.

El sitio Cuauhtepic ( $S_1$ ) se localiza en los  $19^{\circ} 56' 56.1''$  N,  $98^{\circ} 21' 06.6''$  O a 2790 msnm, sobre terrenos de uso agrícola en una zona de bosque con la presencia de *Pinus teocote*

Schiede ex Schltdl. et Cham., *Quercus* sp., *P. montezumae* Lamb., y *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.). El ensayo se estableció en julio de 2004, integrado inicialmente por 63 familias en un diseño de parcelas de un árbol con 18 repeticiones.

El sitio Terrenate ( $S_2$ ) se ubica en los  $19^{\circ} 27' 47.5''$  N,  $97^{\circ} 57' 55.8''$  O a una altitud de 2680 msnm, sobre un terreno de uso agrícola, en una zona con vegetación dispersa dominada por *Juniperus deppeana* Steud. y *Pinus rudis* Endl. El suelo tiene poca profundidad y se caracteriza por la presencia de una gruesa capa de tepetate. Esta plantación se estableció en julio de 2005, y se integró con 57 familias en un diseño de parcelas de un árbol con 18 repeticiones.

Para este trabajo se seleccionaron 23 familias de cinco procedencias (Figura 2.2) con base en volumen (superiores e inferiores), que tuvieran al menos cuatro árboles vivos y que estuvieran presentes en los dos sitios, con un total de 146 árboles en Cuatepec y 168 en Terrenate.



**Figura 2.2.** Localización geográfica de las procedencias de las familias de medios hermanos de *Pinus greggii* var. *australis* seleccionadas en el estudio de la fenología floral.

Las procedencias de las familias se dividen en dos grupos con base en sus características ambientales: a) clima húmedo - Valle Verde 1350 m (familias 57, 61 y 62) y Zacualpan 1500 m (familias 31, 32, 35 y 36); y b) clima subhúmedo - Cebada 2090 m (familias 4, 5, 7 y 9), Cobre 2100 m (familias 12, 16, 17 y 19) y Piñón 1830 m (familias 21, 22, 25, 26, 27, 28, 29 y 30).

La selección de las unidades de muestreo se realizó con base en el sexo de los estróbilos:

- a) Estróbilos masculinos. Se registró sólo el promedio general por árbol en 2012. Durante 2013 el procedimiento fue el siguiente: *i*) la copa de cada árbol se dividió en dos estratos, alto y bajo; *ii*) en cada estrato se eligieron aleatoriamente dos verticilos y en cada uno de estos se seleccionaron y marcaron dos ramas, una con orientación norte y la otra al sur; y *iii*) en cada rama seleccionada se eligieron y marcaron tres brotes, el terminal y dos laterales. En cada inspección se tomó observación de la fenología de 24 brotes y a su vez los promedios: general de copa, por estrato (dos), y por rama (ocho) para cada árbol. De este modo se garantizó un monitoreo representativo de toda la copa, debido a que existe cierta variación en las fechas de floración dentro de un árbol (Jonsson *et al.*, 1976).
- b) Estróbilos femeninos. En cada inspección se hizo un conteo del número total de estróbilos por árbol y el registro de la etapa fenológica de cada uno. Estas inspecciones se hicieron principalmente en el estrato superior del árbol.

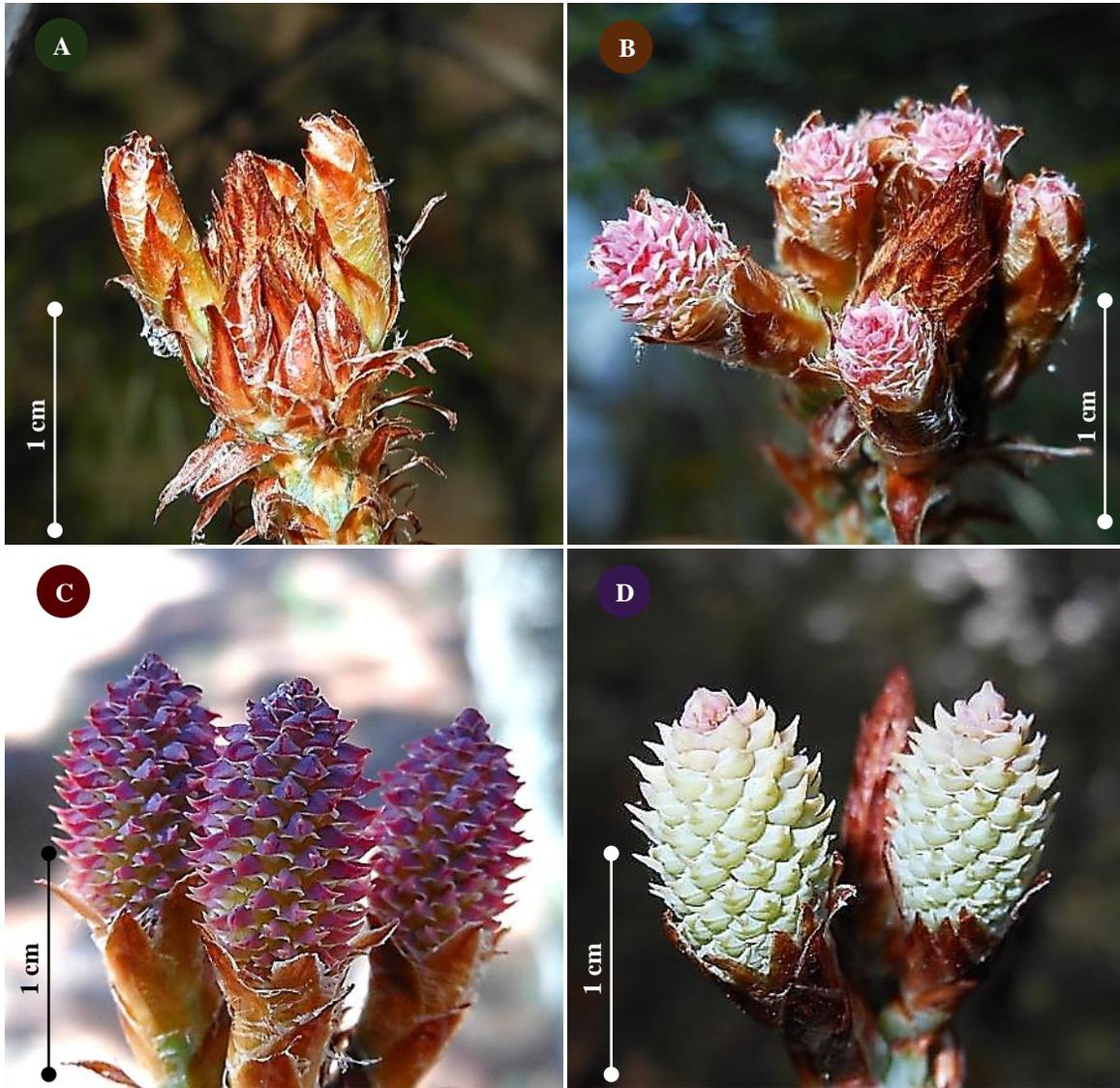
#### **2.4.2. Monitoreo y caracterización de la fenología de estructuras reproductivas**

La inspección se realizó durante dos años consecutivos (2012 y 2013). El desarrollo de los estróbilos femeninos se evaluó utilizando binoculares (7x35 mm). El desarrollo de los estróbilos masculinos se observó directamente por su mayor accesibilidad.

- a) Primera etapa - 2012. Se consideró como preliminar y sirvió para determinar el comportamiento de las familias y los árboles en los dos sitios y planear las actividades del ciclo 2013. El registro de los datos se realizó cada 15 días del 23 de marzo al 9 de junio, con un total de siete inspecciones por sitio.
- b) Segunda etapa - 2013. Los estratos, las ramas y los brotes en los árboles seleccionados se identificaron y marcaron en la primera mitad de febrero. Las observaciones se hicieron del 15 de febrero al 8 de junio, con inspecciones dos veces por semana a cada sitio y un total de 30 en Cuatepec ( $S_1$ ) por 26 en Terrenate ( $S_2$ ).

La evaluación de cada etapa fenológica se hizo con base en las clasificaciones descritas por Matziris (1994) para estróbilos femeninos, y por Codesido y Merlo (2001) para estróbilos masculinos. Estas clasificaciones incluyen cuatro etapas principales de desarrollo:

- a) Estróbilos femeninos (Figura 2.3). *Etapa 1 - Formación y desarrollo inicial*: una vez que se forma, la yema aumenta de tamaño en sentido longitudinal y adopta una forma tendiendo a cilíndrica, el conillo se encuentra totalmente cubierto por los catafilos de la yema. *Etapa 2 - Desarrollo*: el ápice de la yema cilíndrica se abre y aparecen las primeras escamas ovulíferas que continúan en desarrollo. En esta etapa los óvulos no son receptivos, pero los granos de polen pueden entrar en las escamas y si sobreviven pueden ser capaces de participar en la fertilización (receptividad en 20 %). *Etapa 3 - Receptividad*: las escamas del conillo se separan gradualmente, formando casi un ángulo recto con relación al eje del conillo. En esta se presenta máxima receptividad (100 %). *Etapa 4 - Término de receptividad e inicio del desarrollo del cono*: las escamas ovulíferas aumentan de tamaño y grosor, se contraen hacia el ápice impidiendo la entrada de granos de polen, de modo que la receptividad del estróbilo termina.



**Figura 2.3.** Etapas del desarrollo fenológico de estróbilos femeninos de *Pinus greggii* var. *australis*. En A, B, C y D) Ejemplos típicos de las etapas 1, 2 (receptividad 20 %), 3 (receptividad 100 %) y 4 respectivamente.

b) Estróbilos masculinos (Figura 2.4). Las etapas 1 y 2, se subdividieron en cinco y dos etapas respectivamente para tener un mejor registro de tiempo y del comportamiento de los árboles y familias. *Etapas 1 - Formación y desarrollo: 1.0*) los estróbilos están cubiertos por las escamas de la yema hinchada; *1.2*) los estróbilos se distinguen como pequeñas protuberancias cubiertas por catafilos; *1.4*) los estróbilos aún cubiertos por catafilos

presentan un tamaño mayor; 1.6) los estróbilos rompen la cubierta de catafilos; y 1.8) los estróbilos continúan en crecimiento y se han liberado de los catafilos casi por completo.



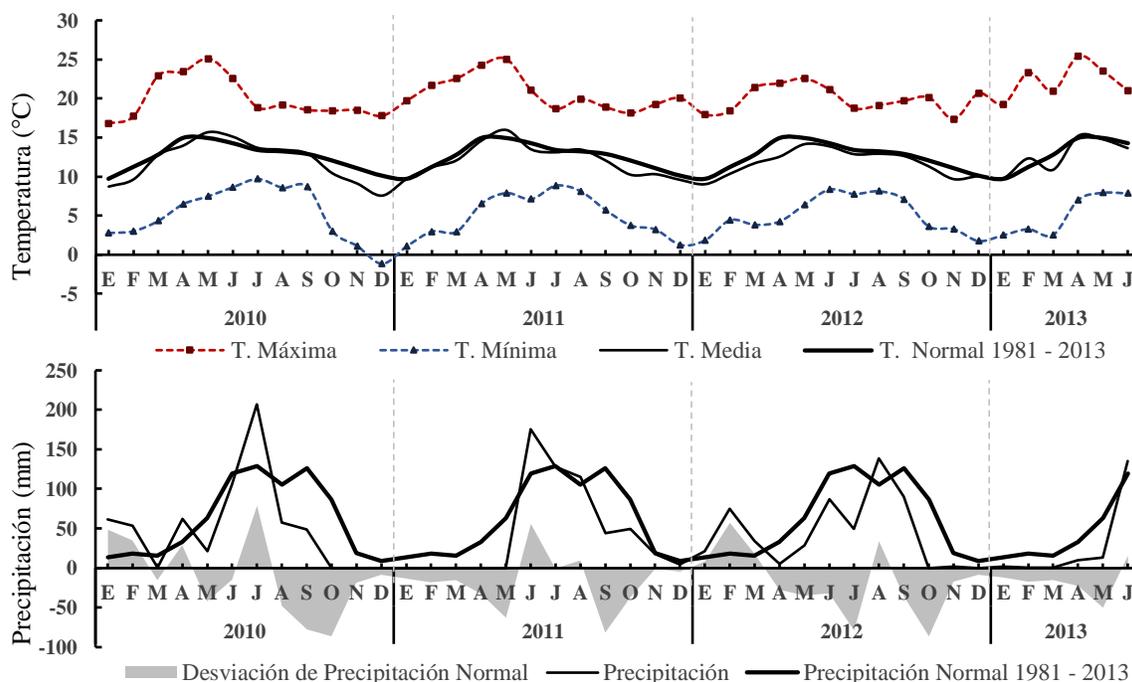
**Figura 2.4.** Etapas del desarrollo fenológico de estróbilos masculinos de *Pinus greggii* var. *australis*. A) “Etapa 0” o brote no diferenciado; B, C, D, E y F) etapa 1, sub-etapas 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 y 1.8 respectivamente; G y H) etapa 2, sub-etapas 2.0 y 2.5 respectivamente; I) etapa 3 (dispersión); y J) etapa 4.

*Etapa 2 - Maduración:* 2.0) los estróbilos alcanzan su mayor crecimiento en diámetro, presentan coloración verde; y 2.5) los estróbilos presentan elongación y cambio en la coloración a amarillo. *Etapa 3 - Dispersión:* las escamas esporófilas se abren y liberan el polen (dispersión 100%). *Etapa 4 - Marchitamiento:* la dispersión de polen termina, los estróbilos se marchitan y desprenden del brote.

Las observaciones sobre el desarrollo fenológico de los estróbilos se hicieron hasta que la receptividad de los conillos femeninos y la dispersión de polen terminaron.

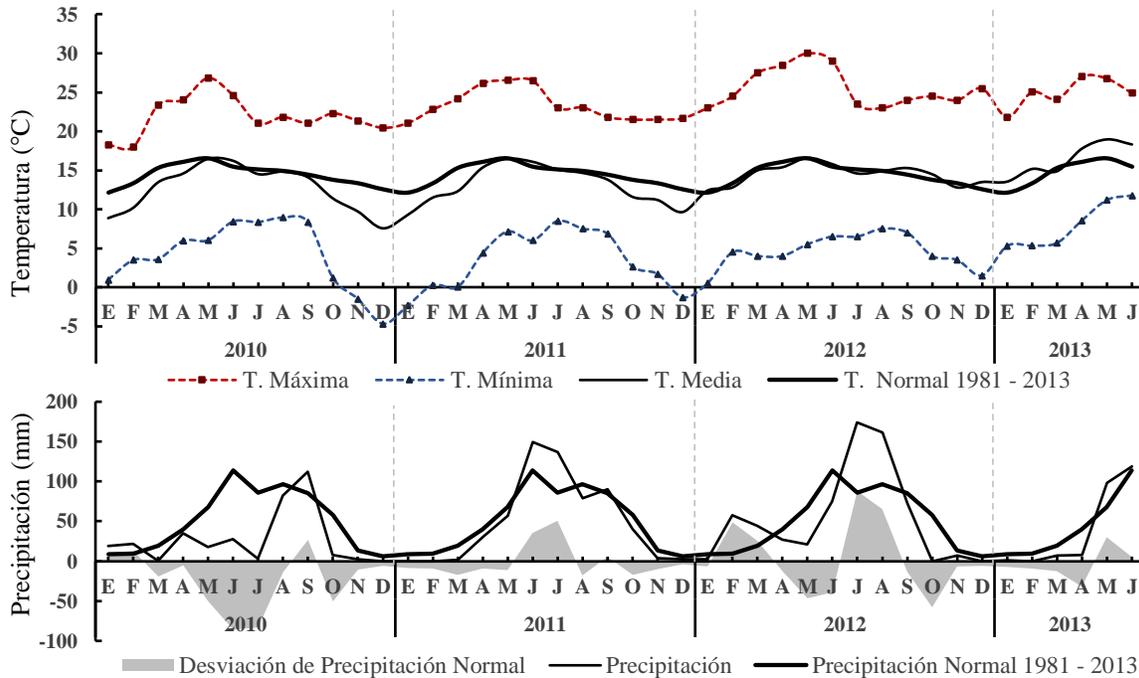
### 2.4.3. Condiciones climáticas

Se obtuvieron datos de estaciones climatológicas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para Cuatepec y Terrenate respectivamente (Figuras 2.5 y 2.6).



**Figura 2.5.** Normales climatológicas para el sitio Cuatepec 2010-2013. Las normales de temperatura en la parte superior y la precipitación en la inferior (INIFAP).

a) Cuauhtepc ( $S_1$ ). El clima es Cb(w2)(i)gw", templado con verano fresco largo, subhúmedo con lluvias en verano (lluvia invernal entre 5 y 10%). La temperatura media anual de 12.5 °C, abril es el mes más cálido con temperatura media de 14.9 °C, enero el mes más frío con temperaturas entorno a los 9.7 °C. La precipitación anual es de 738.1 mm; julio es el mes más lluvioso con 128.6 mm y diciembre el más seco es con 9.0 mm.



**Figura 2.6.** Normales climatológicas para el sitio Terrenate 2010-2013. En la parte superior se muestran las normales de temperatura y en la inferior las de precipitación (estación 29051 CONAGUA).

b) Terrenate ( $S_2$ ). El clima del área es Cb(w0)(i)gw'', templado con verano fresco largo, subhúmedo con lluvias en verano (lluvia invernal entre 5 y 10%). La temperatura media anual de 14.4 °C, el mes más cálido es mayo con temperatura media de 16.5 °C y el mes más frío es enero con temperaturas que oscilan entorno a los 12.1 °C. La precipitación anual es de 602.5 mm; junio es el mes más lluvioso con 113.6 mm y diciembre el más seco con 6.1 mm.

Ambos sitios mostraron importantes variaciones en relación a las normales de 33 años, tanto en temperatura como en precipitación pluvial. Estas variaciones fueron más evidentes en los años 2012 y 2013, en donde se mostró un alza en la temperatura y periodo continuo de sequía a partir de los últimos meses de 2012. Las heladas incidieron de forma importante en la mortandad de estróbilos femeninos sobre todo en Terrenate (2 de marzo de 2013), donde causaron la pérdida de porcentaje considerable de estos. Estas condiciones en conjunto tuvieron importantes repercusiones en la producción y desarrollo de estructuras reproductivas.

#### 2.4.4. Evaluación de sincronía fenológica

Los datos fueron procesados con SYNCHRO.SAS (Zas *et al.*, 2003), una macro de procesamiento de datos fenológicos elaborada con el software estadístico SAS /BASE 6.12 (SAS Institute, 2002) que calcula, a partir de los datos de campo algunos de los principales índices de sincronización reproductiva (Zas *et al.*, 2003).

a) Índice de sincronización fenológica  $PO_{jk}$  (Askew y Blush, 1990).

$$PO_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{ijk} - |m_{ik} - p_{ij}|)}{\sum_{i=1}^n S_{ijk}} \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

Donde:  $p_{ij}$  = proporción de estróbilos masculinos monitoreados de la familia  $j$  que liberan polen en el día  $i$  (valores entre 0 y 1);  $m_{ik}$  = proporción de estróbilos femeninos de la familia  $k$  que están receptivos en el día  $i$  (valores entre 0 y 1); y  $S_{ijk}$  = el valor mayor entre  $p_{ij}$  y  $m_{ik}$ . Con lo anterior como eje central del índice se deriva lo siguiente.

$$PO_0 = \sum_{j=1}^t \sum_{k=1}^t \frac{PO_{jk}}{(t(t-1))} \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

$$\overline{PO}_j = \frac{1}{t-1} \sum_{j=1}^t PO_{jk} \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

$$\overline{PO}_{.k} = \frac{1}{t-1} \sum_{k=1}^t PO_{jk} \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

Donde:  $PO_0$  = índice de sincronización promedio para todas las cruzas, excepto autofecundación ( $j \neq k$ ), en un huerto con  $t$  familias;  $PO_j$  = PO promedio cuando una familia “macho”  $j$  se cruza con todas las “hembras” del huerto; y  $PO_{.k}$  = PO promedio cuando una familia “hembra”  $k$  se cruza con todos los “machos” del huerto. Cuando  $PO = 1$  (máximo) el periodo de dispersión de polen de un árbol dado coincide o se traslapa con exactitud con el periodo de receptividad de otro, o viceversa (sincronía completa); y cuando  $PO = 0$  (mínimo) los periodos están totalmente desfasados.

b) Índice de tiempo de sincronización  $Rd_{jk}$  (Askew, 1988).

Donde:  $Rd_{jk}$  = número de días que la familia  $k$  permanece receptiva y que se traslapan con el periodo de liberación de polen de la familia  $j$  y viceversa.

c) Índice de correlación fenológica  $rph$  (Gömöry *et al.*, 2000).

Dónde:  $rph$  = coeficiente de correlación de Pearson entre la tasa de liberación de polen de cada familia y la tasa de receptividad promedio de otra en particular o del resto de familias (valores de -1 a 1).

La evaluación sobre del desarrollo fenológico de estructuras reproductivas se hizo por familia comparando receptividad femenina a nivel árbol con dispersión masculina en tres niveles: árbol (copa completa), estrato de copa (alto y bajo) y orientación de rama (norte-sur).

#### 2.4.5. Evaluación estadística

Las sucesivas etapas de desarrollo floral femenino y masculino se expresaron en número de días cumplidos desde el primer día de enero hasta la fecha en que se alcanzaron dichas etapas (días julianos). Las variables de tiempo que se sometieron a un análisis estadístico fueron nueve: inicio (1), término (2) y duración (3) del periodo de dispersión de polen - *etapa 3* masculina; inicio (4) y duración (5) de *etapa 2* femenina; inicio (6), término (7) y duración (8) de la *etapa 3* femenina; y duración total (9) del periodo de receptividad de conillos femeninos.

Se realizaron análisis de varianza con el procedimiento MIXED, utilizando el algoritmo de máxima verosimilitud restringida (REML) del software estadístico SAS (SAS Institute, 2002). El desarrollo de los análisis de variables fenológicas se realizó en tres partes complementarias:

- a) Análisis conjunto (ambos sitios) e individual por sitio y año de variables de receptividad de conillos y dispersión de polen.

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + \beta_{j(i)} + F_k + SF_{ik} + e_{ijk} \quad \text{Ecuación (2.5)}$$

Donde,  $Y_{ijk}$  es el valor observado en el individuo de la  $k$ -ésima familia, en el  $j$ -ésimo bloque anidado en el  $i$ -ésimo sitio;  $\mu$  es la media poblacional;  $S_i$  es el efecto fijo del  $i$ -ésimo sitio ( $i = 1$  y  $2$ );  $\beta_{j(i)}$  es el efecto aleatorio de  $j$ -ésimo bloque anidado en el  $i$ -ésimo sitio  $\sim$ NID ( $0, \sigma^2_{b(s)}$ ) ( $j = 1, \dots, 18$ );  $F_k$  es el efecto aleatorio de la  $k$ -ésima familia  $\sim$ NID ( $0, \sigma^2_f$ ) ( $k = 1, \dots, 23$ );  $SF_{ik}$  es el efecto aleatorio de la interacción del  $i$ -ésimo sitio por la  $k$ -ésima familia  $\sim$ NID ( $0, \sigma^2_{sf}$ ); y  $e_{ijk}$  es el error asociado a dichos efectos  $\sim$ NID ( $0, \sigma^2_e$ ).

En el caso del análisis individual (por sitio), se tienen los mismos elementos que en el análisis conjunto pero eliminando los términos donde aparece el efecto de sitio:

$$Y_{jk} = \mu + \beta_j + F_k + e_{jk} \quad \text{Ecuación (2.6)}$$

b) Análisis individual del comportamiento de variables de dispersión de polen a nivel estrato de copa y orientación de rama, general y con efecto de familia.

$$Y_{jl} = \mu + \beta_j + T_l + e_{jl} \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

$$Y_{jkl} = \mu + \beta_j + F_k + T_{l(k)} + \beta F_{jk} + e_{jkl} \quad \text{Ecuación (2.8)}$$

Donde,  $Y_{jk}$  es el valor observado en el  $l$ -ésimo estrato en el individuo de la  $k$ -ésima familia, en el  $j$ -ésimo bloque;  $\mu$  es la media poblacional;  $\beta_j$  es el efecto aleatorio de  $j$ -ésimo bloque  $\sim \text{NID}(0, \sigma_b^2)$  ( $j = 1, \dots, 18$ );  $F_k$  es el efecto aleatorio de la  $k$ -ésima familia  $\sim \text{NID}(0, \sigma_f^2)$  ( $k = 1, \dots, 23$ );  $T_{l(k)}$  es el efecto fijo del  $l$ -ésimo estrato anidado en la  $k$ -ésima familia ( $0, \sigma_{t(f)}^2$ ) ( $l = 1$  y  $2$ );  $\beta F_{jk}$  es el efecto aleatorio de la interacción del  $j$ -ésimo bloque por la  $k$ -ésima familia  $\sim \text{NID}(0, \sigma_{bf}^2)$ ; y  $e_{jkl}$  es el error asociado a dichos efectos  $\sim \text{NID}(0, \sigma_e^2)$ .

En el análisis a nivel orientación de rama se tienen los mismos elementos que en el anterior, pero sustituyendo los términos donde aparece el efecto de estrato por el de orientación de rama:

$$Y_{jl} = \mu + \beta_j + O_l + e_{jl} \quad \text{Ecuación (2.9)}$$

$$Y_{jkl} = \mu + \beta_j + F_k + O_{l(k)} + \beta F_{jk} + e_{jkl} \quad \text{Ecuación (2.10)}$$

c) Análisis individual (por sitio) del factor procedencia y grupo de procedencias.

$$Y_{ijk} = \mu + P_i + \beta_j + F_{k(i)} + P\beta_{ij} + e_{ijk} \quad \text{Ecuación (2.11)}$$

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + \beta_j + F_{k(i)} + G\beta_{ij} + e_{ijk} \quad \text{Ecuación (2.12)}$$

Donde,  $Y_{ijk}$  es el valor observado en el individuo de la  $k$ -ésima familia anidada en la  $i$ -ésima procedencia, en el  $j$ -ésimo bloque;  $\mu$  es la media poblacional;  $P_i$  es el efecto fijo de la  $i$ -ésima procedencia ( $i = 1, \dots, 5$ );  $\beta_j$  es el efecto aleatorio de  $j$ -ésimo bloque  $\sim$ NID ( $0, \sigma^2_b$ ) ( $j = 1, \dots, 18$ );  $F_{k(i)}$  es el efecto aleatorio de la  $k$ -ésima familia anidada en la  $i$ -ésima procedencia  $\sim$ NID ( $0, \sigma^2_{f(p)}$ ) ( $k = 1, \dots, 23$ );  $P\beta_{ij}$  es el efecto aleatorio de la interacción de la  $i$ -ésima procedencia por el  $j$ -ésimo bloque  $\sim$ NID ( $0, \sigma^2_{pb}$ ); y  $e_{ijk}$  es el error asociado a dichos efectos  $\sim$ NID ( $0, \sigma^2_e$ ). Para grupos de procedencias se sustituyeron los términos donde aparece el efecto de procedencia por el de grupo.

Los componentes de varianza se estimaron con el procedimiento VARCOMP, con el algoritmo de máxima verosimilitud restringida (REML) de SAS (SAS Institute, 2002). Las estimaciones de heredabilidad en sentido restringido se obtuvieron con base en el análisis conjunto y en el efectuado por sitio (Falconer y Mackay, 1996):

$$h_i^2 = \frac{3\sigma_f^2}{\sigma_f^2 + \sigma_{sf}^2 + \sigma_e^2} \quad \text{Ecuación (2.13)}$$

$$h_i^2 = \frac{3\sigma_f^2}{\sigma_f^2 + \sigma_e^2} \quad \text{Ecuación (2.14)}$$

Dónde,  $\sigma_f^2$  es la varianza de familia;  $\sigma_{sf}^2$  la varianza de la interacción de sitio por familia; y  $\sigma_e^2$  la varianza del error.

Se calculó correlación de Pearson (fenotípica) entre diámetro normal y las variables fenológicas evaluadas, usando el procedimiento CORR de SAS (SAS Institute, 2002).

## 2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos, en los sitios y familias seleccionados y con las condiciones presentes en cada año de evaluación, la variación en el proceso de formación y desarrollo de estructuras reproductivas, así como en el de polinización, se presenta en diferentes niveles. Las diferencias más evidentes en estos procesos tienen que ver con la discrepancia entre el número de individuos que se incluyeron en la evaluación para su monitoreo y el número efectivo de árboles que produjeron conillos femeninos y amentos de estróbilos masculinos (Cuadro 2.1).

**Cuadro 2.1.** Comparación del número de individuos seleccionados contra individuos productivos de las familias de medios hermanos de *Pinus greggii* var. *australis* evaluadas.

| Familia | Cuautepéc            |      |   |      |   | Terrenate            |      |   |      |   |
|---------|----------------------|------|---|------|---|----------------------|------|---|------|---|
|         | Árboles<br>Evaluados | 2012 |   | 2013 |   | Árboles<br>Evaluados | 2012 |   | 2013 |   |
|         |                      | ♂    | ♀ | ♂    | ♀ |                      | ♂    | ♀ | ♂    | ♀ |
| 4       | 5                    | 3    | 1 | 2    | 3 | 5                    | 4    | 2 | 0    | 0 |
| 5       | 6                    | 6    | 2 | 3    | 5 | 10                   | 4    | 8 | 0    | 0 |
| 7       | 6                    | 6    | 5 | 6    | 4 | 6                    | 6    | 4 | 1    | 0 |
| 9       | 6                    | 6    | 3 | 5    | 4 | 6                    | 4    | 3 | 0    | 1 |
| 12      | 5                    | 2    | 2 | 1    | 4 | 7                    | 4    | 2 | 0    | 0 |
| 16      | 7                    | 5    | 2 | 5    | 6 | 7                    | 5    | 4 | 1    | 1 |
| 17      | 5                    | 5    | 1 | 2    | 3 | 7                    | 1    | 3 | 1    | 0 |
| 18      | 5                    | 3    | - | -    | 3 | 7                    | 4    | 3 | 0    | 0 |
| 21      | 6                    | 4    | 1 | 2    | 5 | 7                    | 3    | 1 | 0    | 0 |
| 22      | 4                    | 2    | - | 2    | 2 | 6                    | 4    | 4 | 0    | 0 |
| 25      | 6                    | 6    | 3 | 4    | 5 | 6                    | 5    | 2 | 1    | 0 |
| 26      | 7                    | 5    | 1 | 5    | 6 | 7                    | 6    | 5 | 1    | 0 |
| 27      | 6                    | 4    | 2 | 6    | 5 | 6                    | 1    | 5 | 0    | 0 |
| 28      | 6                    | 3    | 3 | 4    | 5 | 6                    | 5    | 2 | 1    | 1 |
| 29      | 6                    | 5    | 2 | 5    | 5 | 7                    | 3    | 5 | 0    | 0 |
| 30      | 6                    | 4    | 2 | 5    | 4 | 6                    | -    | - | 0    | 0 |
| 31      | 4                    | 3    | - | 3    | 2 | 8                    | 5    | 7 | 1    | 1 |
| 32      | 6                    | 4    | 1 | 1    | 4 | 8                    | 4    | 7 | 0    | 0 |
| 35      | 7                    | 3    | 1 | 1    | 5 | 8                    | 3    | 6 | 1    | 0 |
| 36      | 6                    | 5    | 1 | 4    | 6 | 7                    | 2    | 5 | 0    | 0 |
| 57      | 6                    | 5    | 3 | 4    | 5 | 9                    | 7    | 7 | 0    | 0 |
| 61      | 7                    | 5    | 4 | 5    | 6 | 7                    | 5    | 5 | 1    | 1 |
| 62      | 6                    | 6    | 3 | 4    | 6 | 10                   | 9    | 7 | 0    | 0 |

La baja producción de estróbilos en Terrenate ( $S_2$ ) en el 2013 se debe a las heladas ocurridas del 2 al 4 de marzo de ese año, a los periodos de sequía que se presentaron a la fecha y en años anteriores, y al suelo poco profundo y la presencia de tepetate en un rango de 0.5 a 1.5 m de profundidad que este sitio tiene, lo que hace limitativa la disponibilidad de agua. Esta situación forzó a no considerar el sitio ese año para los análisis estadísticos y fenológicos.

### 2.5.1. Caracterización de la fenología reproductiva a nivel sitio

Se determinaron las fechas y los periodos de desarrollo de estructuras reproductivas (floración) por año para el grupo de familias de medios hermanos seleccionadas de *Pinus greggii* var. *australis* en los dos sitios (repeticiones) del ensayo (Cuadro 2.2).

**Cuadro 2.2.** Inicio, término y duración promedio de las etapas de desarrollo fenológico de estructuras reproductivas en familias de *Pinus greggii* var. *australis* por ciclo.

| Sitio                  | Etapa Fen. | Sexo                  | Fase <sup>†</sup> | 2012  |        |        | 2013  |        |        |
|------------------------|------------|-----------------------|-------------------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
|                        |            |                       |                   | Medio | Mínimo | Máximo | Medio | Mínimo | Máximo |
| Cuautepec              | 1          | Femenino              | Inicio            | 75    | 75     | 75     | 77    | 70     | 95     |
|                        |            |                       | Término           | 93    | 90     | 118    | 120   | 105    | 136    |
|                        |            |                       | Duración          | 19    | 15     | 43     | 43    | 18     | 66     |
|                        |            | Masculino             | Inicio            | 75    | 75     | 75     | 64    | 60     | 81     |
|                        |            |                       | Término           | 98    | 90     | 104    | 113   | 91     | 123    |
|                        |            |                       | Duración          | 24    | 15     | 29     | 49    | 28     | 63     |
|                        | 2          | Femenino <sup>‡</sup> | Inicio            | 90    | 90     | 90     | 91    | 84     | 109    |
|                        |            |                       | Término           | 108   | 104    | 132    | 134   | 119    | 151    |
|                        |            |                       | Duración          | 19    | 14     | 43     | 43    | 18     | 67     |
|                        |            | Masculino             | Inicio            | 90    | 90     | 90     | 96    | 84     | 116    |
|                        |            |                       | Término           | 112   | 104    | 118    | 121   | 105    | 130    |
|                        |            |                       | Duración          | 23    | 14     | 28     | 25    | 7      | 39     |
|                        | 3          | Femenino <sup>‡</sup> | Inicio            | 104   | 104    | 104    | 105   | 98     | 123    |
|                        |            |                       | Término           | 122   | 118    | 146    | 153   | 144    | 158    |
|                        |            |                       | Duración          | 19    | 14     | 42     | 48    | 28     | 60     |
| Masculino <sup>‡</sup> |            | Inicio                | 104               | 104   | 104    | 106    | 95    | 126    |        |
|                        |            | Término               | 126               | 118   | 132    | 137    | 130   | 147    |        |
|                        |            | Duración              | 23                | 14    | 29     | 31     | 14    | 42     |        |

| Sitio                  | Etapa Fen. | Sexo                  | Fase <sup>†</sup> | 2012  |        |        | 2013  |        |        |
|------------------------|------------|-----------------------|-------------------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
|                        |            |                       |                   | Medio | Mínimo | Máximo | Medio | Mínimo | Máximo |
| Terrenate              | 1          | Femenino              | Inicio            | 92    | 81     | 118    | -     | -      | -      |
|                        |            |                       | Término           | 130   | 104    | 146    | -     | -      | -      |
|                        |            |                       | Duración          | 38    | 14     | 57     | -     | -      | -      |
|                        |            | Masculino             | Inicio            | 92    | 81     | 104    | -     | -      | -      |
|                        |            |                       | Término           | 129   | 104    | 146    | -     | -      | -      |
|                        |            |                       | Duración          | 37    | 14     | 65     | -     | -      | -      |
|                        | 2          | Femenino <sup>‡</sup> | Inicio            | 107   | 89     | 131    | -     | -      | -      |
|                        |            |                       | Término           | 143   | 118    | 157    | -     | -      | -      |
|                        |            |                       | Duración          | 36    | 14     | 57     | -     | -      | -      |
|                        |            | Masculino             | Inicio            | 107   | 89     | 131    | -     | -      | -      |
|                        |            |                       | Término           | 143   | 118    | 157    | -     | -      | -      |
|                        |            |                       | Duración          | 36    | 14     | 68     | -     | -      | -      |
|                        | 3          | Femenino <sup>‡</sup> | Inicio            | 121   | 104    | 146    | -     | -      | -      |
|                        |            |                       | Término           | 153   | 131    | 160    | -     | -      | -      |
|                        |            |                       | Duración          | 32    | 11     | 53     | -     | -      | -      |
| Masculino <sup>‡</sup> |            | Inicio                | 123               | 104   | 146    | -      | -     | -      |        |
|                        |            | Término               | 153               | 131   | 160    | -      | -     | -      |        |
|                        |            | Duración              | 30                | 14    | 57     | -      | -     | -      |        |

<sup>†</sup> Las fases inicio y término de las etapas fenológicas están expresadas en días julianos, mientras que la duración como número de días naturales. <sup>‡</sup> Se indica la etapa por sexo que se considera reproductiva.

a) Cuauhtepic ( $S_I$ ). En términos generales se observaron diferentes tendencias por sexo, con relación al número de individuos productivos entre el 2012 y el 2013: reducción en femeninos, de 74.6 a 59 %; y aumento en masculinos, de 36.1 a 76.9 %.

La duración total promedio del desarrollo completo de estróbilos (etapas 1, 2 y 3) fue mayor en 2013, con una diferencia de alrededor de 29 días para femeninos y 12 días para masculinos, más que en 2012 (76 contra 47 ♀, y 63 contra 51 ♂). Los periodos de receptividad de conillos (etapas 2 y 3) y dispersión de polen (etapa 3) también fueron mayores en 2013, por 30 días para femeninos (62 contra 32) y nueve para masculinos (31 contra 23).

b) Terrenate ( $S_2$ ). Durante el año 2012 se registró una participación del 57.7 % ♀ y 59.5 % ♂ del total de individuos incluidos en la evaluación. La producción de estróbilos en 2013 fue de apenas 5.5 % para femeninos y 3.1 % masculinos. La duración total promedio del desarrollo completo de estróbilos (etapas 1, 2 y 3) en el año 2012 fue de 61 días para ambos tipos de estróbilos. Los periodos de receptividad de conillos (etapas 2 y 3) y dispersión de polen (etapa 3) tuvieron una duración de 46 y 30 días respectivamente.

Se observó variación en la duración promedio de los periodos de receptividad y de dispersión de polen a nivel árbol de acuerdo al sitio y al año de evaluación: 28 ♀ y 14 días ♂ para Cuauhtepic en 2012; 27 ♀ y 13 días ♂ (rangos: 14-42 días ♀; 4-28 días ♂) para Terrenate en 2012; y por último, 42 ♀ y 20 días ♂ (rangos: 21-70 días ♀; 4-39 días ♂) para Cuauhtepic 2013.

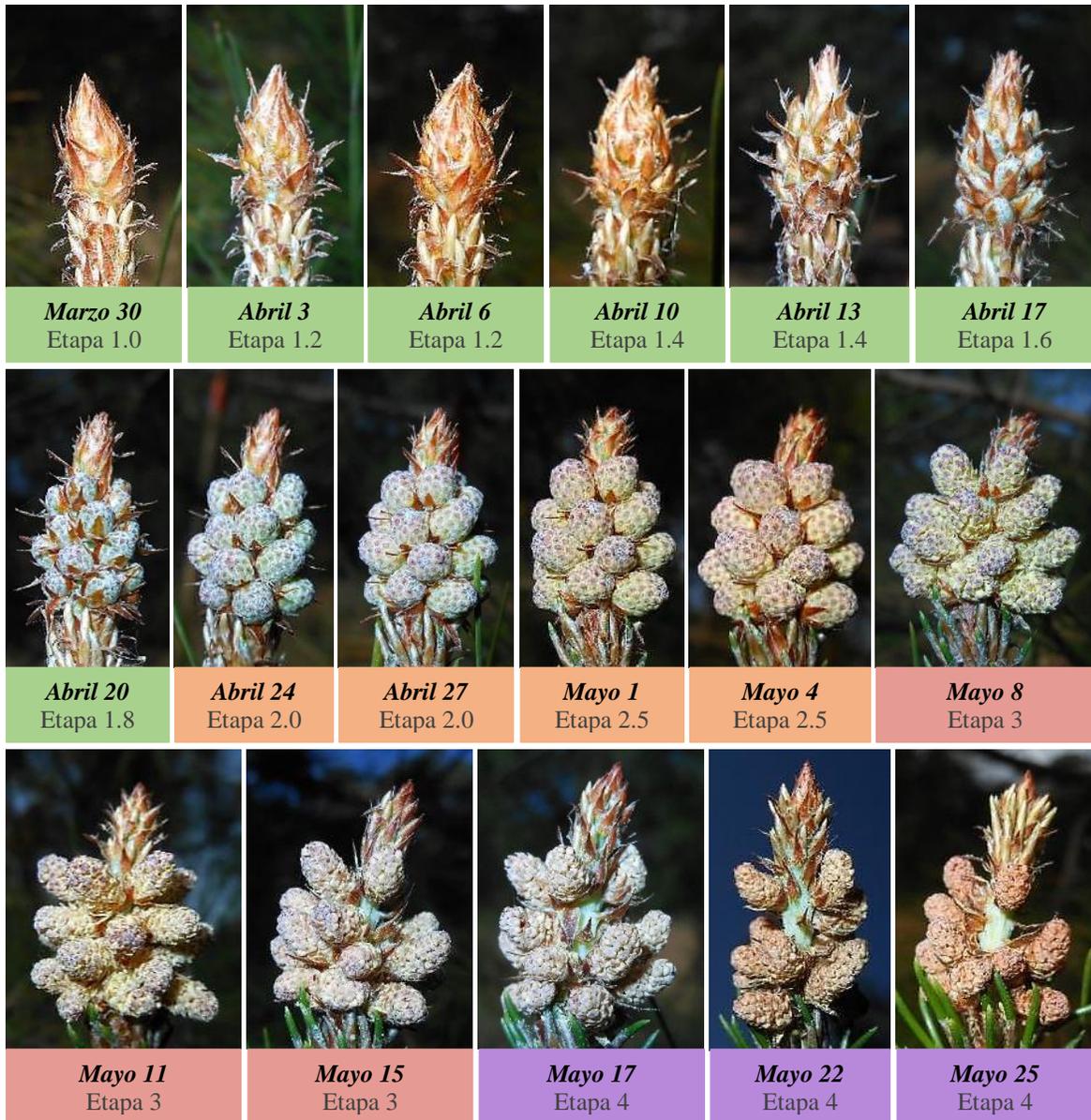
A nivel individual (por estróbilo ♀ y amento de estróbilos ♂) (Figuras 2.7 y 2.8), con las condiciones climatológicas presentes en el ensayo (solo 2013) y las condiciones físicas del arbolado (considerado como saludable), la duración del periodo de desarrollo desde la diferenciación hasta el término de receptividad ♀ y el marchitamiento de estróbilos ♂ se observó en rangos de 35 a 45 días y de 27 hasta 51 días, respectivamente. Por otro lado, la duración de los periodos reproductivos se registró en los rangos de 9 a 27 días (5 a 19 sólo etapa 3) para femeninos y de 3 a 12 días para masculinos (dependiendo de la cantidad de estróbilos por amento y la uniformidad en su maduración).

La temperatura y la humedad, así como las condiciones de estrés que se pueden generar a partir de ambas, están considerados como los principales factores que afectan los periodos de diferenciación de yemas florales, iniciación y de posterior desarrollo de estróbilos (Connor

et al., 1998; Webber, 2004). Se detectó que la duración del periodo de dispersión de polen puede acortarse debido a exceso de humedad, básicamente por periodos (días) continuos o eventos cortos de abundante lluvia, lo que provoca que en ocasiones el polen se apelmace dentro del estróbilo y este se degrade anticipadamente; y en contraste, condiciones extremas de sequía que favorecen la emisión de polen con mayor velocidad. Por otro lado, el periodo de desarrollo y receptividad de conillos puede ser alterado con mayor facilidad por la aparición de heladas tardías.



**Figura 2.7.** Registro del desarrollo fenológico de estróbilos femeninos de *Pinus greggii* var. *australis*, en Cuauhtec 2013. Fotografías tomadas en fechas de registros de datos; “d” indica daño físico.



**Figura 2.8.** Registro del desarrollo fenológico de estróbilos masculinos de *Pinus greggii* var. *australis*, en Cuauhtepac 2013. Fotografías tomadas en fechas de registros de datos.

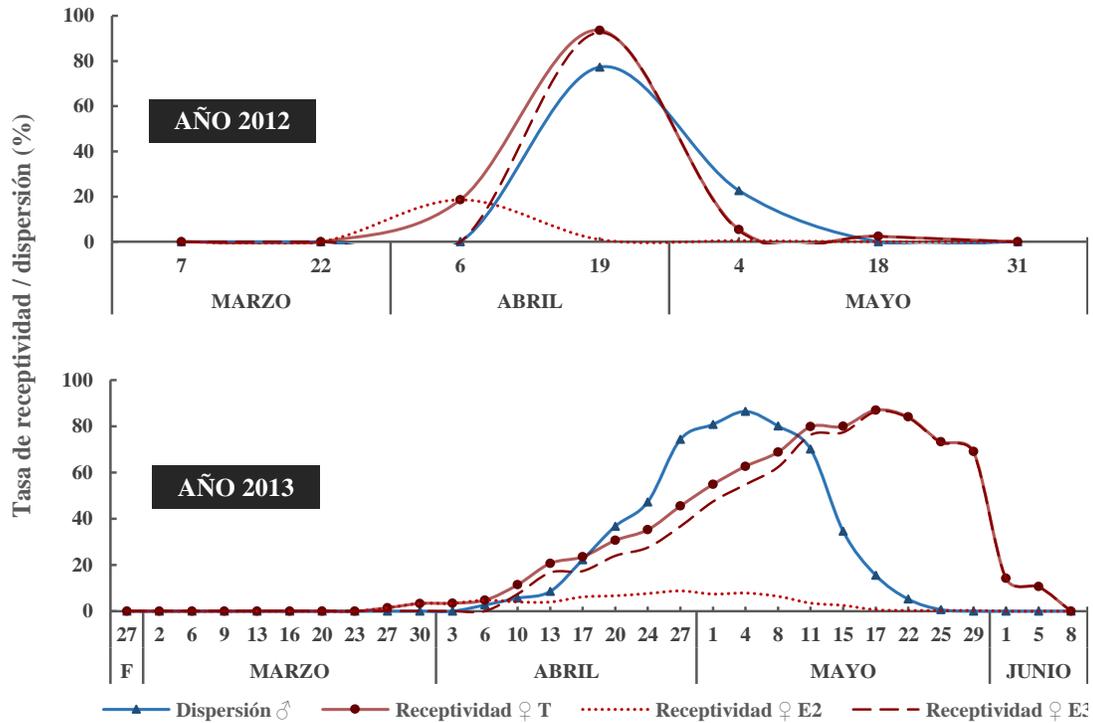
La diferenciación de las yemas en conillos femeninos o estróbilos de polen estuvo relacionada con la posición en la copa del árbol donde se encontraron: los estróbilos femeninos se desarrollaron principalmente en la mitad superior de la copa, en la zona del ápice y de las yemas terminales en las ramas; por su parte, los estróbilos masculinos se desarrollaron sobre las ramas de la mitad inferior de la copa en cantidades mayores.

Se observó un número importante de individuos que no produjeron estructuras reproductivas, sobre todo en Terrenate en 2013. Las condiciones de sequía pudieron haber afectado negativamente las tasas de fotosíntesis, de absorción de nutrientes y de transporte en la corriente transpiratoria, en detrimento de la energía requerida para cubrir el costo de producción y desarrollo de estructuras reproductivas (Obeso, 2002), sobre todo para conillos femeninos por el costo adicional de energía que representa el mantenimiento de este órgano para el posterior desarrollo de conos y formación de semillas (Meagher, 1988).

### **2.5.2. Sincronización fenológica a nivel sitio**

En Cuauhtepic ( $S_I$ ) se registró un patrón de comportamiento de las tasas de receptividad y de dispersión de polen promedio a nivel sitio moderadamente consistente comparando los ciclos de producción evaluados (2012 y 2013) (Figura 2.9). La receptividad de estróbilos femeninos inicio prácticamente en la misma fecha (marzo 22-23) y con aproximadamente 15 días de anticipación respecto al inicio de la emisión de polen, mientras el término del periodo reproductivo femenino ocurrió alrededor de 14 días después del masculino en ambos años.

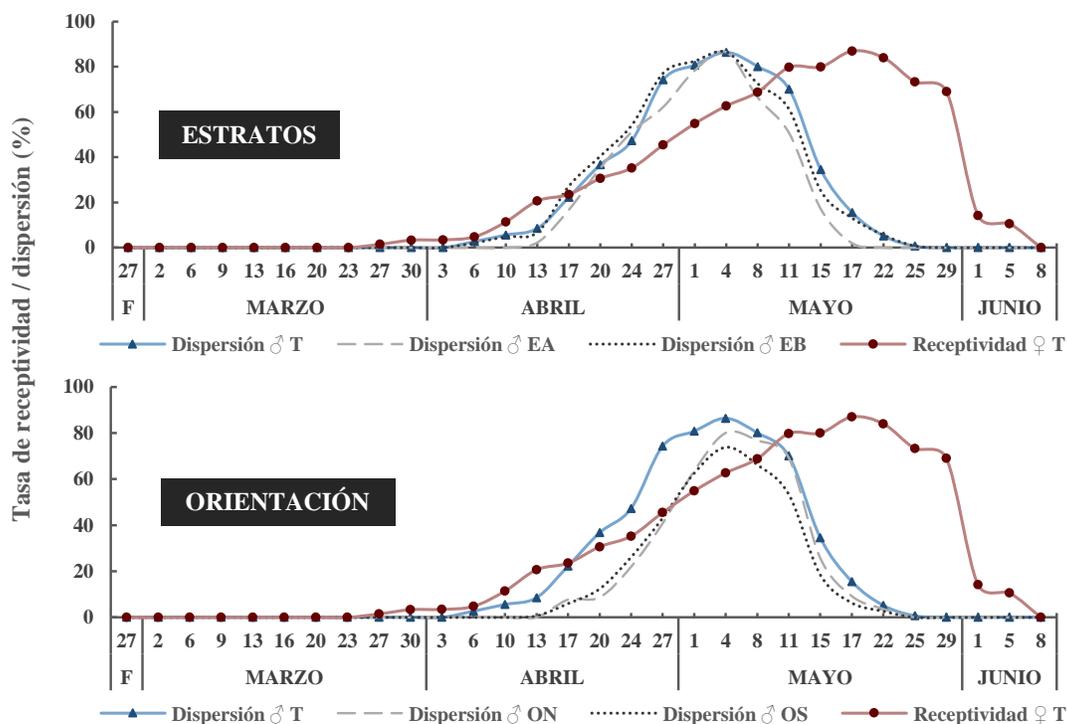
Por otro lado, se observaron diferencias en torno a la amplitud de dichos periodos y las fechas de máximos en las tasas de receptividad y dispersión de polen. El ciclo 2012 resultó más compacto y con máximos reproductivos (abril 19, 93.6 % ♀ y 77.3 % ♂) mejor sincronizados ( $PO_0=0.57$ ); en cambio, en 2013 ( $PO_0=0.38$ ) el máximo de receptividad (mayo 17, 87 %) se registró aproximadamente 13 días después que el máximo de dispersión de polen (mayo 4, 86.4 %). La amplitud y la forma gráfica de la tasa de receptividad en 2013 indican una afectación en el periodo de formación y desarrollo de estróbilos femeninos debido a la incidencia de heladas tardías en los primeros días del mes de marzo.



**Figura 2.9.** Traslapo fenológico general para *Pinus greggii* var. *australis* en Cuauhtec ( $S_1$ ) en 2012 y 2013. T= Total, E2= etapa 2 y E3= etapa 3.

En el ciclo reproductivo 2013 además se evaluó el comportamiento de la tasa de dispersión de polen a nivel de estrato y orientación en la copa del arbolado seleccionado (Figura 2.10). Se registró un comportamiento similar entre estratos, y entre estos y la tasa de dispersión de polen a nivel copa o árbol completo, con un máximo de 86.4 % en todos los casos. En general, el periodo de emisión de polen del estrato A se caracterizó por iniciar después y finalizar antes que el del estrato B, y por una cantidad menor en la producción de amentos de estróbilos masculinos en comparación con este último, características directamente relacionadas con la duración del periodo reproductivo masculino. El polen del estrato A (alto) ( $PO_0=0.31$ ) se dispersó por seis semanas (del 10 de abril al 22 de mayo), dos menos que el polen del estrato B (bajo) (3 de abril al 29 de mayo) ( $PO_0=0.38$ ).

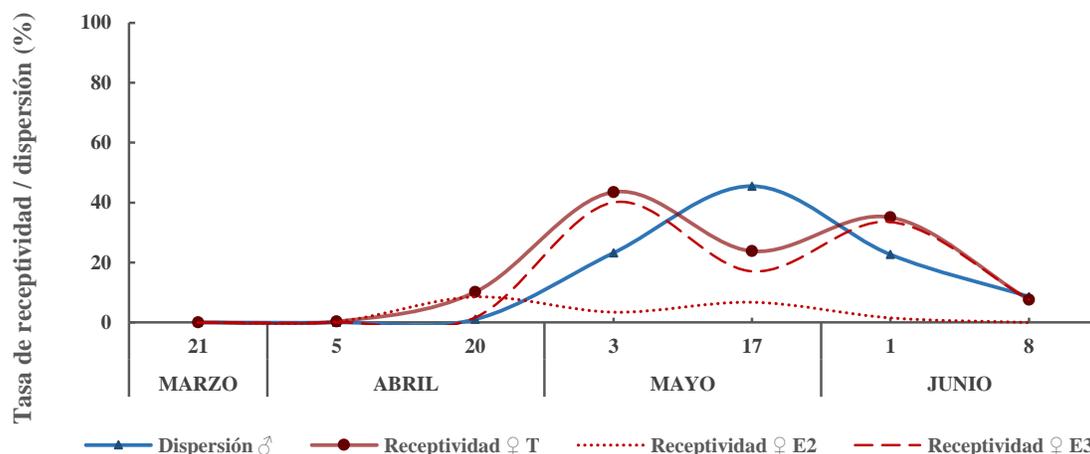
La evaluación del factor orientación de las ramas no mostró diferencias importantes (Figura 2.10). La orientación norte presentó un máximo de 80.1 % ( $PO_0=0.33$ ) en la tasa de dispersión, mientras la sur un 73.9 % ( $PO_0=0.32$ ). El periodo de dispersión de polen inició el 13 de abril (diez días después que a nivel copa completa) y tuvo una duración de 47 días.



**Figura 2.10.** Comparación de la tasa general de dispersión de polen en *Pinus greggii* var. *australis* por estrato y orientación, en 2013, en Cuauhtec (S<sub>1</sub>). T= Total, EA= estrato alto, EB= estrato bajo, ON= orientación norte y OS= orientación sur.

Por otro lado, en Terrenate (S<sub>2</sub>) (Figura 2.11) se registró un inicio tardío (5 ♀ y 20 ♂ de abril) y comportamiento más variable en comparación con Cuauhtec. Las tasas máximas de receptividad y dispersión de polen fueron de 43.5 % y 45.5 % respectivamente, en el ciclo de producción 2012. El 8 de junio se tomó el último registro en ese año (tasa de 7.6 % ambos sexos). La amplitud y la forma gráfica de la tasa de receptividad indican dos periodos

principales de producción de estróbilos femeninos, cuyos máximos de receptividad no coinciden con el de dispersión de polen ( $PO_0=0.31$ ).



**Figura 2.11.** Traslape fenológico general para *Pinus greggii* var. *australis* en Terrenate ( $S_2$ ) en 2012. T= Total, E2= etapa 2 y E3= etapa 3.

Los valores de sincronización promedio ( $PO_0$ ) encontrados en Cuauhtec en 2013 y Terrenate en 2012 (0.38 y 0.31 respectivamente) son menores a los reportados en huertos semilleros clonales de *Pinus sylvestris* 0.41 (Burczyk y Chalupka, 1997) y *P. radiata* 0.48 y 0.42 (Zas *et al.*, 2003; Codesido *et al.*, 2005). La variación que se registra en individuos de origen sexual es mayor que la variación en clones (White *et al.*, 2007); sin embargo, el valor del índice  $PO_0$  fue muy alto (0.57) en Cuauhtec en 2012.

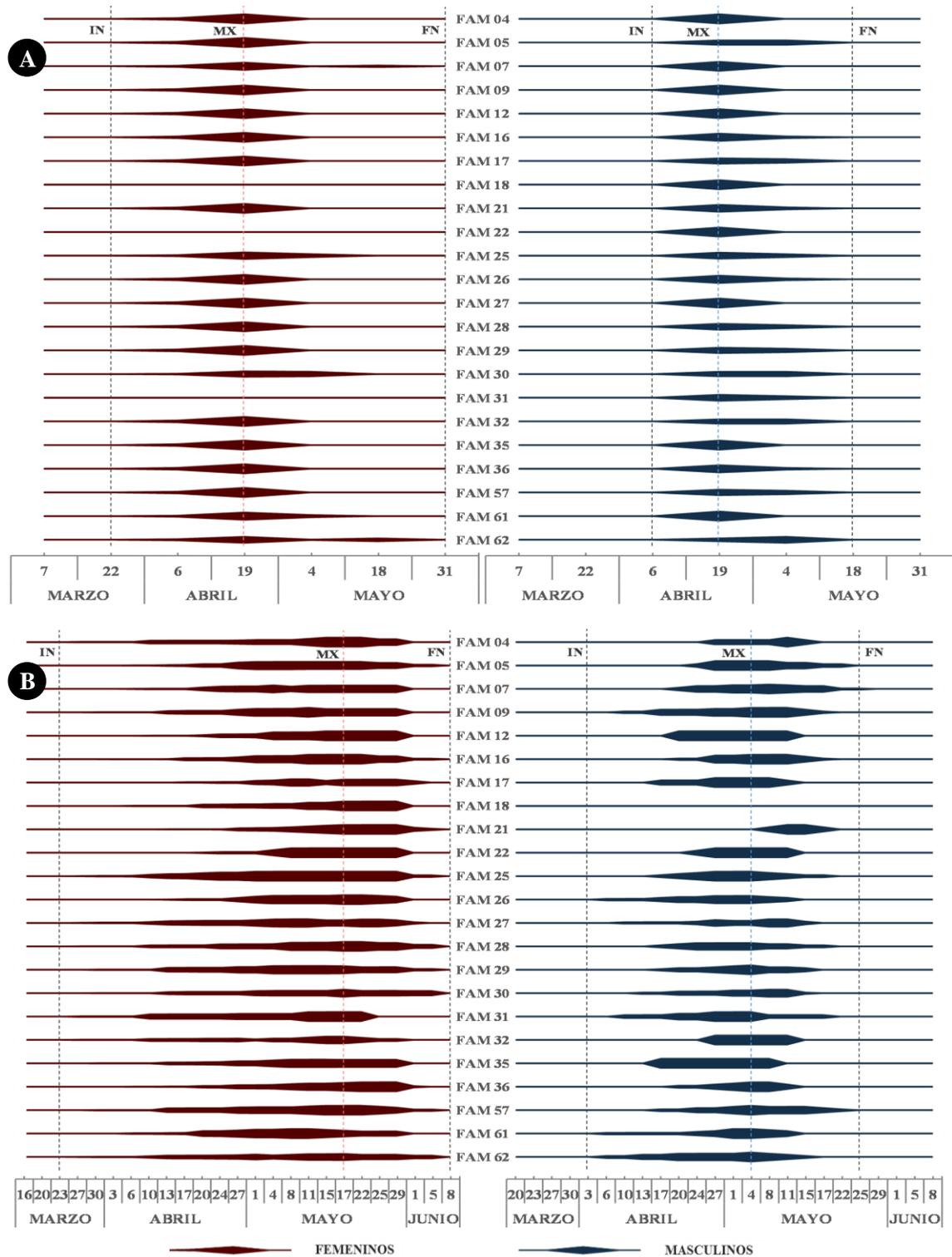
En los dos sitios se observó que el periodo de receptividad de estructuras reproductivas femeninas inició antes y fue más largo que el de dispersión de polen. Esta característica también se registró en otras especies de pinos como *Pinus nigra* (Matziris, 1994; Lario *et al.*, 2001; Alizoti *et al.*, 2010), *P. radiata* (Codesido *et al.*, 2005) y *P. sylvestris* (Burczyk y Chalupka, 1997).

El desfase de los picos máximos de receptividad y dispersión de polen para Cuauhtepic y Terrenate pudo deberse a las condiciones de sequía presentes en ambos sitios a lo largo de al menos tres años y seis meses (enero de 2010 a junio de 2013), con déficits de precipitación total de 637 mm (26 %) y 274 mm (15 %) respectivamente. Esta situación coincide con los resultados obtenidos por Alizoti *et al.* (2010), quienes reportan un desfase de 12 días entre receptividad de conillos femeninos y dispersión de polen (anticipada) en un huerto semillero clonal de *Pinus nigra*, debido a un incremento en la temperatura entre años y un déficit de precipitación de 230 mm (53 %) en un periodo de siete meses.

### **2.5.3. Sincronización fenológica a nivel familia**

Cuauhtepic ( $S_1$ ). Las 23 familias evaluadas tuvieron participación en el periodo reproductivo durante los dos años; sin embargo, las familias 18, 22 y 31 desarrollaron solo estróbilos masculinos el primer año, mientras que la familia 18 produjo solo femeninos el segundo ciclo. En el 2012 las familias tuvieron un inicio de receptividad y dispersión de polen uniforme entre ellas, con poca variación respecto a la duración del periodo reproductivo, sobre todo para estróbilos femeninos (32 ♀ y 23 ♂ días duración promedio) (Figura 2.12).

En contraste, la receptividad y la dispersión de polen de las familias registraron mayor variabilidad durante el año 2013; el periodo de receptividad fue de 62 días, 30 más que el ciclo anterior y con los máximos sesgados hacia la parte final del periodo reproductivo (Figura 2.12). La dispersión de polen fue de 32 días promedio; la familia 21 destaca con un inicio tardío y una menor duración que el resto (mayo 4, y 18 días).



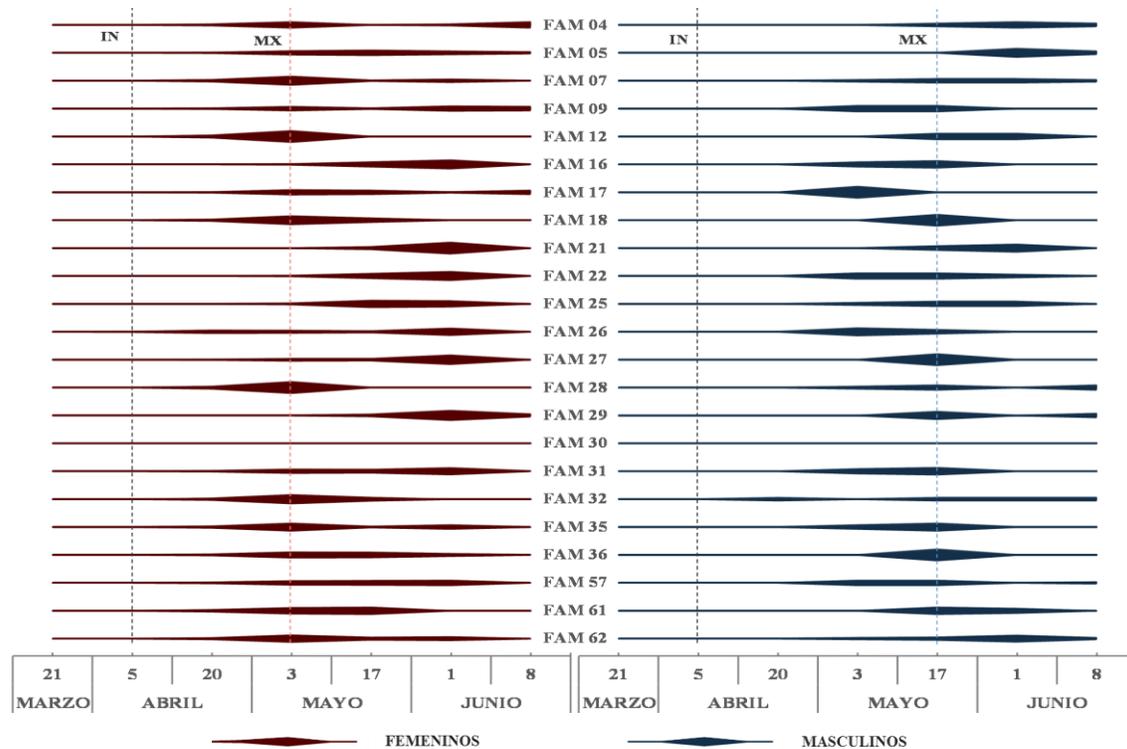
**Figura 2.12.** Fenogramas de receptividad y dispersión de polen de 23 familias de *Pinus greggii* var. *australis* en Cuauhtepac ( $S_i$ ). A, ciclo de producción 2012; y B, ciclo 2013. IN= inicio, MX= máximo y FN= término.

El comportamiento de las familias no presentó grandes diferencias considerables entre éstas en 2013; sin embargo, los resultados obtenidos y la representación gráfica de cada una indican que las diferencias se presentaron dentro de ellas, entre los individuos que las conforman, o incluso en niveles inferiores. Además, todas las familias participantes tuvieron la posibilidad de cruzarse entre sí, con mayor o menor nivel de sincronía, durante ambos ciclos.

Durante el año 2013 se presentaron problemas de sincronía en dos periodos bien definidos: el primero del 17 de abril al 8 de mayo, en donde los valores de la tasa de receptividad (24-69 %) fueron menores a los de dispersión de polen (30-80 %); el segundo periodo del 15 al 29 de mayo, en el cual se invirtió dicha situación (77-68 % ♀ contra 34-0 % ♂) y que resulta más grave, en perjuicio de un adecuado proceso de polinización y de obtención de semilla. También en el 2013 se observa claramente que los niveles máximos de floración femenina ocurrieron sesgados hacia las fechas más tardías del periodo de monitoreo. Esto ocurrió como consecuencia de las heladas tardías sucedidas a principios del mes de marzo, lo que ocasionó el daño y posteriormente la muerte del 90 % de los estróbilos femeninos formados en esas fechas.

Terrenate ( $S_2$ ). Sólo se realizó la evaluación del ciclo 2012 debido a la casi nula producción de estróbilos durante el 2013. Se detectó un comportamiento altamente variable en la duración de los periodos de receptividad y emisión de polen de las familias evaluadas (48 ♀ y 30 ♂ días promedio), sin la participación de la 30 (Figura 2.13). Sólo las familias 5, 25 y 61 registraron un máximo de receptividad (54.2 % promedio de las tres y 24.9 % general) al momento que la tasa de dispersión de polen alcanzó su nivel más alto (48.1 %). Las familias 4, 7, 12, 17, 18, 28, 32, 35, 36 y 62 presentaron máximos de receptividad dos

semanas antes del máximo de dispersión de polen y nueve familias más posteriormente (familias 9, 16, 21, 22, 26, 27, 29, 31 y 57).



**Figura 2.13.** Fenogramas de receptividad y dispersión de polen de 23 familias de *Pinus greggii* var. *australis* en Terrenate ( $S_2$ ), en 2012. IN= inicio y MX= máximo.

Los periodos de floración femenina de ocho familias (4, 12, 18, 21, 28, 29, 32 y 61) y los de floración masculina de diez familias (4, 5, 12, 17, 18, 21, 27, 29, 36 y 61) se desfasaron por completo del periodo de floración masculina y femenina (respectivamente) de al menos una de las familias evaluadas restantes. Presumiblemente las familias involucradas aportaron menos genes en el lote de semillas que se generó. Las inconsistencias en el nivel de sincronía en el sitio indican que el proceso de cruzamiento entre las familias evaluadas no fue el óptimo, y como consecuencia hubo una alta proporción de semilla vana y óvulos abortivos en el análisis de conos realizado para la producción de ese año.

Los valores del índice de sincronización para las familias evaluadas en Cuauhtepic en 2013 y Terrenate en 2012 fueron similares a los valores de los índices esperados en un huerto semillero sexual (Cuadro 2.3).

**Cuadro 2.3.** Índice de sincronización fenológica PO promedio a nivel de familias de *Pinus greggii* var. *australis*.

| Fam <sup>†</sup> | Cuauhtepic 2012       |              |            |              | Cuauhtepic 2013 |              |            |              | Terrenate 2012 |              |            |              |
|------------------|-----------------------|--------------|------------|--------------|-----------------|--------------|------------|--------------|----------------|--------------|------------|--------------|
|                  | $\bar{PO}^{\ddagger}$ | ♀<br>min-max | $\bar{PO}$ | ♂<br>min-max | $\bar{PO}$      | ♀<br>min-max | $\bar{PO}$ | ♂<br>min-max | $\bar{PO}$     | ♀<br>min-max | $\bar{PO}$ | ♂<br>min-max |
| 4                | 0.56                  | 0.18-0.83    | 0.75       | 0.38-0.83    | 0.35            | 0.22-0.48    | 0.34       | 0.26-0.38    | 0.20           | 0.00-0.38    | 0.32       | 0.00-0.64    |
| 5                | 0.58                  | 0.18-0.83    | 0.35       | 0.29-0.83    | 0.46            | 0.28-0.66    | 0.43       | 0.33-0.60    | 0.46           | 0.17-0.69    | 0.25       | 0.00-0.76    |
| 7                | 0.50                  | 0.20-0.62    | 0.76       | 0.38-0.83    | 0.44            | 0.28-0.62    | 0.52       | 0.36-0.74    | 0.23           | 0.02-0.52    | 0.39       | 0.08-0.69    |
| 9                | 0.56                  | 0.18-0.83    | 0.75       | 0.38-0.83    | 0.46            | 0.29-0.62    | 0.44       | 0.25-0.68    | 0.30           | 0.03-0.50    | 0.38       | 0.08-0.78    |
| 12               | 0.56                  | 0.18-0.83    | 0.75       | 0.38-0.83    | 0.36            | 0.22-0.52    | 0.32       | 0.17-0.54    | 0.15           | 0.00-0.83    | 0.35       | 0.00-0.83    |
| 16               | 0.57                  | 0.18-0.83    | 0.59       | 0.50-0.83    | 0.41            | 0.27-0.58    | 0.41       | 0.29-0.60    | 0.38           | 0.02-0.83    | 0.34       | 0.08-0.78    |
| 17               | 0.58                  | 0.18-0.83    | 0.43       | 0.38-0.83    | 0.33            | 0.18-0.46    | 0.34       | 0.18-0.51    | 0.38           | 0.17-0.66    | 0.29       | 0.00-0.83    |
| 18               | -                     | -            | 0.76       | 0.38-0.83    | 0.33            | 0.19-0.47    | -          | -            | 0.33           | 0.00-0.83    | 0.13       | 0.00-0.38    |
| 21               | 0.57                  | 0.18-0.83    | 0.55       | 0.50-0.83    | 0.25            | 0.12-0.37    | 0.29       | 0.22-0.36    | 0.23           | 0.00-0.52    | 0.34       | 0.00-0.83    |
| 22               | -                     | -            | 0.76       | 0.38-0.83    | 0.31            | 0.18-0.46    | 0.32       | 0.19-0.51    | 0.37           | 0.02-0.83    | 0.46       | 0.20-0.84    |
| 25               | 0.63                  | 0.43-0.83    | 0.47       | 0.43-0.74    | 0.41            | 0.22-0.56    | 0.37       | 0.23-0.55    | 0.44           | 0.05-0.83    | 0.41       | 0.10-0.77    |
| 26               | 0.57                  | 0.18-0.83    | 0.59       | 0.50-0.83    | 0.42            | 0.27-0.58    | 0.35       | 0.17-0.51    | 0.27           | 0.06-0.56    | 0.41       | 0.08-0.83    |
| 27               | 0.56                  | 0.18-0.83    | 0.75       | 0.38-0.83    | 0.44            | 0.25-0.58    | 0.41       | 0.26-0.49    | 0.31           | 0.08-0.60    | 0.13       | 0.00-0.38    |
| 28               | 0.58                  | 0.18-0.83    | 0.49       | 0.43-0.83    | 0.36            | 0.24-0.50    | 0.39       | 0.25-0.53    | 0.15           | 0.00-0.83    | 0.28       | 0.10-0.65    |
| 29               | 0.58                  | 0.18-0.83    | 0.43       | 0.38-0.83    | 0.45            | 0.26-0.60    | 0.39       | 0.26-0.52    | 0.28           | 0.00-0.76    | 0.17       | 0.00-0.43    |
| 30               | 0.58                  | 0.38-0.83    | 0.32       | 0.29-0.61    | 0.36            | 0.23-0.48    | 0.41       | 0.25-0.49    | -              | -            | -          | -            |
| 31               | -                     | -            | 0.48       | 0.43-0.83    | 0.43            | 0.31-0.56    | 0.36       | 0.21-0.51    | 0.39           | 0.13-0.68    | 0.34       | 0.08-0.78    |
| 32               | 0.58                  | 0.18-0.83    | 0.35       | 0.29-0.83    | 0.36            | 0.19-0.51    | 0.30       | 0.19-0.46    | 0.30           | 0.00-0.76    | 0.30       | 0.10-0.46    |
| 35               | 0.56                  | 0.18-0.83    | 0.75       | 0.38-0.83    | 0.42            | 0.30-0.58    | 0.26       | 0.11-0.42    | 0.27           | 0.03-0.61    | 0.31       | 0.08-0.69    |
| 36               | 0.57                  | 0.18-0.83    | 0.59       | 0.50-0.83    | 0.33            | 0.18-0.47    | 0.33       | 0.21-0.44    | 0.44           | 0.10-0.84    | 0.13       | 0.00-0.38    |
| 57               | 0.58                  | 0.18-0.83    | 0.43       | 0.38-0.83    | 0.40            | 0.27-0.53    | 0.52       | 0.36-0.65    | 0.43           | 0.18-0.77    | 0.36       | 0.10-0.66    |
| 61               | 0.65                  | 0.36-0.83    | 0.76       | 0.38-0.83    | 0.53            | 0.30-0.74    | 0.36       | 0.20-0.46    | 0.40           | 0.00-0.78    | 0.30       | 0.00-0.83    |
| 62               | 0.45                  | 0.35-0.50    | 0.22       | 0.18-0.61    | 0.38            | 0.25-0.52    | 0.37       | 0.19-0.52    | 0.33           | 0.10-0.63    | 0.38       | 0.05-0.68    |

<sup>†</sup> Fam= Familia; <sup>‡</sup> Valores del índice  $\bar{PO}$  varían entre 0.00 (mínimo) y 1.00 (máximo teórico).

Cuauhtepic 2012. Los valores del índice PO a nivel familia fueron altos y contrastan con Terrenate en 2012 y los resultados de 2013. Para receptividad de estróbilos femeninos, 17 de las 20 familias participantes obtuvieron valores entre 0.50 y 0.58, el valor máximo fue de

0.65 (familia 61), mientras el mínimo registrado fue de 0.45 (familia 62). Respecto a la dispersión de polen, nueve de las 23 familias obtuvieron valores de 0.75 o 0.76 (máximos), diez familias con valores entre 0.43 y 0.59, y cuatro los más bajos entre 0.22 y 0.35 (familias 5, 30, 32 y 62). Este comportamiento particular respecto a los altos niveles de sincronía de las familias en 2012 pudo verse influenciado por el número de registros obtenidos con un mayor intervalo de tiempo entre visitas al sitio para el registro de datos.

Cuautepec 2013. La familia que tuvo mayor participación como receptora de polen fue la 61 (0.53), 11 familias presentaron sincronía en un rango de 0.40 a 0.46, otras diez en un rango de 0.31 a 0.38 y la familia que menor participación tuvo fue la 21 con 0.25. Por su parte, las familias que tuvieron una mayor intervención como polinizadores fueron la 9 y 57 (0.52), cinco familias presentaron sincronía en un rango de 0.41 a 0.44, 13 más entre 0.30 y 0.39 y las familias 21 y 35 con la menor participación (0.29 y 0.26 respectivamente).

Terrenate 2012. Las familias 5, 25, 36, 57 y 61 participaron como las mejores receptoras de polen (rango de 0.40 a 0.46), y las familias 12 y 28 como las peores (0.15). Nueve familias registraron valores del índice de sincronía entre 0.30 y 0.39 y seis más entre 0.20 y 0.28. Por otra parte, las familias que participaron más como polinizadores fueron la 22, 25 y 26 (entre 0.41 y 0.46), las que menor participación tuvieron son 18, 27, 29 y 36 (entre 0.13 y 0.17) y 15 familias presentaron valores de sincronía entre 0.25 y 0.39.

En general, no se detectaron tendencias entre años sobre el comportamiento de las familias de medios hermanos como polinizadores o receptores de polen en los dos sitios, debido a los valores obtenidos el primer ciclo en Cuautepec y por la caída de la producción de estróbilos en Terrenate en 2013; sin embargo, las familias 7 ♂ y 61 ♀ presentaron los valores más altos del índice (PO) durante los dos años de evaluación en Cuautepec.

Los índices Rd y rph corroboran los resultados obtenidos con el índice de sincronización fenológica (PO) para todos los sitios y años (Cuadro 2.4); esto fue más evidente en Cuauhteppec en 2012, donde se registraron periodos de sincronización muy cortos y uniformes entre la receptividad y la dispersión de polen de cada familia con el resto. Las correlaciones a nivel familia fueron positivas en todos los casos (muy altas en Cuauhteppec en 2012).

**Cuadro 2.4.** Índices Rd y de correlación fenológica rph a nivel de familia en *Pinus greggii* var. *australis*.

| Familia | Cuauhteppec 2012 |                  |    |      | Cuauhteppec 2013 |      |    |      | Terenate 2012 |      |    |      |
|---------|------------------|------------------|----|------|------------------|------|----|------|---------------|------|----|------|
|         | ♀                |                  | ♂  |      | ♀                |      | ♂  |      | ♀             |      | ♂  |      |
|         | Rd <sup>†</sup>  | rph <sup>‡</sup> | Rd | rph  | Rd               | rph  | Rd | rph  | Rd            | rph  | Rd | rph  |
| 4       | 14               | 0.92             | 14 | 0.98 | 33               | 0.43 | 21 | 0.58 | 31            | 0.04 | 23 | 0.41 |
| 5       | 14               | 0.93             | 17 | 0.65 | 32               | 0.73 | 32 | 0.65 | 31            | 0.96 | 9  | 0.38 |
| 7       | 24               | 0.90             | 14 | 0.98 | 32               | 0.64 | 38 | 0.73 | 29            | 0.30 | 35 | 0.73 |
| 9       | 14               | 0.92             | 14 | 0.98 | 32               | 0.71 | 40 | 0.57 | 31            | 0.31 | 26 | 0.67 |
| 12      | 14               | 0.92             | 14 | 0.98 | 32               | 0.46 | 25 | 0.44 | 9             | 0.19 | 23 | 0.54 |
| 16      | 14               | 0.93             | 17 | 0.95 | 32               | 0.59 | 31 | 0.61 | 29            | 0.66 | 26 | 0.57 |
| 17      | 14               | 0.93             | 17 | 0.80 | 30               | 0.48 | 28 | 0.43 | 31            | 0.60 | 12 | 0.67 |
| 18      | -                | -                | 14 | 0.98 | 32               | 0.36 | -  | -    | 23            | 0.55 | 13 | 0.16 |
| 21      | 14               | 0.93             | 17 | 0.93 | 31               | 0.22 | 14 | 0.59 | 20            | 0.33 | 22 | 0.45 |
| 22      | -                | -                | 14 | 0.98 | 28               | 0.40 | 21 | 0.48 | 28            | 0.64 | 34 | 0.85 |
| 25      | 23               | 0.97             | 17 | 0.86 | 32               | 0.70 | 34 | 0.50 | 28            | 0.87 | 34 | 0.73 |
| 26      | 14               | 0.93             | 17 | 0.95 | 31               | 0.60 | 37 | 0.37 | 29            | 0.32 | 26 | 0.75 |
| 27      | 14               | 0.92             | 14 | 0.98 | 32               | 0.69 | 37 | 0.54 | 30            | 0.47 | 13 | 0.18 |
| 28      | 14               | 0.93             | 17 | 0.87 | 32               | 0.48 | 34 | 0.52 | 9             | 0.16 | 36 | 0.21 |
| 29      | 14               | 0.93             | 17 | 0.80 | 32               | 0.75 | 31 | 0.52 | 21            | 0.36 | 23 | 0.04 |
| 30      | 23               | 0.88             | 17 | 0.63 | 32               | 0.51 | 34 | 0.53 | -             | -    | -  | -    |
| 31      | -                | -                | 17 | 0.87 | 31               | 0.64 | 40 | 0.44 | 29            | 0.67 | 26 | 0.57 |
| 32      | 14               | 0.93             | 17 | 0.65 | 33               | 0.52 | 18 | 0.48 | 21            | 0.48 | 47 | 0.17 |
| 35      | 14               | 0.92             | 14 | 0.98 | 32               | 0.60 | 24 | 0.30 | 29            | 0.35 | 26 | 0.50 |
| 36      | 14               | 0.93             | 17 | 0.95 | 32               | 0.37 | 25 | 0.47 | 30            | 0.87 | 13 | 0.15 |
| 57      | 14               | 0.93             | 17 | 0.80 | 32               | 0.58 | 38 | 0.72 | 29            | 0.85 | 35 | 0.61 |
| 61      | 24               | 0.98             | 14 | 0.98 | 32               | 0.87 | 36 | 0.42 | 23            | 0.79 | 22 | 0.42 |
| 62      | 23               | 0.84             | 17 | 0.33 | 32               | 0.60 | 39 | 0.40 | 29            | 0.55 | 35 | 0.65 |

† Valores de Rd expresados como número de días naturales; ‡ rph con valores entre -1 y 1.

En términos generales, el comportamiento de la sincronía entre las familias durante 2012 y 2013 fue mucho más estable en el sitio Cuauhteppec; sin embargo, se detectó cierta variación,

importante en algunos casos, entre los individuos que conforman cada una de las familias evaluadas. Esto se fue más evidente en Terrenate en donde algunos individuos, aunque productivos, no tuvieron participación en el proceso de polinización. Esta variación en la producción de estróbilos y en la sincronización se ha observado en especies del género *Pinus* y otras coníferas regularmente a edades tempranas y en huertos semilleros de primera generación (El-Kassaby *et al.*, 1988; Matziris, 1994). En estos casos, el empleo de reguladores de crecimiento y de cruzas controladas son alternativas para maximizar la participación de los individuos de interés.

#### **2.5.4. Sincronización fenológica en grupos de familias de interés**

Se calculó un índice de sincronización fenológica ( $PO_{ij}$ ) para cada par posible de familias de medios hermanos con énfasis en dos grupos de interés y sus combinaciones (Cuadros 2.5, 2.6 y 2.7). Se diseñaron cruzas entre grupos de interés de acuerdo con las características de rendimiento, sexo y una ganancia en volumen esperada: mayor rendimiento ♂ x mayor rendimiento ♀ ( $g_1$ -mayor ganancia), mayor rendimiento ♂ x menor rendimiento ♀ ( $g_2$ ), menor rendimiento ♂ x mayor rendimiento ♀ ( $g_3$ ) y menor rendimiento ♂ x menor rendimiento ♀ ( $g_4$ -menor ganancia). Se detectó variación en la composición de los grupos de interés de acuerdo con la repetición del ensayo; sin embargo, las familias 7, 25, 26, 27, 30, 57, 61 y 62 fueron superiores en ambos sitios, y las familias 12, 18, 22, 31, 32, 35 y 36 inferiores en ambos lugares. Las familias 4, 5, 9, 16, 17, 21, 28 y 29 se intercalaron entre las mejores y las peores según el sitio.

Cuautepec ( $S_I$ ). El ciclo 2012 se caracterizó por la obtención de valores altos del índice de sincronización promedio por grupo de crecimiento. El grupo de cruzas entre familias de

mayor rendimiento ( $g_1$ ) obtuvo uno de los valores más bajos de los cuatro grupos ( $PO=0.53$ ) lo que puede significar problemas de manejo en un esquema de mejoramiento para ganancia en volumen. Esto se debe a que el polen proveniente del grupo de familias de menor rendimiento tuvo una probabilidad mayor de participar en el proceso de fertilización ( $PO=0.61$   $g_3$  y  $PO=0.65$   $g_4$ ).

Por otra parte, para el ciclo 2013 se obtuvieron valores de PO más bajos para los grupos de cruza de interés pero más favorables que los registrados en 2012. Los grupos  $g_1$  y  $g_2$  obtuvieron los valores más altos del índice PO (0.42 y 0.40, respectivamente), con una probabilidad alta de que el polen del grupo de familias con mayor volumen fertilice los óvulos de todas las familias. De acuerdo a los valores obtenidos del índice  $PO_{ij}$ , todas las familias participantes tuvieron la posibilidad de cruzarse entre sí en mayor o menor grado durante los dos ciclos de producción.

Terrenate ( $S_2$ ). Los valores del índice PO que se obtuvieron en 2012 son los más bajos (tomando en cuenta ambos sitios) como consecuencia de la variabilidad en los periodos de receptividad y dispersión de polen de las familias en este sitio; sin embargo, se presentó una situación similar a la de Cuatepec en 2013, en donde el polen proveniente del grupo de familias de mayor rendimiento tuvo mayor probabilidad de polinizar a todas las familias ( $PO=0.31$   $g_1$  y  $PO=0.34$   $g_2$ ). Por otro lado, se detectó un número importante de pares de familias sin posibilidad de cruzarse ( $PO_{ij}=0.00$ ). Las familias del grupo de mayor rendimiento que presentaron esta situación son la 4 y 28 ♀ y la 4, 27 y 61 ♂ para algunas cruza entre sí ( $g_1$ ). Las familias 4, 28, 29 y 61 ♀ y 4, 27, 29 y 61 ♂ estuvieron desfasadas para algunas combinaciones con familias del grupo de menor rendimiento.

**Cuadro 2.5.** Índice PO<sub>ij</sub> para cada par de familias de *Pinus greggii* var. *australis* por grupos de interés, Cuauhtepic 2012.

|             |             | Familias con producción de estróbilos ♂          |             |             |             |             |             |             |             |             |             |  |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |      |
|-------------|-------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|
|             |             | Mayor rendimiento ♂ x mayor rendimiento ♀        |             |             |             |             |             |             |             |             |             | Menor rendimiento ♂ x mayor rendimiento ♀        |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |      |
|             |             | 5  | 7           | 16          | 17          | 21          | 25          | 26          | 27          | 30          | 57          | 61   | 62          | PO ♀        | 4           | 9           | 12          | 18          | 22          | 28          | 29          | 31          | 32          | 35          | 36          | PO ♀ |
| 5           | -           | 0.83   | 0.57        | 0.38        | 0.52        | 0.43        | 0.57        | 0.83        | 0.29        | 0.38        | 0.83        | 0.18   | 0.53        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.43        | 0.38        | 0.43        | 0.29        | 0.83        | 0.57        | 0.65 |
| 7           | 0.33        | -  | 0.62        | 0.41        | 0.56        | 0.47        | 0.62        | 0.57        | 0.33        | 0.41        | 0.57        | 0.20   | 0.46        | 0.57        | 0.57        | 0.57        | 0.57        | 0.57        | 0.47        | 0.41        | 0.47        | 0.33        | 0.57        | 0.62        | 0.52        |      |
| 16          | 0.29        | 0.83   | -           | 0.38        | 0.52        | 0.43        | 0.57        | 0.83        | 0.29        | 0.38        | 0.83        | 0.18   | 0.50        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.43        | 0.38        | 0.43        | 0.29        | 0.83        | 0.57        | 0.65        |      |
| 17          | 0.29        | 0.83   | 0.57        | -           | 0.52        | 0.43        | 0.57        | 0.83        | 0.29        | 0.38        | 0.83        | 0.18   | 0.52        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.43        | 0.38        | 0.43        | 0.29        | 0.83        | 0.57        | 0.65        |      |
| 21          | 0.29        | 0.83   | 0.57        | 0.38        | -           | 0.43        | 0.57        | 0.83        | 0.29        | 0.38        | 0.83        | 0.18   | 0.51        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.43        | 0.38        | 0.43        | 0.29        | 0.83        | 0.57        | 0.65        |      |
| 25          | 0.61        | 0.50   | 0.74        | 0.74        | 0.81        | -           | 0.74        | 0.50        | 0.61        | 0.74        | 0.50        | 0.43   | 0.63        | 0.50        | 0.50        | 0.50        | 0.50        | 0.50        | 0.83        | 0.74        | 0.83        | 0.61        | 0.50        | 0.74        | 0.61        |      |
| 26          | 0.29        | 0.83   | 0.57        | 0.38        | 0.52        | 0.43        | -           | 0.83        | 0.29        | 0.38        | 0.83        | 0.18   | 0.50        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.43        | 0.38        | 0.43        | 0.29        | 0.83        | 0.57        | 0.65        |      |
| 27          | 0.29        | 0.83   | 0.57        | 0.38        | 0.52        | 0.43        | 0.57        | -           | 0.29        | 0.38        | 0.83        | 0.18   | 0.48        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.43        | 0.38        | 0.43        | 0.29        | 0.83        | 0.57        | 0.65        |      |
| 30          | 0.83        | 0.38   | 0.57        | 0.83        | 0.63        | 0.74        | 0.57        | 0.38        | -           | 0.83        | 0.38        | 0.61   | 0.61        | 0.38        | 0.38        | 0.38        | 0.38        | 0.38        | 0.74        | 0.83        | 0.74        | 0.83        | 0.38        | 0.57        | 0.54        |      |
| 57          | 0.29        | 0.83   | 0.57        | 0.38        | 0.52        | 0.43        | 0.57        | 0.83        | 0.29        | -           | 0.83        | 0.18   | 0.52        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.43        | 0.38        | 0.43        | 0.29        | 0.83        | 0.57        | 0.65        |      |
| 61          | 0.52        | 0.57   | 0.83        | 0.63        | 0.83        | 0.71        | 0.83        | 0.57        | 0.52        | 0.63        | -           | 0.36   | 0.64        | 0.57        | 0.57        | 0.57        | 0.57        | 0.57        | 0.71        | 0.63        | 0.71        | 0.52        | 0.57        | 0.83        | 0.62        |      |
| 62          | 0.35        | 0.43   | 0.50        | 0.43        | 0.50        | 0.50        | 0.50        | 0.43        | 0.35        | 0.43        | 0.43        | -  | 0.44        | 0.43        | 0.43        | 0.43        | 0.43        | 0.43        | 0.50        | 0.43        | 0.50        | 0.35        | 0.43        | 0.50        | 0.44        |      |
| <b>PO ♂</b> | <b>0.40</b> | <b>0.70</b>                                      | <b>0.61</b> | <b>0.48</b> | <b>0.58</b> | <b>0.50</b> | <b>0.61</b> | <b>0.68</b> | <b>0.35</b> | <b>0.48</b> | <b>0.70</b> | <b>0.26</b>                                      | <b>0.53</b> | <b>0.69</b> | <b>0.69</b> | <b>0.69</b> | <b>0.69</b> | <b>0.69</b> | <b>0.53</b> | <b>0.47</b> | <b>0.53</b> | <b>0.39</b> | <b>0.69</b> | <b>0.60</b> | <b>0.61</b> |      |
|             |             | <b>Mayor rendimiento ♂ x menor rendimiento ♀</b> |             |             |             |             |             |             |             |             |             | <b>Menor rendimiento ♂ x menor rendimiento ♀</b> |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |      |
| 4           | 0.29        | 0.83   | 0.57        | 0.38        | 0.52        | 0.43        | 0.57        | 0.83        | 0.29        | 0.38        | 0.83        | 0.18   | 0.51        | -           | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.43        | 0.38        | 0.43        | 0.29        | 0.83        | 0.57        | 0.63        |      |
| 9           | 0.29        | 0.83   | 0.57        | 0.38        | 0.52        | 0.43        | 0.57        | 0.83        | 0.29        | 0.38        | 0.83        | 0.18   | 0.51        | 0.83        | -           | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.43        | 0.38        | 0.43        | 0.29        | 0.83        | 0.57        | 0.63        |      |
| 12          | 0.29        | 0.83   | 0.57        | 0.38        | 0.52        | 0.43        | 0.57        | 0.83        | 0.29        | 0.38        | 0.83        | 0.18   | 0.51        | 0.83        | 0.83        | -           | 0.83        | 0.83        | 0.43        | 0.38        | 0.43        | 0.29        | 0.83        | 0.57        | 0.63        |      |
| 18          | .           | .  | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .  | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           |      |
| 22          | .           | .  | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .  | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           |      |
| 28          | 0.29        | 0.83   | 0.57        | 0.38        | 0.52        | 0.43        | 0.57        | 0.83        | 0.29        | 0.38        | 0.83        | 0.18   | 0.51        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | -           | 0.38        | 0.43        | 0.29        | 0.83        | 0.57        | 0.67        |      |
| 29          | 0.29        | 0.83   | 0.57        | 0.38        | 0.52        | 0.43        | 0.57        | 0.83        | 0.29        | 0.38        | 0.83        | 0.18   | 0.51        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.43        | -           | 0.43        | 0.29        | 0.83        | 0.57        | 0.67        |      |
| 31          | .           | .  | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .  | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           |      |
| 32          | 0.29        | 0.83   | 0.57        | 0.38        | 0.52        | 0.43        | 0.57        | 0.83        | 0.29        | 0.38        | 0.83        | 0.18   | 0.51        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.43        | 0.38        | 0.43        | -           | 0.83        | 0.57        | 0.68        |      |
| 35          | 0.29        | 0.83   | 0.57        | 0.38        | 0.52        | 0.43        | 0.57        | 0.83        | 0.29        | 0.38        | 0.83        | 0.18   | 0.51        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.43        | 0.38        | 0.43        | 0.29        | -           | 0.57        | 0.63        |      |
| 36          | 0.29        | 0.83   | 0.57        | 0.38        | 0.52        | 0.43        | 0.57        | 0.83        | 0.29        | 0.38        | 0.83        | 0.18   | 0.51        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.83        | 0.43        | 0.38        | 0.43        | 0.29        | 0.83        | -           | 0.65        |      |
| <b>PO ♂</b> | <b>0.29</b> | <b>0.83</b>                                      | <b>0.57</b> | <b>0.38</b> | <b>0.52</b> | <b>0.43</b> | <b>0.57</b> | <b>0.83</b> | <b>0.29</b> | <b>0.38</b> | <b>0.83</b> | <b>0.18</b>                                      | <b>0.51</b> | <b>0.83</b> | <b>0.83</b> | <b>0.83</b> | <b>0.83</b> | <b>0.83</b> | <b>0.43</b> | <b>0.38</b> | <b>0.43</b> | <b>0.29</b> | <b>0.83</b> | <b>0.57</b> | <b>0.65</b> |      |

**Cuadro 2.6.** Índice PO<sub>ij</sub> para cada par de familias de *Pinus greggii* var. *australis* por grupos de interés, Cuaupepec 2013.

|             |             | Familias con producción de estróbilos ♂   |             |             |             |             |             |             |             |             |             |   |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |      |      |
|-------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|------|
|             |             | Mayor rendimiento ♂ x mayor rendimiento ♀ |             |             |             |             |             |             |             |             |             | Menor rendimiento ♂ x mayor rendimiento ♀ |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |      |      |
|             |             | 5   | 7           | 16          | 17          | 21          | 25          | 26          | 27          | 30          | 57          | 61  | 62          | PO ♀        | 4           | 9           | 12          | 18          | 22          | 28          | 29          | 31          | 32          | 35          | 36   | PO ♀ |
| 5           | -           | 0.66                                      | 0.54        | 0.43        | 0.43        | 0.28        | 0.47        | 0.41        | 0.48        | 0.47        | 0.62        | 0.46                                      | 0.42        | 0.48        | 0.36        | 0.53        | 0.41        | 0.42        | 0.46        | 0.50        | 0.42        | 0.40        | 0.33        | 0.42        | 0.42 |      |
| 7           | 0.50        | -   | 0.47        | 0.39        | 0.28        | 0.46        | 0.43        | 0.45        | 0.46        | 0.62        | 0.43        | 0.42                                      | 0.45        | 0.38        | 0.50        | 0.38        | 0.38        | 0.49        | 0.49        | 0.43        | 0.33        | 0.30        | 0.38        | 0.41        |      |      |
| 16          | 0.46        | 0.55                                      | -           | 0.35        | 0.32        | 0.40        | 0.35        | 0.41        | 0.42        | 0.58        | 0.38        | 0.36                                      | 0.42        | 0.37        | 0.47        | 0.35        | 0.36        | 0.41        | 0.43        | 0.35        | 0.34        | 0.27        | 0.37        | 0.37        |      |      |
| 17          | 0.41        | 0.46                                      | 0.38        | -           | 0.30        | 0.32        | 0.24        | 0.40        | 0.38        | 0.46        | 0.29        | 0.26                                      | 0.35        | 0.38        | 0.32        | 0.25        | 0.29        | 0.32        | 0.35        | 0.25        | 0.28        | 0.18        | 0.31        | 0.29        |      |      |
| 21          | 0.34        | 0.37                                      | 0.29        | 0.18        | -           | 0.23        | 0.18        | 0.28        | 0.26        | 0.37        | 0.21        | 0.20                                      | 0.26        | 0.30        | 0.26        | 0.18        | 0.20        | 0.25        | 0.26        | 0.21        | 0.20        | 0.12        | 0.21        | 0.22        |      |      |
| 25          | 0.46        | 0.51                                      | 0.43        | 0.43        | 0.22        | -           | 0.41        | 0.35        | 0.34        | 0.47        | 0.39        | 0.50                                      | 0.41        | 0.26        | 0.56        | 0.45        | 0.39        | 0.39        | 0.37        | 0.48        | 0.36        | 0.40        | 0.32        | 0.40        |      |      |
| 26          | 0.51        | 0.58                                      | 0.51        | 0.35        | 0.31        | 0.40        | -           | 0.43        | 0.42        | 0.58        | 0.39        | 0.35                                      | 0.44        | 0.37        | 0.45        | 0.35        | 0.38        | 0.38        | 0.43        | 0.34        | 0.38        | 0.27        | 0.40        | 0.38        |      |      |
| 27          | 0.47        | 0.58                                      | 0.45        | 0.43        | 0.25        | 0.44        | 0.46        | -           | 0.48        | 0.58        | 0.44        | 0.50                                      | 0.46        | 0.34        | 0.56        | 0.38        | 0.37        | 0.45        | 0.45        | 0.46        | 0.33        | 0.33        | 0.37        | 0.40        |      |      |
| 30          | 0.39        | 0.46                                      | 0.36        | 0.31        | 0.24        | 0.36        | 0.35        | 0.40        | -           | 0.48        | 0.35        | 0.36                                      | 0.37        | 0.34        | 0.39        | 0.26        | 0.26        | 0.40        | 0.40        | 0.37        | 0.24        | 0.23        | 0.32        | 0.32        |      |      |
| 57          | 0.43        | 0.53                                      | 0.41        | 0.38        | 0.27        | 0.41        | 0.41        | 0.41        | 0.43        | -           | 0.39        | 0.44                                      | 0.41        | 0.32        | 0.49        | 0.34        | 0.33        | 0.42        | 0.42        | 0.41        | 0.30        | 0.30        | 0.32        | 0.36        |      |      |
| 61          | 0.60        | 0.74                                      | 0.60        | 0.51        | 0.30        | 0.55        | 0.51        | 0.49        | 0.49        | 0.65        | -           | 0.52                                      | 0.54        | 0.38        | 0.68        | 0.54        | 0.51        | 0.53        | 0.52        | 0.51        | 0.46        | 0.42        | 0.44        | 0.50        |      |      |
| 62          | 0.42        | 0.50                                      | 0.38        | 0.34        | 0.27        | 0.38        | 0.40        | 0.43        | 0.45        | 0.52        | 0.39        | -   | 0.41        | 0.35        | 0.46        | 0.29        | 0.28        | 0.41        | 0.42        | 0.42        | 0.25        | 0.25        | 0.31        | 0.34        |      |      |
| <b>PO ♂</b> | <b>0.45</b> | <b>0.54</b>                               | <b>0.44</b> | <b>0.37</b> | <b>0.28</b> | <b>0.40</b> | <b>0.38</b> | <b>0.41</b> | <b>0.42</b> | <b>0.54</b> | <b>0.38</b> | <b>0.39</b>                               | <b>0.42</b> | <b>0.35</b> | <b>0.47</b> | <b>0.35</b> | <b>0.35</b> | <b>0.41</b> | <b>0.42</b> | <b>0.39</b> | <b>0.32</b> | <b>0.29</b> | <b>0.35</b> | <b>0.37</b> |      |      |
|             |             | Familias con producción de estróbilos ♀   |             |             |             |             |             |             |             |             |             |   |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |      |      |
|             |             | 4   | 9           | 12          | 18          | 22          | 28          | 29          | 31          | 32          | 35          | 36  | PO ♀        | 4           | 9           | 12          | 18          | 22          | 28          | 29          | 31          | 32          | 35          | 36          | PO ♀ |      |
| 4           | 0.38        | 0.45                                      | 0.34        | 0.29        | 0.30        | 0.33        | 0.34        | 0.40        | 0.40        | 0.48        | 0.34        | 0.36                                      | 0.37        | -           | 0.41        | 0.25        | 0.25        | 0.36        | 0.36        | 0.39        | 0.22        | 0.22        | 0.27        | 0.30        |      |      |
| 9           | 0.52        | 0.62                                      | 0.53        | 0.42        | 0.29        | 0.46        | 0.44        | 0.47        | 0.48        | 0.61        | 0.46        | 0.46                                      | 0.48        | 0.38        | -           | 0.41        | 0.42        | 0.46        | 0.49        | 0.44        | 0.39        | 0.33        | 0.40        | 0.41        |      |      |
| 12          | 0.45        | 0.52                                      | 0.42        | 0.30        | 0.31        | 0.34        | 0.29        | 0.40        | 0.39        | 0.51        | 0.34        | 0.31                                      | 0.38        | 0.33        | 0.39        | -           | 0.32        | 0.34        | 0.37        | 0.30        | 0.30        | 0.22        | 0.33        | 0.32        |      |      |
| 18          | 0.39        | 0.47                                      | 0.36        | 0.27        | 0.28        | 0.32        | 0.29        | 0.38        | 0.37        | 0.47        | 0.30        | 0.29                                      | 0.35        | 0.34        | 0.36        | 0.26        | -           | 0.26        | 0.35        | 0.36        | 0.31        | 0.23        | 0.19        | 0.29        |      |      |
| 22          | 0.40        | 0.46                                      | 0.41        | 0.24        | 0.36        | 0.27        | 0.20        | 0.33        | 0.32        | 0.42        | 0.25        | 0.22                                      | 0.32        | 0.33        | 0.35        | 0.28        | -           | 0.26        | 0.28        | 0.21        | 0.29        | 0.18        | 0.29        | 0.27        |      |      |
| 28          | 0.40        | 0.49                                      | 0.38        | 0.31        | 0.26        | 0.35        | 0.33        | 0.44        | 0.41        | 0.50        | 0.37        | 0.36                                      | 0.38        | 0.32        | 0.43        | 0.30        | 0.31        | -           | 0.35        | 0.34        | 0.27        | 0.24        | 0.30        | 0.32        |      |      |
| 29          | 0.49        | 0.60                                      | 0.47        | 0.44        | 0.26        | 0.46        | 0.45        | 0.46        | 0.47        | 0.59        | 0.44        | 0.50                                      | 0.47        | 0.34        | 0.56        | 0.40        | 0.39        | 0.46        | -           | 0.46        | 0.35        | 0.35        | 0.37        | 0.41        |      |      |
| 31          | 0.43        | 0.53                                      | 0.44        | 0.40        | 0.32        | 0.43        | 0.46        | 0.45        | 0.46        | 0.56        | 0.41        | 0.51                                      | 0.45        | 0.38        | 0.56        | 0.37        | 0.36        | 0.46        | 0.44        | -           | 0.31        | 0.31        | 0.32        | 0.39        |      |      |
| 32          | 0.39        | 0.47                                      | 0.34        | 0.28        | 0.32        | 0.34        | 0.34        | 0.41        | 0.40        | 0.51        | 0.35        | 0.35                                      | 0.37        | 0.32        | 0.40        | 0.22        | 0.22        | 0.38        | 0.38        | 0.40        | -           | 0.19        | 0.28        | 0.31        |      |      |
| 35          | 0.47        | 0.57                                      | 0.46        | 0.35        | 0.30        | 0.40        | 0.36        | 0.48        | 0.48        | 0.58        | 0.41        | 0.38                                      | 0.44        | 0.38        | 0.47        | 0.34        | 0.35        | 0.40        | 0.42        | 0.37        | 0.32        | -           | 0.37        | 0.38        |      |      |
| 36          | 0.40        | 0.46                                      | 0.38        | 0.25        | 0.29        | 0.31        | 0.27        | 0.38        | 0.36        | 0.47        | 0.30        | 0.27                                      | 0.34        | 0.34        | 0.35        | 0.25        | 0.26        | 0.32        | 0.35        | 0.28        | 0.25        | 0.18        | -           | 0.29        |      |      |
| <b>PO ♀</b> | <b>0.43</b> | <b>0.51</b>                               | <b>0.41</b> | <b>0.32</b> | <b>0.30</b> | <b>0.36</b> | <b>0.34</b> | <b>0.42</b> | <b>0.41</b> | <b>0.52</b> | <b>0.36</b> | <b>0.37</b>                               | <b>0.40</b> | <b>0.35</b> | <b>0.43</b> | <b>0.31</b> | <b>0.31</b> | <b>0.38</b> | <b>0.38</b> | <b>0.35</b> | <b>0.29</b> | <b>0.24</b> | <b>0.32</b> | <b>0.34</b> |      |      |

**Cuadro 2.7.** Índice PO<sub>ij</sub> para cada par de familias de *Pinus greggii* var. *australis* por grupos de interés, Terrenate 2012.

|             |             | Familias con producción de estróbilos ♂   |             |             |             |             |             |             |             |   |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |      |             |
|-------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|-------------|
|             |             | Mayor rendimiento ♂ x mayor rendimiento ♀ |             |             |             |             |             |             |             | Menor rendimiento ♂ x mayor rendimiento ♀ |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |      |             |
|             |             | 4   | 7           | 9           | 25          | 26          | 27          | 28          | 29          | 30  | 57          | 61          | 62          | PO ♀        | 5           | 12          | 16          | 17          | 18          | 21          | 22          | 31          | 32          | 35          | 36   | PO ♀        |
| <b>4</b>    | -           | 0.25                                      | 0.29        | 0.16        | 0.29        | 0.16        | 0.29        | 0.00        | 0.38        | 0.18                                      | 0.35        | 0.05        | 0.17        | <b>0.21</b> | 0.19        | 0.05        | 0.22        | 0.29        | 0.00        | 0.05        | 0.32        | 0.22        | 0.26        | 0.18        | 0.00 | <b>0.16</b> |
| <b>7</b>    | 0.16        | -   | 0.33        | 0.29        | 0.48        | 0.02        | 0.13        | 0.02        | 0.13        | 0.02                                      | 0.28        | 0.16        | 0.23        | <b>0.21</b> | 0.13        | 0.16        | 0.26        | 0.52        | 0.02        | 0.16        | 0.48        | 0.26        | 0.26        | 0.21        | 0.02 | <b>0.23</b> |
| <b>9</b>    | 0.48        | 0.50                                      | -           | 0.43        | 0.22        | 0.03        | 0.38        | 0.22        | 0.33        | 0.27                                      | 0.46        | <b>0.33</b> | 0.42        | 0.27        | 0.22        | 0.18        | 0.03        | 0.27        | 0.36        | 0.22        | 0.40        | 0.22        | 0.03        | <b>0.24</b> |      |             |
| <b>25</b>   | 0.52        | 0.53                                      | 0.38        | -           | 0.25        | 0.38        | 0.29        | 0.38        | 0.32        | 0.83                                      | 0.60        | <b>0.45</b> | 0.29        | 0.83        | 0.47        | 0.05        | 0.38        | 0.61        | 0.53        | 0.47        | 0.29        | 0.47        | 0.38        | <b>0.43</b> |      |             |
| <b>26</b>   | 0.39        | 0.39                                      | 0.17        | 0.49        | -           | 0.06        | 0.17        | 0.06        | 0.17        | 0.31                                      | 0.56        | <b>0.28</b> | 0.38        | 0.39        | 0.17        | 0.10        | 0.06        | 0.49        | 0.30        | 0.17        | 0.38        | 0.17        | 0.06        | <b>0.24</b> |      |             |
| <b>27</b>   | 0.43        | 0.43                                      | 0.20        | 0.53        | 0.20        | -           | 0.20        | 0.08        | 0.20        | 0.34                                      | 0.60        | <b>0.32</b> | 0.52        | 0.43        | 0.20        | 0.10        | 0.08        | 0.60        | 0.33        | 0.20        | 0.26        | 0.20        | 0.08        | <b>0.27</b> |      |             |
| <b>28</b>   | 0.00        | 0.08                                      | 0.29        | 0.10        | 0.43        | 0.00        | -           | 0.00        | 0.24        | 0.00                                      | 0.05        | <b>0.12</b> | 0.00        | 0.00        | 0.22        | 0.83        | 0.00        | 0.00        | 0.26        | 0.22        | 0.10        | 0.18        | 0.00        | <b>0.16</b> |      |             |
| <b>29</b>   | 0.64        | 0.43                                      | 0.08        | 0.34        | 0.08        | 0.08        | 0.20        | -           | 0.16        | 0.34                                      | 0.60        | <b>0.29</b> | 0.76        | 0.43        | 0.08        | 0.00        | 0.08        | 0.60        | 0.20        | 0.08        | 0.38        | 0.08        | 0.08        | <b>0.25</b> |      |             |
| <b>30</b>   | .           | .   | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .   | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .           | .    | .           |
| <b>57</b>   | 0.44        | 0.60                                      | 0.47        | 0.77        | 0.44        | 0.20        | 0.34        | 0.20        | -           | 0.53                                      | 0.52        | <b>0.45</b> | 0.24        | 0.56        | 0.47        | 0.18        | 0.20        | 0.52        | 0.64        | 0.47        | 0.36        | 0.46        | 0.20        | <b>0.39</b> |      |             |
| <b>61</b>   | 0.12        | 0.28                                      | 0.78        | 0.36        | 0.60        | 0.36        | 0.36        | 0.36        | 0.60        | -   | 0.17        | <b>0.40</b> | 0.00        | 0.28        | 0.78        | 0.30        | 0.36        | 0.17        | 0.65        | 0.78        | 0.22        | 0.69        | 0.36        | <b>0.42</b> |      |             |
| <b>62</b>   | 0.28        | 0.42                                      | 0.47        | 0.45        | 0.57        | 0.10        | 0.22        | 0.10        | 0.40        | 0.28                                      | -           | <b>0.33</b> | 0.15        | 0.28        | 0.38        | 0.38        | 0.10        | 0.28        | 0.63        | 0.38        | 0.34        | 0.32        | 0.10        | <b>0.30</b> |      |             |
| <b>PO ♂</b> | <b>0.35</b> | <b>0.39</b>                               | <b>0.35</b> | <b>0.39</b> | <b>0.36</b> | <b>0.12</b> | <b>0.27</b> | <b>0.16</b> | <b>0.30</b> | <b>0.31</b>                               | <b>0.40</b> | <b>0.31</b> | <b>0.28</b> | <b>0.33</b> | <b>0.31</b> | <b>0.27</b> | <b>0.12</b> | <b>0.34</b> | <b>0.43</b> | <b>0.31</b> | <b>0.30</b> | <b>0.29</b> | <b>0.12</b> | <b>0.28</b> |      |             |
|             |             | Familias con producción de estróbilos ♀   |             |             |             |             |             |             |             |   |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |      |             |
|             |             | Mayor rendimiento ♂ x menor rendimiento ♀ |             |             |             |             |             |             |             | Menor rendimiento ♂ x menor rendimiento ♀ |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |      |             |
|             |             | 5   | 12          | 16          | 17          | 18          | 21          | 22          | 31          | 32  | 35          | 36          | PO ♀        | 5           | 12          | 16          | 17          | 18          | 21          | 22          | 31          | 32          | 35          | 36          | PO ♀ |             |
| <b>5</b>    | 0.42        | 0.69                                      | 0.52        | 0.66        | 0.43        | 0.24        | 0.49        | 0.33        | 0.66        | 0.47                                      | 0.49        | <b>0.49</b> | -           | 0.47        | 0.52        | 0.17        | 0.24        | 0.38        | 0.69        | 0.52        | 0.44        | 0.52        | 0.24        | <b>0.42</b> |      |             |
| <b>12</b>   | 0.00        | 0.08                                      | 0.29        | 0.10        | 0.43        | 0.00        | 0.10        | 0.00        | 0.24        | 0.00                                      | 0.05        | <b>0.12</b> | 0.00        | -           | 0.22        | 0.83        | 0.00        | 0.00        | 0.26        | 0.22        | 0.10        | 0.18        | 0.00        | <b>0.18</b> |      |             |
| <b>16</b>   | 0.52        | 0.48                                      | 0.26        | 0.63        | 0.21        | 0.22        | 0.26        | 0.22        | 0.26        | 0.57                                      | 0.60        | <b>0.38</b> | 0.52        | 0.69        | -           | 0.02        | 0.22        | 0.83        | 0.40        | 0.26        | 0.29        | 0.26        | 0.22        | <b>0.37</b> |      |             |
| <b>17</b>   | 0.35        | 0.50                                      | 0.50        | 0.38        | 0.50        | 0.18        | 0.65        | 0.43        | 0.66        | 0.22                                      | 0.30        | <b>0.42</b> | 0.17        | 0.22        | 0.50        | -           | 0.18        | 0.22        | 0.48        | 0.50        | 0.40        | 0.43        | 0.18        | <b>0.33</b> |      |             |
| <b>18</b>   | 0.13        | 0.29                                      | 0.61        | 0.32        | 0.83        | 0.18        | 0.32        | 0.18        | 0.53        | 0.18                                      | 0.18        | <b>0.34</b> | 0.00        | 0.18        | 0.50        | 0.50        | -           | 0.18        | 0.52        | 0.50        | 0.21        | 0.43        | 0.18        | <b>0.32</b> |      |             |
| <b>21</b>   | 0.47        | 0.32                                      | 0.10        | 0.38        | 0.10        | 0.10        | 0.10        | 0.10        | 0.10        | 0.38                                      | 0.52        | <b>0.24</b> | 0.52        | 0.47        | 0.10        | 0.00        | 0.10        | -           | 0.23        | 0.10        | 0.26        | 0.10        | 0.10        | <b>0.20</b> |      |             |
| <b>22</b>   | 0.52        | 0.48                                      | 0.26        | 0.63        | 0.21        | 0.22        | 0.26        | 0.22        | 0.26        | 0.57                                      | 0.60        | <b>0.38</b> | 0.52        | 0.69        | 0.26        | 0.02        | 0.22        | 0.83        | -           | 0.26        | 0.29        | 0.26        | 0.22        | <b>0.36</b> |      |             |
| <b>31</b>   | 0.52        | 0.52                                      | 0.35        | 0.64        | 0.35        | 0.13        | 0.26        | 0.13        | 0.35        | 0.43                                      | 0.68        | <b>0.40</b> | 0.35        | 0.52        | 0.35        | 0.17        | 0.13        | 0.60        | 0.50        | -           | 0.34        | 0.35        | 0.13        | <b>0.35</b> |      |             |
| <b>32</b>   | 0.13        | 0.26                                      | 0.56        | 0.28        | 0.76        | 0.15        | 0.28        | 0.15        | 0.48        | 0.15                                      | 0.18        | <b>0.31</b> | 0.00        | 0.15        | 0.45        | 0.54        | 0.15        | 0.15        | 0.47        | 0.45        | -           | 0.39        | 0.15        | <b>0.29</b> |      |             |
| <b>35</b>   | 0.22        | 0.35                                      | 0.35        | 0.38        | 0.50        | 0.03        | 0.14        | 0.03        | 0.29        | 0.22                                      | 0.30        | <b>0.26</b> | 0.18        | 0.22        | 0.27        | 0.43        | 0.03        | 0.22        | 0.50        | 0.27        | 0.26        | -           | 0.03        | <b>0.24</b> |      |             |
| <b>36</b>   | 0.26        | 0.47                                      | 0.72        | 0.57        | 0.59        | 0.25        | 0.38        | 0.25        | 0.64        | 0.41                                      | 0.32        | <b>0.44</b> | 0.10        | 0.41        | 0.62        | 0.28        | 0.25        | 0.32        | 0.84        | 0.62        | 0.32        | 0.54        | -           | <b>0.43</b> |      |             |
| <b>PO ♀</b> | <b>0.32</b> | <b>0.40</b>                               | <b>0.41</b> | <b>0.45</b> | <b>0.45</b> | <b>0.15</b> | <b>0.29</b> | <b>0.19</b> | <b>0.41</b> | <b>0.33</b>                               | <b>0.38</b> | <b>0.34</b> | <b>0.23</b> | <b>0.40</b> | <b>0.38</b> | <b>0.30</b> | <b>0.15</b> | <b>0.37</b> | <b>0.49</b> | <b>0.37</b> | <b>0.29</b> | <b>0.35</b> | <b>0.15</b> | <b>0.32</b> |      |             |

Un patrón de comportamiento reproductivo similar de las familias evaluadas, en un huerto semillero operativo, requeriría el uso de actividades de manejo complementarias.

### 2.5.5. Variación y control genético de variables fenológicas reproductivas de tiempo

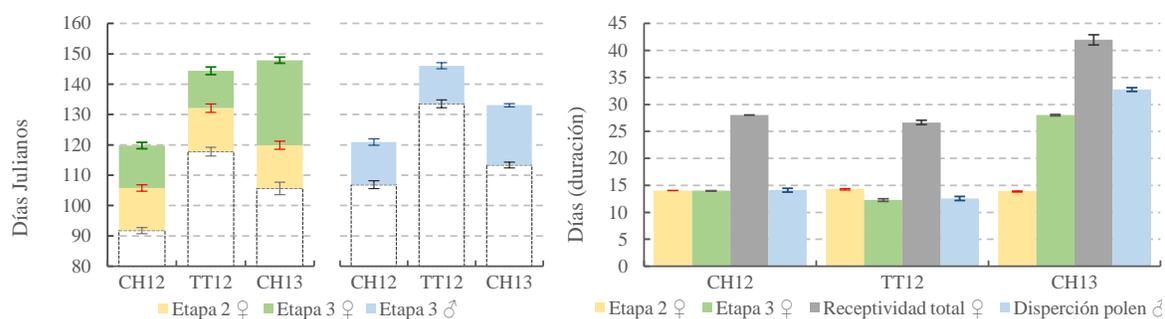
Las variables de tiempo se dividieron para su análisis por sitio, ciclo de producción de estructuras reproductivas (Cuautepec: CH12 y CH13; y Terrenate: TT12) y al sexo y las etapas fenológicas reproductivas (etapa 2 y etapa 3 de receptividad; y etapa 3 dispersión de polen), para determinar la existencia y significancia de la variación de los periodos reproductivos en los sitios y familias de *Pinus greggii* var. *australis* evaluados (Cuadro 2.8).

**Cuadro 2.8.** Prueba de significancia para variables fenológicas de tiempo de *Pinus greggii* var. *australis*, años 2012 y 2013.

| Fuente de Variación                 | Receptividad ♀ (Pr > F) <sup>†</sup> |                     |                  |        |        |        |        | Dispersión ♂ (Pr > F) |        |        |        |
|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|-----------------------|--------|--------|--------|
|                                     | G.L. <sup>‡</sup>                    | Ini E2 <sup>Ⓚ</sup> | Dur E2           | Ini E3 | Ter E3 | Dur E3 | Dur T. | G.L.                  | Ini    | Ter    | Dur    |
| <i>Análisis Conjunto 2012</i>       |                                      |                     |                  |        |        |        |        |                       |        |        |        |
| Sitio                               | 1                                    | <.0001              | NS <sup>††</sup> | <.0001 | <.0001 | 0.0002 | 0.0257 | 1                     | <.0001 | <.0001 | 0.0077 |
| Familia                             | 22                                   | NS                  | NS               | NS     | NS     | NS     | NS     | 22                    | 0.0108 | 0.0193 | NS     |
| Sitio x Familia                     | 18                                   | NS                  | NS               | NS     | NS     | NS     | NS     | 21                    | NS     | NS     | NS     |
| <i>Cuautepec 2012</i>               |                                      |                     |                  |        |        |        |        |                       |        |        |        |
| Familia                             | 19                                   | NS                  | NS               | NS     | NS     | NS     | NS     | 22                    | NS     | NS     | NS     |
| <i>Terrenate 2012</i>               |                                      |                     |                  |        |        |        |        |                       |        |        |        |
| Familia                             | 21                                   | 0.0487              | NS               | 0.0651 | 0.0689 | NS     | 0.0400 | 21                    | 0.0412 | 0.0385 | NS     |
| <i>Cuautepec 2013</i>               |                                      |                     |                  |        |        |        |        |                       |        |        |        |
| Familia                             | 22                                   | NS                  | NS               | NS     | NS     | NS     | NS     | 21                    | NS     | NS     | NS     |
| <i>Estrato - Cuautepec 2013</i>     |                                      |                     |                  |        |        |        |        |                       |        |        |        |
| Estrato                             | -                                    | -                   | -                | -      | -      | -      | -      | 1                     | 0.0773 | 0.0779 | <.0001 |
| Familia                             | -                                    | -                   | -                | -      | -      | -      | -      | 21                    | NS     | NS     | NS     |
| Estrato (Familia)                   | -                                    | -                   | -                | -      | -      | -      | -      | 20                    | NS     | NS     | <.0001 |
| <i>Orientación - Cuautepec 2013</i> |                                      |                     |                  |        |        |        |        |                       |        |        |        |
| Orientación                         | -                                    | -                   | -                | -      | -      | -      | -      | 1                     | NS     | NS     | 0.0055 |
| Familia                             | -                                    | -                   | -                | -      | -      | -      | -      | 21                    | NS     | NS     | NS     |
| Orientación (Familia)               | -                                    | -                   | -                | -      | -      | -      | -      | 20                    | NS     | NS     | NS     |

<sup>†</sup> Significancia determinada con  $p \leq 0.1$ ; <sup>‡</sup> G.L.= grados de libertad; <sup>Ⓚ</sup> Ini= inicio, Ter= término, Dur= duración, T= total, E2= etapa 2 y E3= etapa 3; <sup>††</sup> NS= no significativo.

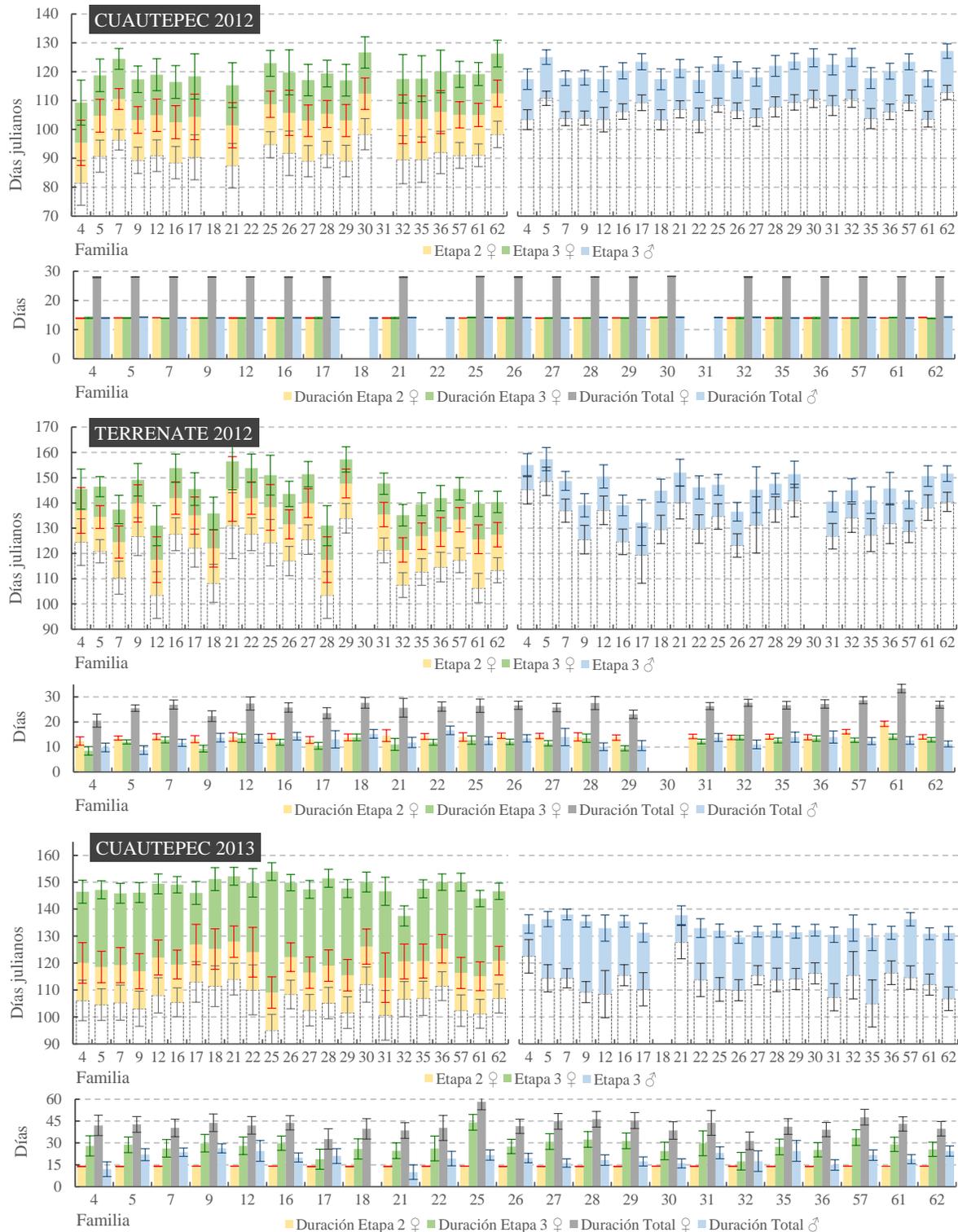
Análisis conjunto. Existen diferencias significativas entre sitios respecto al tiempo transcurrido desde el 1 de enero (2012) hasta el inicio y término de las etapas evaluadas, así como en la duración de los periodos reproductivos para todas las variables excepto para duración de etapa 2 de receptividad femenina. Por otro lado, solo se detectaron diferencias significativas entre familias para las fechas de inicio y término del periodo reproductivo masculino, no así en su duración. Las normales climatológicas de los sitios evaluados indican que Cuauhtepic es más frío y húmedo que Terrenate, con diferencias de 1°C (temperatura media anual) y 136 mm de precipitación, situación que coincidió con un inicio y desarrollo tardío de la fase reproductiva en TT12 respecto a CH12 (Figura 2.14).



**Figura 2.14.** Medias ajustadas y errores estándar de variables fenológicas de tiempo para *Pinus greggii* var. *australis* por sitio y año. Cuauhtepic = CH12 y CH13; Terrenate = TT12.

Cuauhtepic ( $S_1$ ). No se detectaron diferencias significativas entre las familias de medios hermanos en todas las variables evaluadas durante los dos ciclos de producción (Figura 2.15). El ciclo 2012 tuvo periodos reproductivos más cortos y mayor uniformidad en la duración de las etapas reproductivas de estróbilos masculinos y femeninos en comparación con el 2013, posiblemente como consecuencia de un número menor de registros en la evaluación (2012).

Terrenate ( $S_2$ ). Las fechas de inicio y término de los periodos reproductivos de ambos sexos en 2012 mostraron diferencias significativas entre familias (Figura 2.15).

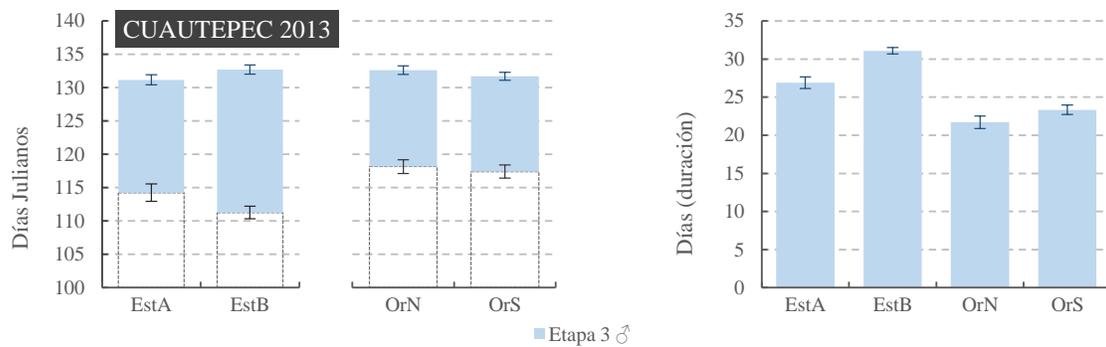


**Figura 2.15.** Medias ajustadas y errores estándar de variables fenológicas de tiempo para *Pinus greggii* var. *australis* por familia dentro de sitio.

La duración de las etapas reproductivas no fue significativa entre familias, excepto para duración total de receptividad. Al igual que en Cuauhtepic en 2012, esta situación se relacionó con el número de registros de datos en campo, su periodicidad y sus efectos sobre esta variable.

En general, las fechas de inicio y término de los periodos reproductivos de las familias evaluadas presentaron errores estándar muy altos (en los dos sitios, ambos ciclos y sexos), lo que indica que la magnitud de la variación presente entre los individuos de cada familia fue muy alta en estas variables. El error estándar tuvo un comportamiento muy diverso para la variable duración de receptividad y dispersión de polen en Cuauhtepic, con valores muy altos en 2013, excepto duración etapa 2 ♀, y muy pequeños en 2012.

Estrato y orientación. La evaluación del periodo de dispersión de polen en Cuauhtepic en 2013 indicó un comportamiento con mayor variación entre estratos que entre orientaciones (Figura 2.16).



**Figura 2.16.** Medias ajustadas y errores estándar de variables fenológicas de tiempo para *Pinus greggii* var. *australis* por estrato y orientación. EstA= estrato alto; EstB= estrato bajo; OrN= orientación norte; OrS= orientación sur.

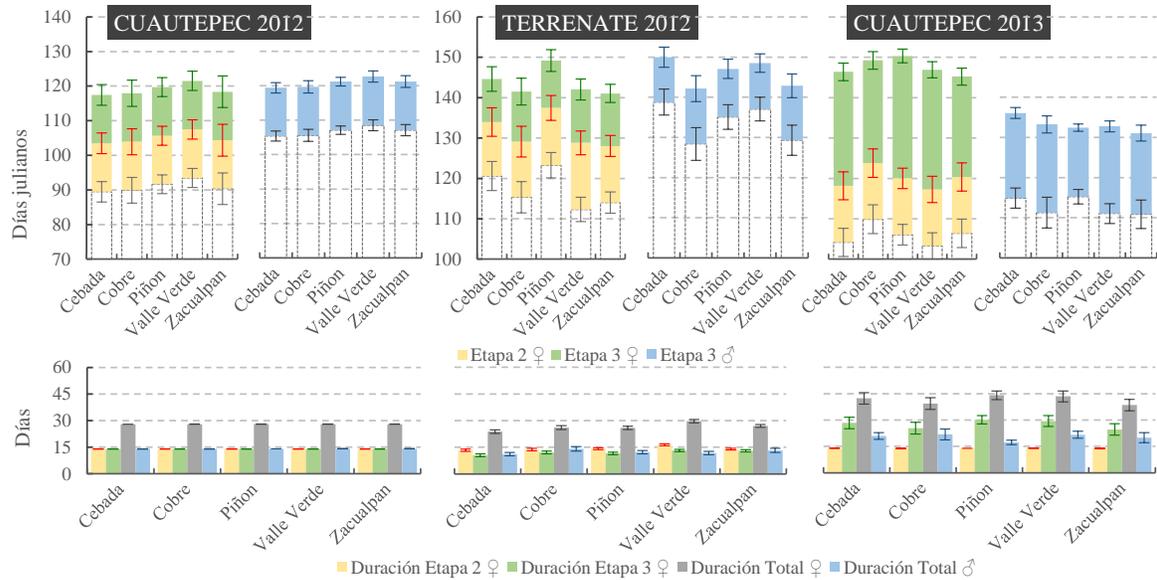
Se detectaron diferencias significativas entre estratos para las fechas de inicio y finalización de la etapa de emisión de polen así como en su duración, con inicio anticipado, término posterior en el estrato bajo respecto a la parte superior de la copa, y por tanto mayor duración asociada en gran parte a una mayor producción de estróbilos masculinos en esa parte del árbol. Las fechas de inicio y término de dispersión de polen fueron estadísticamente similares entre ramas con orientaciones norte y sur, y únicamente se detectaron diferencias significativas en la duración del periodo reproductivo.

Al evaluar el efecto de familia sólo se detectó variación significativa para la duración del periodo de liberación de polen entre estratos ( $p < .0001$ ); el periodo reproductivo en estróbilos masculinos tuvo una mayor duración en el estrato bajo de la copa en cada una de las familias evaluadas que en el alto. En la evaluación del efecto de familia para orientación de ramas no observaron diferencias significativas.

Procedencias. El análisis por origen geográfico de las familias de medios hermanos de *Pinus greggii* var. *australis* en cada sitio y ciclo evaluado indica que únicamente hubo diferencias significativas entre procedencias para las variables inicio ( $p=0.0871$ ) y duración de etapa 2 ( $p=0.0035$ ), etapa 3 ( $p=0.0499$ ) y total de receptividad ♀ ( $p=0.0016$ ) en Terrenate en 2012. El comportamiento de las variables en Cuauhtec se mantuvo sin variación significativa entre procedencias en ambos años (Figura 2.17). No se observaron tendencias claras en el comportamiento fenológico entre años o sitios.

Las procedencias se agruparon por tipo de régimen de lluvias: Valle Verde y Zacualpan como templado húmedo; y Cebada, Cobre y Piñón como templado subhúmedo. Se determinó que sólo en Terrenate en 2012 se registró variación significativa entre estos dos grupos,

únicamente para las variables de receptividad ♀ (Cuadro 2.9). En este sitio los individuos procedentes de lugares con mayor precipitación pluvial tuvieron un inicio promedio de receptividad de conillos femeninos más temprano y una mayor duración de este periodo en comparación de los provenientes de áreas más secas.



**Figura 2.17.** Medias ajustadas y errores estándar de variables fenológicas de tiempo para *Pinus greggii* var. *australis* por procedencia.

**Cuadro 2.9.** Medias ajustadas y errores estándar de variables fenológicas femeninas para grupos de procedencias de *Pinus greggii* var. *australis* plantadas en Terrenate 2012.

| Grupo     | Ini E2 <sup>†</sup> | Dur E2        | Ini E3         | Ter E3         | Dur E3        | Dur T.        |
|-----------|---------------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| Húmedo    | 113.27 ±1.99 a      | 15.08 ±0.36 a | 128.36 ±1.95 a | 141.47 ±1.71 a | 13.10 ±0.38 a | 28.15 ±0.60 a |
| Subhúmedo | 120.44 ±2.03 b      | 13.84 ±0.37 b | 134.29 ±2.00 b | 145.93 ±1.75 b | 11.60 ±0.39 b | 25.42 ±0.61 b |

<sup>†</sup> Ini= inicio y Ter= término en días julianos; Dur= duración en días naturales; T= total, E2= etapa 2 y E3= etapa 3. Letras distintas indican diferencias significativas.

La baja o nula variación registrada entre familias de medios hermanos de *P. greggii* var.

*australis* sobre todo en Cuauhtepac durante los años 2012 y 2013 tuvo claras consecuencias sobre los valores de heredabilidad de las variables evaluadas (Cuadro 2.10). En general, los valores de control genético ( $h^2_i$ ) que se obtuvieron, con excepción de Terrenate en 2012, fueron considerablemente bajos o nulos (no detectables), sobre todo para el periodo de receptividad de conillos femeninos.

**Cuadro 2.10.** Heredabilidad ( $h^2_i$ ) de variables fenológicas de tiempo para *Pinus greggii* var. *australis*, años 2012 y 2013.

| Sitio                  | Receptividad ♀ |        |        |        |        |        | Dispersión ♂ |        |        |
|------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|--------|--------|
|                        | Ini E2†        | Dur E2 | Ini E3 | Ter E3 | Dur E3 | Dur T. | Ini          | Ter    | Dur    |
| Análisis conjunto 2012 | ND‡            | ND     | ND     | ND     | 0.0367 | 0.0212 | 0.2052       | 0.1444 | ND     |
| Cuauhtepac 2012        | ND             | 0.1663 | ND     | ND     | 0.0606 | ND     | 0.1320       | 0.1320 | 0.1320 |
| Terrenate 2012         | 0.3449         | 0.4059 | 0.2395 | 0.2005 | 0.2432 | 0.5812 | 0.4385       | 0.4405 | 0.2364 |
| Cuauhtepac 2013        | ND             | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND           | 0.2516 | ND     |

† Ini= inicio, Ter= término, Dur= duración, T= total, E2= etapa 2 y E3= etapa 3; ‡ ND= no detectable.

Los valores de heredabilidad obtenidos en Terrenate fueron de bajos a moderados y variaron entre 0.20 y 0.58. La causa de estos resultados y la diferencia respecto a Cuauhtepac es que este sitio presentó mayor variación significativa entre familias para las variables fenológicas evaluadas.

Las correlaciones entre las variables fenológicas evaluadas y el diámetro del arbolado en los dos sitios durante 2012 y 2013 no fueron significativas, con excepción de duración de etapa 2 ♀ ( $r=0.1752$ ,  $p=0.0767$ ) en Cuauhtepac durante 2013, que indica que a mayor diámetro normal la duración de esta etapa fenológica se extendió por más tiempo, aunque el grado de asociación es muy bajo.

En Cuauhtepac durante 2012, la correlación entre las variables fenológicas se vio afectada por la periodicidad de los registros tomados en campo en ese año. La mayoría de las correlaciones significativas fueron positivas y cercanas a 1, principalmente entre variables de dispersión de polen ( $r=1$ ,  $p>0.0001$ ). La única correlación negativa significativa se dio entre duración de etapa 2 ♀ y de etapa 3 ♀ ( $r=-0.6643$ ,  $p>0.0001$ ). Las correlaciones entre inicio de etapa 2 ♀, inicio y término de etapa 3 ♀ con duración de etapa 3 ♀, y entre duración de etapa 2 ♀ y duración total del periodo de receptividad no resultaron significativas.

Los valores de correlación de Pearson entre la fecha de inicio y la duración del periodo de receptividad en Cuauhtepac en 2013 ( $r=-0.8099$ ,  $p>0.0001$ ) y Terrenate 2012 ( $r=-0.6260$ ,  $p>0.0001$ ) indican que las familias que tuvieron fechas de inicio de madurez de estróbilos más precoces y mantuvieron un periodo reproductivo con mayor duración, y viceversa (también aplicable a cada una de las dos etapas de receptividad femenina). Respecto a la dispersión de polen, solo Terrenate 2012 ( $r=-0.7372$ ,  $p>0.0001$ ) presentó una tendencia similar a las variables femeninas, mientras que en el ciclo 2013 en Cuauhtepac sólo se detectó correlación significativa entre las fechas de inicio y término del periodo reproductivo ( $r=0.5478$ ,  $p>0.0001$ ). En general, se obtuvieron correlaciones positivas entre fechas (inicio y término) y negativas entre fechas y duraciones, independientemente del nivel de significancia.

## 2.6. CONCLUSIONES

La fenología reproductiva de *Pinus greggii* var. *australis* de este ensayo de progenies estuvo determinada principalmente por la localización geográfica del sitio de plantación, las características físicas y condiciones climáticas del mismo, y la variación de éstas a lo largo del tiempo. La acumulación de los efectos negativos traducidos en estrés causado por las condiciones de sequía (considerada desde 2010) en los sitios evaluados, afectó la producción y desarrollo de estróbilos y la sincronización de sus periodos de madurez en Cuauhtepic y en Terrenate, principalmente durante 2013. Así mismo, la duración del periodo de dispersión de polen fue más sensible a condiciones adversas de sequía, altas temperaturas o exceso de humedad que el de receptividad de estróbilos femeninos, para el cual la incidencia de heladas ocasiona mayores efectos negativos.

Las tasas de sincronización general obtenidas en Cuauhtepic en 2013 y Terrenate en 2012 son normales considerando el origen sexual del ensayo; sin embargo, el primer ciclo en Cuauhtepic presentó un valor de sincronización fenológica muy alto. Las tasas de sincronía para todos los grupos de interés (volumen) presentaron valores constantes o similares en cada sitio y ciclo de producción. En el caso del interés por determinado grupo de individuos o por cruza específicas será necesaria la implementación de labores complementarias para asegurar buenos resultados.

Los niveles de sincronía calculados en ambos sitios para el año 2012 estuvieron influenciados parcialmente por el número y la periodicidad de las inspecciones durante ese ciclo; sin embargo, se considera que el comportamiento en los patrones de receptividad y de dispersión de polen sería similar en términos generales.

Los niveles de variación respecto a las fechas y los tiempos de formación, desarrollo y madurez de estructuras reproductivas en *P. greggii* var. *australis* fueron desde sitio, donde Cuauhtepac presentó precocidad (14 días) respecto a Terrenate; entre sexos, donde el periodo de receptividad femenina inició siempre antes que el de dispersión de polen; entre familias, principalmente en Terrenate; entre árboles de la misma familia (errores estándar grandes); entre estratos (2013), donde el estrato alto de la copa del árbol tuvo una menor producción de estróbilos masculinos y periodo de dispersión más corto que el estrato bajo; entre ramas, dentro de rama e incluso a nivel de amento de estróbilos, en donde la cantidad, la velocidad y uniformidad de la maduración no fueron iguales.

### III. LITERATURA CITADA

- Alizoti, P.G., K. Kilimis and P. Gallios. 2010. Temporal and spatial variation of flowering among *Pinus nigra* Arn. clones under changing climatic conditions. *Forest Ecology and Management* 259: 786-797.
- Askew, G.R. 1988. Estimation of gamete pool compositions in clonal seed orchards. *Silvae Genetica* 37: 227-232.
- Askew, G.R. and D. Blush. 1990. Short note: An index of phenological overlap in flowering for clonal conifers seed orchards. *Silvae Genetica* 39: 168-171.
- Azamar O., M., J. López U., J.J. Vargas H. y A. Plancarte B. 2000. Evaluación de un ensayo de procedencias-progenies de *Pinus greggii* y su conversión a huerto semillero. Memorias del 1er. Congreso Nacional de Reforestación. Programa Nacional de Reforestación-Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 7 p.
- Blush, T.D., D.L. Bramlett and Y.A. El-Kassaby. 1993. Reproductive phenology of seed orchards. USDA Agriculture Handbook 698. Washington DC, USA. pp: 15-23.
- Burczyk, J. and D. Prat. 1997. Male reproductive success in *Pseudotsuga menziesii* (Mirb). Franco: the effect of spatial structure and flowering characteristics. *Heredity* 79: 638-647.
- Burczyk, J. and W. Chalupka. 1997. Flowering and cone production variability and its effects on parental balance in a Scots pine clonal seed orchard. *Annals of Forest Science* 54: 129-144.
- Codesido, V. y E. Merlo. 2001. Caracterización fenológica del huerto semillero de *Pinus radiata* de Sergude. III Congreso Forestal Español. Actas del Congreso. Tomo II: 69-74.

- Codesido, V., E. Merlo and J. Fernández-López. 2005. Variation in reproductive phenology in a *Pinus radiata* D. Don seed orchard in northern Spain. *Silvae Genetica* 54: 246-255.
- Connor, K.F., T.C. Prewitt, F.T. Bonner, W.W. Elam and R.C. Parker. 1998. Environmental stresses and reproductive biology of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) and flowering dogwood (*Cornus florida* L.). *In*: R.A. Mickler and S. Fox (eds.). *The Productivity and Sustainability of Southern Forest Ecosystems in a Changing Environment*. Ecological Studies 128: 103-116.
- Darrow, W.K. and H. Coetzee. 1983. Potentially valuable Mexican pines for the summer rainfall region of southern Africa. *South African Forestry Journal* 124: 23-35.
- Donahue, J.K. and J. López-Upton. 1996. Geographic variation in leaf, cone and seed morphology of *Pinus greggii* Engelm. in native forest. *Forest Ecology and Management*. 82: 145-157.
- Donahue, J.K. and J. López-Upton. 1999. A new variety of *Pinus greggii* (Pinaceae) in México. *SIDA Contribution to Botany* 18(4): 1083-1093.
- Dvorak, W.S. y J.K. Donahue. 1993. Reseña de investigaciones de la cooperativa CAMCORE 1980-1992. Central America & Mexico Coniferous Resources Cooperative. Raleigh, NC. 94 p.
- Dvorak, W.S., J.E. Kietzka and J.K. Donahue. 1996. Three-year survival and growth of provenances of *Pinus greggii* in the tropics. *Forest Ecology and Management* 83: 123-131.
- Dvorak, W.S., J.E. Kietzka, J.K. Donahue, G.R. Hodge and T.K. Stanger. 2000. *Pinus greggii*. *In*: *Conservation & Testing of Tropical & Subtropical Forest Tree Species by*

- the CAMCORE Cooperative. Central America & Mexico Coniferous Resources Cooperative, North Carolina State University, Raleigh, NC. pp: 52-73.
- El-Kassaby, Y.A. and K. Ritland. 1986. The relationship of outcrossing rate to reproductive phenology and supplemental mass pollination in a Douglas fir seed orchard. *Silvae Genetica* 35: 240-244.
- El-Kassaby, Y.A., A.M.K. Fashler and O. Sziklai. 1984. Reproductive phenology and its impact on genetically improved seed production in a Douglas-fir seed orchard. *Silvae Genetica* 33: 120-125.
- El-Kassaby, Y.A., K. Ritland, A.M.K. Fashler and D. Devitt. 1988. The role of reproductive phenology upon mating system of a Douglas fir seed orchard. *Silvae Genetica* 37: 76-82.
- Erickson, V.J. and W.T. Adams. 1989. Mating success in a costal Douglas fir seed orchard as affected by distance and floral phenology. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 1248-1255.
- Eriksson, G., A. Jonsson and D. Lindren. 1973. Flowering in a clonal trial of *Picea abies* Karst. *Studia Forestalia Suecica* 110: 5-45.
- Falconer, D.S. and T.F.C. Mackay. 1996. *Introduction to Quantitative Genetics*. Addison Wesley Longman Limited, Edinburgh. 484 p.
- Farjon, A. 1996. Biodiversity of *Pinus* (Pinaceae) in Mexico: speciation and palaeo-endemism. *Botanical Journal of the Linnean Society* 121: 365-380.
- Farjon, A., J.A. Pérez de la Rosa and B.T. Styles. 1997. *Field Guide to the Pines of Mexico and Central America: Spanish Ed.* Royal Botanic Gardens, Kew, UK. 147 p.
- Fielding, J.M. 1960. *Pinus patula x greggii*. *Australian Forester* 24: 99-102.

- Gerhold, H.D. 1966. Selection for precocious flowering in *Pinus sylvestris*. In: Joint Proceedings of the Second Genetics Workshop of the Society of American Foresters and the Seventh Lake States Forest Tree Improvement Conference; Res. Pap. NC-6. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station. pp: 4-7.
- Ghosh, R.C., B. Singh and K.K. Sharma. 1981. Suitability trials of different species and provenances of pines in the Doon Valley of India. *Indian Forester* 107: 135-150.
- Gömöry, D., R. Bruchánik and L. Paule. 2000. Effective population number estimation of three scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seed orchards based on an integrated assessment of flowering, floral phenology, and seed orchard design. *Forest Genetics* 7(1): 65-75
- Gömöry, D., R. Bruchánik and R. Longauer. 2003. Fertility variation and flowering asynchrony in *Pinus sylvestris* consequences of the genetic structure of progeny in seed orchards. *Forest Ecology and Management* 174: 117-126.
- Hernández M., J., J. López-Upton, J.J. Vargas-Hernández y J. Jasso M. 2007. Zonas semilleras de *Pinus greggii* var. *australis* en Hidalgo, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30: 241-249.
- Hodge, G.R. and W.S. Dvorak. 2012. Growth potential and genetic parameters of four Mesoamerican pines planted in the Southern Hemisphere. *Southern Forests* 74(1): 27-49.
- Hopkins, E.R. and T.B. Hutcher. 1994. Improvement of *Pinus pinaster* Ait. in Western Australia. *CALMScience* 1: 159-242.
- Jonsson, A., I. Ekberg and G. Eriksson. 1976. Flowering in a seed orchard of *Pinus sylvestris*. *Studia Forestalia Suecica* 135: 1-38.

- Kang, K.S., D. Lindgren and T.J. Mullin. 2001. Prediction of genetic gain and gene diversity in seed orchards crops under alternative management strategies. *Theoretical and Applied Genetics* 103: 1099-1107.
- Lario, F.J., E. Merlo, J. Peñuelas y L. Gil. 2001. Variabilidad clonal de la fenología reproductiva y producción floral. Participación clonal en un huerto semillero de *Pinus nigra* Arnold Salzmanni (Dunal) Franco. III Congreso Forestal Español. Actas del Congreso. Tomo III: 539-545.
- Lill, B. and G. Sweet. 1977. Pollination in *Pinus radiata*. *New Zealand Journal of Forestry Science* 7(1): 21-34.
- López A., J.L., J.J. Vargas H., C. Ramírez H. y J. López U. 1999. Variación intraespecífica en el patrón de crecimiento del brote terminal de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 5(2): 133-140.
- López U., J. y A. Muñoz O. 1991. Selección familiar por tolerancia a sequía en *Pinus greggii* Engelm. I. Evaluación en plántula. *Agrociencia, Serie Fitociencia* 2(2): 111-123.
- López U., J., C. Ramírez H., F.O. Plascencia E. y R. Rodríguez L. 2001. Variación intraespecífica en el crecimiento de *Pinus greggii*. *Memorias del 2do. Simposium Internacional Sobre Recursos Naturales Bosque-Suelo-Atmósfera*. Jalapa, Ver. pp: 82-83.
- López U., J., J. Jasso M., J.J. Vargas H. y J.C. Ayala S. 1993. Variación de características morfológicas en conos y semillas de *Pinus greggii* Engelm. *Agrociencia, Recursos Naturales Renovables* 3(1): 81-95.
- López-Upton, J., C. Ramírez-Herrera, O. Plascencia-Escalante y J. Jasso-Mata. 2004. Variación en crecimiento de diferentes poblaciones de las dos variedades de *Pinus*

- greggii*. *Agrociencia* 38: 457-464.
- López-Upton., J. y J.K. Donahue. 1995. Seed production of *Pinus greggii* in natural stands in México. *Tree Planters Notes* 46(3): 86-92.
- Lyndon, R.F. 1992. The environment control of reproductive development. *In*: C. Marshall and J. Grace (eds.). *Fruit and Seed Production. Aspects of Development, Environment, Physiology and Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge. pp: 9-32.
- Matziris, D.I. 1994. Genetic variation in the phenology of flowering in black pine. *Silvae Genetica* 43(5-6): 321-328.
- Meagher, T.R. 1988. Sex determination in plants. *In*: D.J. Lovett and D.L. Lovett (Eds). *Plant Reproductive Ecology: Pattern and Strategies*. Oxford University Press, New York. pp: 125-138.
- Ministry of Agriculture. 1985. Forest research section annual report 1984-1985. Division of Conservation and Forestry, Lesotho. 40 p.
- Neil, P.E. 1991. A role for *Pinus maximinoi* and *P. greggii* in Nepal's afforestation efforts. *Commonwealth Forestry Review* 70: 191-200.
- Nikkanen, T. 2001. Reproductive phenology in a Norway spruce seed orchard. *Silvae Fennica* 35(1): 39-53.
- Obeso, J.R. 2002. The costs of reproduction in plants. *New Phytologist* 155: 321-348.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2011. Situación de los Recursos Genéticos Forestales en México. Informe final del proyecto TCP/MEX/3301/MEX (4), 87 p.
- Owens, N.J. and M.D. Blake. 1985. *Forest Tree Seed Production*. Canadian Forest Service,

- Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ontario. Information Report PI-X-53. 161 p.
- Pande, G.C. 1982. Tropical pines in India; an overview. *Indian Forester* 108(1): 1-28.
- Pardos, J.A. y L. Gil. 1986. Los huertos semilleros: Estudios básicos para su establecimiento en España. ICONA Monografía 44. 128 p.
- Pharis, R.P., J.E. Webber and S.D. Ross. 1987. The promotion of flowering in forest trees by Gibberellins A4/7 and cultural treatments: a review of the possible mechanisms. *Forest Ecology and Management* 19: 65-84.
- Picchi, C.G. y W.H.G. Barrett. 1967. Efecto de heladas intensas sobre las especies de *Pinus* cultivadas en Casteiar. IDIA, Suplemento Forestal. Argentina. 11 pp.
- Poynton, R.J. 1976. Tree planting in southern Africa. Vol 1. The Pines. S.A. Forestry Research Institute, Republic of South Africa. 576 p.
- Ramírez-Herrera, C., J.J. Vargas-Hernández y J. López-Upton. 2005. Distribución y conservación de las poblaciones naturales de *Pinus greggii*. *Acta Botánica Mexicana* 72: 1-16.
- Salazar G., G.J., J.J. Vargas H., J. Jasso M., J.D. Molina G., C. Ramírez H. y J. López U. 1999. Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. *Madera y Bosques* 5(2): 19-34.
- SAS (Statistical Analysis System) Institute. 2002. SAS/STAT Computer Software. Release 9.00. SAS Institute Inc. Cary.
- Savolainen, O., K. Kärkkäinen, A. Harju, T. Nikkanen and M. Rusanen. 1993. Fertility variation in *Pinus sylvestris*: a test of sexual allocation theory. *American Journal of Botany* 80: 1016-1020.

- Vargas H., J.J. and W. T. Adams. 1992. Age-age correlation and early selection for wood density in young coastal Douglas-Fir. *Forest Science* 38:467-477.
- Vargas H., J.J. y A. Muñoz O. 1988. Resistencia a sequía: II. Crecimiento y supervivencia en plántulas de cuatro especies de *Pinus*. *Agrociencia* 72: 197-208.
- Webber, J. 2004. Physiology of sexual reproduction in trees. *In*: J. Burley, J. Evans and J.A. Youngquist (eds.). *Encyclopedia of Forest Sciences*. Elsevier. pp: 1639–1644.
- Weir, R. and B.J. Zobel 1975. Advanced generation seed orchards. *In*: Seed Orchards. R. Faulkner (ed.). *British Forestry Commission Bulletin* 54. London. pp: 118-127.
- White, T.L., W.T. Adams and D.B. Neale. 2007. *Forest Genetics*. CABI. Oxfordshire. 682 p.
- Woessner, R.A. and E.C. Franklin. 1973. Continued reliance on wind-pollinated southern pine seed orchards - is it reasonable? *In*: R.J. Dinus, B.A. Thielges and O.O. Wells. (eds.). *Proceedings of the 12th Southern Tree Improvement Conference*, Louisiana State University, Baton Rouge. pp: 64-73.
- Xie, C.Y., J. Woods and M. Stoehr. 1994. Effects of seed orchard inputs on estimating effective population size of seedlots; A computer simulation. *Silvae Genetica* 43: 145-154.
- Zas, R., E. Merlo and J. Fernández-López. 2003. SYNCHRO: A SAS program for analysing the floral phenological synchronisation in seed orchards. *Silvae Genetica* 52(5-6): 212-215.
- Zobel, B.J. y J. Talbert. 1988. *Técnicas de Mejoramiento Genético de Árboles Forestales*. Limusa, México, D.F. 545 p.