

Recibido 03 de abril de 2014 // Aceptado 26 de agosto de 2014 // Publicado online 17 de septiembre de 2014

Potencialidad de especies y procedencias de *Cedrela* para el establecimiento de plantaciones sustentables en diferentes ambientes del Noroeste Argentino

GRIGNOLA, J.¹; ACRECHE, M.¹; DI RIENZO, J.²; GATTO, M.³; FORNES, L.¹

RESUMEN

El género *Cedrela* incluye árboles tropicales y sub-tropicales con madera de alto valor en el mercado. Las especies se distribuyen en un amplio rango de distribución que abarca desde el Sur de México hasta Argentina, donde se las puede encontrar dentro de las Yungas y de la Selva Paranaense. Frente al cambio climático global, la pérdida de biodiversidad, cambios en la dinámica de distribución de las especies a través del tiempo y cómo éstas se comportan en diferentes hábitats, son temas intensamente estudiados actualmente. En este sentido, la evaluación del comportamiento entre y dentro de las distintas procedencias de *Cedrela fissilis*, *C. balansae*, *C. saltensis* y el híbrido natural entre estas dos últimas, comparado con testigos comerciales en diferentes ambientes, ofrece información básica para programas de domesticación y para los planes de producción sustentable y conservación en el marco de la ley nacional 26.331 de ordenamiento territorial. Para esto, se evaluaron tres ensayos de campo ubicados en sitios ecológicamente contrastantes en el NOA. Las especies y procedencias fueron comparadas en términos de crecimiento en altura y supervivencia al tercer año en El Siambón (Tucumán-Selva Montana), La Moraleja (Salta-Umbral al Chaco) y La Fronterita (Tucumán-Pedemonte). El diseño del experimento fue en bloques completamente aleatorizados con 16 repeticiones en La Moraleja y La Fronterita, y 8 repeticiones en El Siambón. Se detectó una interacción significativa a nivel de especies y procedencias con respecto a los sitios de ensayo. En general, la supervivencia fue afectada luego del primer invierno, indicando una alta sensibilidad del género a las bajas temperaturas en el periodo de "establecimiento". Se determinó que las precipitaciones de los sitios de procedencia de las semillas tienen un efecto significativo sobre las variables estudiadas en cada sitio. Así, aquellas poblaciones provenientes de sitios más secos son las que mejor se adaptaron en el sitio La Moraleja y, aquellas provenientes de sitios más húmedos, en El Siambón. Asimismo, la supervivencia aumentó a medida que la temperatura mínima absoluta se incrementó. Los resultados resaltan la importancia de considerar el origen de las semillas al momento de realizar un emprendimiento forestal con estas especies. El material remanente en cada sitio y que logró el mayor desarrollo tiene mucho valor y servirá de fuente para continuar el programa de domesticación con fines productivos y de rescate del material genético con fines de conservación.

Palabras claves: *Cedrela*, ensayos de procedencias, interacción genotipo por ambiente, plasticidad, crecimiento, conservación.

¹INTA-EEA Famaillá, Ruta 301–Km 32, C.P.:4132 Famaillá, Tucumán. Argentina.

Correo electrónico: grignola.josefina@inta.gov.ar; fornes.luis@inta.gov.ar; acreche@correo.inta.gov.ar.

²Cátedra de Estadística y Biometría, Facultad de Ciencias Agropecuarias. UNC. C.P.:5000 Córdoba. Argentina.

Correo electrónico: dirienzo@agro.unc.edu.ar.

³Instituto de Protección Vegetal. Facultad de Ciencias Forestales. UNSE. C.P.:4200 Santiago del Estero. Argentina.

Correo electrónico: miguelgatto@yahoo.com.ar .

ABSTRACT

The genus *Cedrela* includes tropical and sub-tropical trees with high value timber on the market. The species are distributed in a range that extends from southern Mexico to Argentina, where they can be found within the Yungas and Paranaense Rainforest. Face of global climate change, biodiversity loss, changes in the dynamics of species distributions over time and how they behave in different habitats are currently intensively studied topics. In this regard, the evaluation of behavior between and within the different provenances of *Cedrela fissilis*, *C. balansae*, *C. saltensis* and natural hybrid between these last two, compared to commercial standards checks in different environments, provides basic information for domestication programs and plans for sustainable production and conservation in the context of national law 26.331 of land administration. For this reason three field trials located in ecologically contrasting sites were evaluated in the NOA. Species and provenances were compared in terms of height growth and survival until the third year in the Siambón (Tucumán-Selva Montana La Moraleja (Salta-Umbral al Chaco) and The Fronterita (Tucumán-Pedemonte). The experiment was conducted in a complete randomized block design with 16 replications in La Moraleja and La Fronterita, and eight repetitions in El Siambón. A significant interaction among species provenances, and the test site was found. Survival was affected after the first winter, revealing a high sensitivity to low temperatures of this genus in the period of "establishment". Results also revealed that precipitations on the sites from which the seeds come have a significant effect on the variables studied in each evaluation site. Those populations from drier sites were best adapted to the La Moraleja and those from wetter sites performed best in El Siambón. In addition, the survival of populations increased as the absolute minimum temperature increased. This study emphasizes the importance of considering the origin of the seeds for a forestry project involving these species. The material remaining in each site and achieved the highest development is very valuable and will serve as a source for further domestication program for productive purposes and rescue the genetic material for conservation.

Keywords: *Cedrela*, provenances trials, genetic by environmental interaction, plasticity, growth, conservation.

INTRODUCCIÓN

En la Argentina se encuentran la Selva Tucumano-Oranense o Yungas y la Selva Paranaense, dos selvas subtropicales que si bien representan solo el 2% del territorio continental, albergan más del 50% de la biodiversidad general del país (Brown y Kappelle, 2001).

En ambas selvas, un número considerable de especies forestales nativas se encuentran en estado "vulnerable" o "en peligro" según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés). Las mismas presentan alto valor comercial en el mercado de productos forestales. Un caso destacado dentro de estas especies son las pertenecientes al género *Cedrela*, cuya excelente calidad de madera motivó una intensa explotación selectiva (Minetti, 2006). *Cedrela* se caracteriza por incluir especies de árboles tropicales y sub-tropicales con madera de alto valor. En el Noroeste de la Argentina, este género se ubica en los diferentes pisos altitudinales de las Yungas y es representado por las especies *C. angustifolia* C. DC en el Bosque Montano, *C. balansae* C. DC. en la Selva Pedemontana (SP) y *C. saltensis* en la Selva Montana (Zapater *et al.*, 2004), mientras que en el Noreste, en la Selva Paranaense, se encuentra *C. fissilis* Vell. (Pennington y Styles, 1975).

Desde tiempos coloniales estos ecosistemas, sobre todo la SP, fueron sometidos a procesos muy severos de degra-

dación, principalmente, por el avance de la frontera agropecuaria hacia zonas marginales y el avance tecnológico (Vallejos y Schnake, 2008). Esto llevó a la formación de grandes zonas de transición, desmontadas, en proceso de desertificación o de deterioro ambiental, donde la actividad agrícola no es sustentable a mediano plazo. La cercanía de la SP a centros poblados y rutas de comunicación (caminos, ferrocarril, tendidos eléctricos, gasoductos) ha potenciado su degradación y transformación para actividades agrícolas y ha generado mayor presión de incendios, cacería y obtención de madera en forma no sustentable, incluso de manera ilegal.

Ello ha generado la actual situación en la cual la SP representa el ambiente más amenazado de las Yungas (Brown y Malizia, 2004), y uno de los sistemas forestales más amenazados a nivel nacional (Brown *et al.*, 2006).

Por otra parte, es importante considerar los cambios globales que están sucediendo a nivel climático, los cuales se advierten en el aumento significativo de las concentraciones atmosféricas de CO₂ por acción antrópica (Gallo, 2013; IPCC, 2007), produciendo variaciones drásticas de temperatura y humedad, incremento poblacional de las principales plagas y enfermedades que atacan a los cultivos (Régnière *et al.*, 2009).

La búsqueda de genotipos de alto nivel productivo, adaptados a las nuevas condiciones ambientales es, en un

contexto de cambio climático y de búsqueda de sustentabilidad, una prioridad. Una estrategia válida consiste en realizar selecciones a nivel poblacional e individual, y pruebas de plasticidad y tolerancia (Gallo, 2013).

Así, el monitoreo de los factores climáticos relacionados al desarrollo natural de las especies nativas de las selvas sub-tropicales son determinantes para la elección de modelos y sistemas adecuados a diferentes condiciones para la producción forestal y la identificación de zonas con aptitud bio-ecológica para su desarrollo. En este contexto es donde radica la contribución de este trabajo, brindando información básica para la domesticación de estas especies.

En este sentido, la capacidad de superar el período de establecimiento inicial de las plantas en ambientes o sistemas silviculturales diferentes constituye una limitante para el éxito del cultivo del cedro. Esto involucra, fundamentalmente, los tres primeros períodos vegetativos de los plantines a campo, donde son amenazados, principalmente, por factores abióticos. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es la evaluación del comportamiento en términos de crecimiento y supervivencia de distintas especies y procedencias de *Cedrela* dentro y entre diferentes ensayos de campo ubicados en zonas ecológicamente contrastantes en el Noroeste.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se condujeron tres ensayos a campo durante tres años consecutivos (2008, 2009, 2010) en sitios ecológicamente contrastantes del NOA (tabla 1). Para ello, se colectaron semillas de árboles fenotípicamente superiores de poblaciones naturales de *Cedrela fissilis*, *Cedrela balansae*, *Cedrela saltensis*, *Cedrela angustifolia* (ex *Cedrela lilloi*) y de zonas híbridas localizadas entre los 750 y 950 m de altitud. Este trabajo fue enmarcado en el proyecto nacional de "Domesticación de especies de *Cedrela* para su cultivo en las selvas subtropicales argentinas" que llevó a cabo el INTA entre los años 2006 y 2009. La selección de los árboles

que conformaron la población base de mejora se realizó en base a criterios sanitarios y productivos. Así, árboles con sintomatología de alguna enfermedad fueron excluidos y sólo se consideraron aquellos con buena forma en cuanto a rectitud y con una longitud de fuste superior a 7 m. De esta forma, nos asegurarnos indirectamente que tales ejemplares escaparon al ataque de la plaga *H. grandella* en los primeros años de vida. La distancia entre los árboles seleccionados dentro de cada población debía superar los 100 m para intentar minimizar las relaciones de parentesco cercanas (Gillies *et al.*, 1999; Lowe *et al.*, 2003).

Dado que *C. angustifolia* presenta ciclos muy largos de ausencia de producción de frutos (Aschero, 2006), se cosecharon pocos individuos y se juntaron todas estas semillas en un grupo al cual se lo denominó Colecta masal L. A modo de testigos comparativos, se utilizaron semillas comerciales de especies de las familia Meliaceae, *Toona ciliata* y *Cedrela odorata*.

Mediante el uso de marcadores moleculares, combinando ITS (Internal Transcriber Spacer) y AFLP (Amplified Fragment Length Polymorphism) (Zelner 2013, comunicación personal), se identificaron los individuos híbridos entre *C. balansae* y *C. saltensis* dentro una misma población.

Las semillas recolectadas se sembraron en bandejas de 25 alveolos de 100 cc cada uno con un compost constituido por una mezcla de perlita expandida de uso agrícola (25%), fibra de coco y turba rubia (75%) y fertilizante de liberación lenta (16-8-12+2MgO+5S+TE). Los plantines se viverizaron en la Estación Experimental Agropecuaria Famaillá del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA Famaillá).

La tabla 2 describe las características de los sitios de donde proceden las semillas de las diferentes especies.

En diciembre de 2008 se llevaron a campo los plantines utilizando un diseño experimental de bloques completamente aleatorizados con 16 repeticiones en La Moraleja y La Fronterita, y 8 repeticiones en El Siambón.

| Sitio | Latitud S | Longitud O | Altitud (m snm) | Temp máx. media anual (°C) | Temp mín. media anual (°C) | Temp. mín. absoluta (°C) | Precip. medias anuales (mm) | N.º de plantas x bloque |
|--------------------------------------|-----------|------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| La Moraleja (Umbral al Chaco, Salta) | 24° 18' | 64° 01' | 374 | 34,4 | 5,9 | -4,6 | 850 | 100 |
| La Fronterita (Pedemonte, Tucumán) | 26° 58' | 65° 30' | 653 | 31,3 | 7,0 | -1,5 | 1400 | 110 |
| El Siambón (Selva Montana, Tucumán) | 26° 43' | 65° 26' | 1170 | 30,5 | 3,5 | -5,8 | 1200 | 90 |

Tabla 1. Ubicación y características ambientales de los sitios donde se colocaron los ensayos de procedencias y especies del género *Cedrela*.

| Especie | Procedencia | Latitud S | Longitud O | Altitud (m) | Temp media anual (°C) | Temp. mín. media anual (°C) | Temp. max. anual (°C) | Precipitación anual (mm) |
|---|-------------|-----------|------------|-------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------|
| <i>C. balansae</i> | San Andrés | 23°05' | 64°40' | 400 | 21,9 | 16,1 | 27,7 | 1000 |
| | Calilegua | 23°42' | 64°51' | 700 | 17,7 | 11 | 24,3 | 1200 |
| | Ledesma | 23°49' | 64°47' | 400 | 18 | 12 | 25 | 800 |
| | Pintascayo | 22°51' | 64°36' | 900 | 21 | 16 | 27,7 | 1300 |
| | Río Seco | 22°31' | 63°57' | 700 | 23,9 | 16 | 31,5 | 900 |
| <i>C. fissilis</i> | Guaraní | 26°55' | 54°13' | 470 | 24 | 8 | 38 | 2130 |
| | San Antonio | 26°03' | 53°46' | 500 | 23,3 | 7 | 35,5 | 2130 |
| Híbrido <i>C. saltensis</i> x <i>C. balansae</i> | Calilegua | 23°42' | 64°51' | 791 | 17,7 | 11 | 24,3 | 1300 |
| | Pintascayo | 22°51' | 64°36' | 976 | 21 | 16 | 27,7 | 1400 |
| <i>C. saltensis</i> | San Andrés | 23°05' | 64°40' | 900 | 21,9 | 16,1 | 27,7 | 1300 |
| | Pintascayo | 22°51' | 64°36' | 836 | 21 | 16 | 27,7 | 1400 |
| <i>C. angustifolia</i> (Col_masal_L) | | | | | Pool de semillas | | | |
| <i>C. odorata</i> (Testigo_O) | | | | | Semillas comerciales | | | |
| <i>Toona ciliata</i> (Testigo_T) | | | | | Semillas comerciales | | | |

Tabla 2. Especies y procedencias incluidas en los ensayos con datos de latitud-longitud, altitud media, temperatura media anual, temperatura mínima y máxima media anual y precipitación media anual de cada sitio.

En cada sitio, cada especie estuvo representada por un número variable de plantas las cuales fueron identificadas con un código que combina el origen geográfico de la semilla (procedencia) con la especie. Cada planta se ubicó aleatoriamente en los bloques como parcelas mono-árbol, con un distanciamiento entre plantas de tres metros en ambos sentidos. Se realizó una reposición de las fallas al primer y segundo mes posterior a la implantación.

Las variables evaluadas fueron la supervivencia y el crecimiento en altura al tercer año en campo. La altura total (cm) se midió anualmente de forma directa con vara telescópica, desde la base hasta el ápice de cada planta. Esta variable (promediada sobre todos los materiales ensayados) suele utilizarse como indicador de la calidad del sitio. La supervivencia se evaluó, luego de cada invierno, durante los tres años de ensayo, como el número de plantas vivas respecto al número inicial de plantas. Esta variable se modeló teniendo en cuenta el efecto de la temperatura mínima absoluta registrada en cada ensayo. La respuesta de la sobrevida a la temperatura mínima absoluta puede utilizarse como un indicador de la capacidad de adaptación del material a las condiciones ambientales del sitio en especies sensibles a bajas temperaturas (Chambers *et al.*, 1996).

El análisis estadístico de la variable altura total se focalizó en la altura total registrada al tercer año. Se espera que las diferencias iniciales, posteriores a la implantación, hayan sido superadas y la altura al tercer año refleje mejor el comportamiento futuro. A los fines del análisis estadístico, los efectos de especie y sitio se modelaron me-

dante un único factor fijo consistente en la combinación sitio-especie. Esta forma de modelar el efecto de dos factores es una estrategia común cuando existe desbalance de celdas en el diseño (no todas las especies estuvieron presentes en todos los sitios). Además, se incluyeron los siguientes efectos aleatorios para contemplar la estructura de parcela: repetición (bloques), procedencia y familia anidada en procedencia. Para el análisis a nivel de poblaciones, se utilizó la combinación sitio por población como efecto fijo, mientras que la parte aleatoria incluyó el efecto repetición y familia.

Para modelar la variable número de plantas vivas al final del tercer año (sobrevida), se utilizó un modelo lineal generalizado mixto para variables binomiales. Teniendo en cuenta resultados preliminares que relacionan negativamente la sobrevida con las bajas temperaturas, el efecto fijo del sitio se incorporó como una co-variable: la temperatura mínima absoluta (TMA). Asimismo, los efectos fijos incluyeron también a la especie y su interacción con las TMA. Las temperaturas que se utilizaron corresponden a los registros en cada sitio de ensayo a campo (tabla 1). Los efectos aleatorios fueron sitio, que se incorporó a este nivel para contemplar efectos no capturados por la TMA, repetición, procedencia y familia anidada dentro de procedencia. La interacción TMA por especie supone una relación de dependencia de la sobrevida con TMA diferente para cada especie. La idea de la modelación es describir de manera sintética los datos observados. La interacción especie por TMA, supone la inclusión de un gran número de parámetros que permiten estimar pendientes diferentes, una para cada especie. Este no es un

modelo simple por lo que, para reducirlo, se aplicó la técnica "eliminación hacia atrás" (backward elimination).

Para medir el grado de asociación entre supervivencia y altura total promedio de cada población con respecto a su altitud y precipitación en cada sitio de ensayo se calculó el coeficiente de correlación de Pearson.

El ajuste del modelo para altura se realizó utilizando la función lme de la librería nlme (Pinheiro *et al.*, 2013), mientras que para el análisis del número de plantas vivas al tercer año se utilizó la función glmer de la librería lme4 (Bates *et al.*, 2013). Tanto lme como lme4 son librerías del programa R (R Development Core Team, 2013), y se utilizaron mediante la interfaz implementada en InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las medias para la variable altura total se representan en la figura 1. Las medias rotuladas con letras diferentes difieren significativamente para un nivel de significación del 5% según la prueba de comparaciones múltiples DGC (Di Rienzo *et al.*, 2002). Debido a que las diferencias siguen patrones cambiantes según el ambiente en el que se evalúan, la variable altura total muestra interacción especie por ambiente.

Este tipo de interacción (genotipo por ambiente) posee un interés especial en el mejoramiento genético dado que significa que el rendimiento relativo de familias, procedencias o especies difiere cuando éstas crecen en sitios distintos. Encontrar este tipo de interacción puede resultar de gran utilidad cuando se desea maximizar ganancias en ambientes específicos, pero dicha interacción puede transformarse en una enorme barrera cuando se tratan de obtener líneas de amplia adaptación apropiadas para distintos ambientes.

El sitio La Moraleja, fue el que presentó mayores valores en la variable altura total en el tercer año, seguido por el sitio La Fronterita y, finalmente, por El Siambón, el cual presentó el menor crecimiento promedio de plantas en altura total (figura 1).

La fuerte interacción genotipo por ambiente resultó en que, para cada ambiente, una especie diferente se destaca del resto. De esta forma, se observa que:

En el sitio La Moraleja la especie que mayor altura total alcanzó fue *C. balansae*, la cual no presentó diferencias estadísticamente significativas con Híbrido ni con *C. odorata*, pero sí fue ampliamente superior a *C. fissilis* y a *C. saltensis* (figura 1).

En el sitio El Siambón, *C. fissilis* alcanzó la mayor altura total (figura 1), aunque no presenta diferencias estadísticamente significativas con respecto al Híbrido y *C. balansae*.

En el sitio La Fronterita, el Híbrido fue superior para la variable altura total presentando diferencias estadísticamente significativas con respecto a las demás especies (figura 1).

El resto de las especies tuvieron valores de altura total sensiblemente inferiores en cada sitio y en algunos casos ausencia de plantas. Por ejemplo:

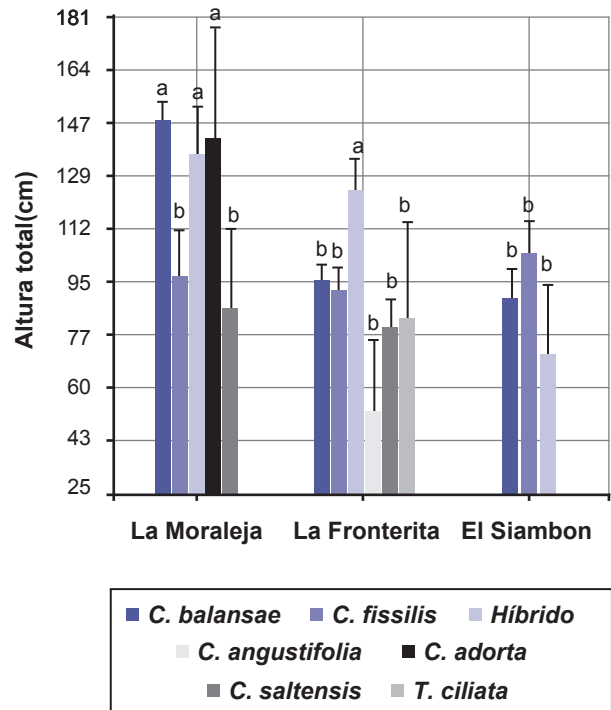


Figura 1. Altura total alcanzada por cada especie del género *Cedrela* en los tres sitios estudiados (La Moraleja, La Fronterita y El Siambón). Las barras verticales asociadas a cada columna representan el error estándar de la media. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

C. saltensis sólo se pudo medir en La Moraleja y en La Fronterita, presentando valores de altura total sensiblemente inferiores a *C. balansae* e Híbrido (figura 1).

C. odorata sólo se pudo medir en La Moraleja y *C. angustifolia* en el sitio La Fronterita. En el caso de *C. odorata*, si bien presentó un comportamiento destacado para la variable altura total, el CV fue elevado. Lo mismo sucedió con el CV de *C. angustifolia*, en este caso con valores extremadamente inferiores a las demás especies (figura 1).

T. ciliata sólo se pudo medir en La Fronterita y su altura total no se diferenció de forma significativa a la mayoría de las especies analizadas, excepto al Híbrido.

Respecto de los componentes aleatorios, es interesante observar que más del 90% de la varianza total se debe a la variabilidad entre plantas, que el porcentaje de varianza explicada por la procedencia es despreciable, que la variabilidad debida a familia dentro de procedencias es del orden del 3%, y que el resto de la variabilidad es explicada por la variación entre repeticiones.

La supervivencia de todas las especies analizadas se vieron sensiblemente influenciadas por la temperatura mínima absoluta registradas en los diferentes sitios (interacción especie por TMA $p < 0.0001$). Esto explica, en parte, que luego de cada temporada invernal, sobre todo al evaluar la supervivencia al primer año, hubo una gran disminución de plantas en todos los ensayos.

Los valores ajustados por el modelo de supervivencia para cada especie en función de temperatura mostró un incremento a medida que la temperatura mínima absoluta

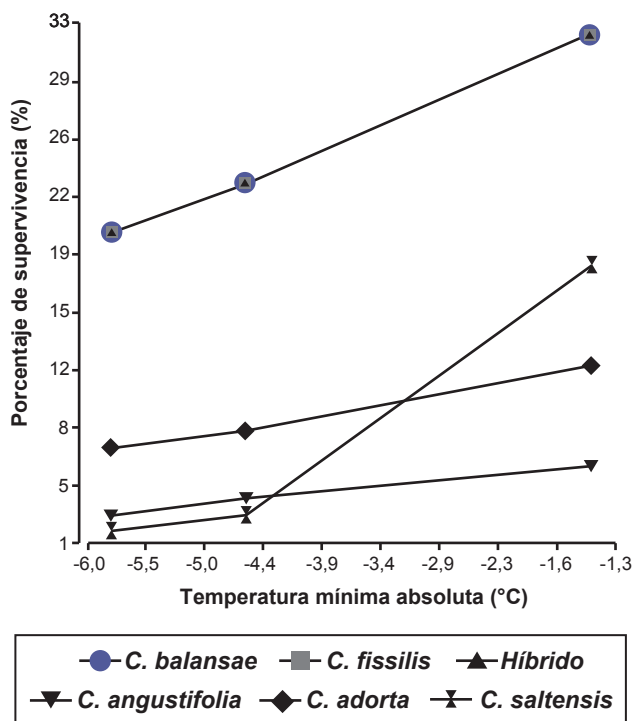


Figura 2. Porcentaje de supervivencia ajustados por el modelo como función de la temperatura mínima absoluta para diferentes especies del género *Cedrela*.

aumentó (figura 2). En este sentido, se distinguen cuatro patrones de comportamiento de las especies ante los cambios en la temperatura mínima absoluta.

Híbrido, *C. fissilis* y *C. balansae* comparten la misma tendencia en cuanto a supervivencia, siendo las especies que mayor sobrevivencia tuvieron cuando las temperaturas fueron muy bajas. Por ejemplo, a $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ la supervivencia fue de un 32 % y a $-5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ fue de 20% (figura 2).

C. saltensis es la especie que menor supervivencia presentó cuando las temperaturas eran inferiores a $-4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, la sobrevivencia aumenta drásticamente a medida que aumenta la temperatura mínima absoluta, llegando a tener 18% de supervivencia a $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (figura 2).

Meloni *et al.* (2010), estudiaron la sensibilidad a las bajas temperaturas de una población de *C. angustifolia*. La misma mostró ser muy sensible a un estrés severo por bajas temperaturas ($10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el día y $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante la noche). Esto resulta ser consecuente con lo registrado en los ensayos de campo planteados en este trabajo.

A nivel poblacional (tabla 3), se puede observar que la altitud de la fuente de semilla (procedencia) no explica la variación en la altura total de las plantas a los tres años, aunque se puede advertir que las precipitaciones de los sitios de procedencia tienen un mayor efecto. De esta forma, aquellas poblaciones provenientes de sitios más secos son las que mejor se adaptaron en el sitio La Moraleja, que es el sitio con menor precipitación ($r = -0,72^{**}$). Este ensayo se encuentra ubicado en una zona de transición hacia la zona semiárida (umbral al Chaco) con una precipitación media anual de solo 850 mm y una

| Especie | Poblaciones | Altitud media (m) | Precipitación media anual (mm) | Altura total año 3 | | |
|------------------------|-----------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|----------------|----------------|
| | | | | La Moraleja | La Fronterita | El Siambón |
| <i>C. balansae</i> | San Andrés_B | 400 | 1000 | 133,2 ± 9,9 a | 95,5 ± 8,4 b | 99,7 ± 19,9 b |
| | Calilegua_B | 700 | 1200 | 152,0 ± 12,2 a | 110,7 ± 10,8 a | 91,1 ± 15,5 b |
| | Ledesma_B | 400 | 800 | 153,1 ± 8,6 a | 83,9 ± 9,1 b | 91,4 ± 17,4 b |
| | Pintascayo_B | 900 | 1300 | 146,5 ± 31,6 a | 92,0 ± 10,6 b | 77,5 ± 23,1 b |
| | Río Seco_B | 700 | 900 | 152,9 ± 7,4 a | 96,3 ± 7,2 b | 89,8 ± 15,5 b |
| Híbrido | San Andrés_H | 470 | 2130 | 115,4 ± 36,4 a | 132,5 ± 20,3 a | 97,8 ± 36,6 b |
| | Calilegua_H | 500 | 2130 | 137,2 ± 16,7 a | 133,3 ± 13,5 a | 53,8 ± 28,7 b |
| | Pintascayo_H | 791 | 1300 | 212,0 ± 62,9 a | 96,5 ± 21,2 b | - |
| <i>C. saltensis</i> | San Andrés_S | 976 | 1400 | 81,0 ± 28,6 b | 80,7 ± 9,8 b | - |
| | Pintascayo_S | 900 | 1300 | 114,0 ± 62,8 a | 60,7 ± 25,8 b | - |
| <i>C. fissilis</i> | Guaraní_F | 836 | 1400 | 101,9 ± 28,3 b | 90,8 ± 13,2 b | 91,6 ± 19,1 b |
| | San Antonio_F | 900 | 1300 | 93,7 ± 17,9 b | 92,8 ± 8,8 b | 109,6 ± 12,5 a |
| <i>C. angustifolia</i> | Colecta_masal_L | | Pool de semillas | - | 50,9 ± 24,0 b | - |
| <i>T. ciliata</i> | Testigo_T | | Semillas comerciales | - | 82,4 ± 31,5 b | - |
| <i>C. odorata</i> | Testigo_O | | Semillas comerciales | 140,3 ± 36,4 a | - | - |

Tabla 3. Altura total media (cm) alcanzada al tercer año por cada población anidada en especie ajustadas para cada sitio (La Moraleja, La Fronterita y El Siambón). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

| Especies | Poblaciones | Supervivencia año 3 (%) | | |
|------------------------|---------------|-------------------------|---------------|------------|
| | | La Moraleja | La Fronterita | El Siambón |
| <i>C. balansae</i> | San Andrés_B | 33 ± 5 a | 36 ± 5 a | 12 ± 4 a |
| | Calilegua_B | 20 ± 4 b | 24 ± 4 b | 27 ± 7 a |
| | Ledesma_B | 36 ± 4 a | 26 ± 4 b | 13 ± 4 a |
| | Pintascayo_B | 3 ± 1 b | 36 ± 6 a | 13 ± 5 a |
| | Río Seco_B | 32 ± 4 a | 33 ± 4 a | 13 ± 4 a |
| Híbrido | San Andrés_H | 9 ± 5 b | 25 ± 4 b | 17 ± 10 a |
| | Calilegua_H | 18 ± 5 b | 28 ± 6 b | 19 ± 9 a |
| | Pintascayo_H | 6 ± 6 b | 57 ± 14 a | 0 b |
| <i>C. saltensis</i> | San Andrés_S | 4 ± 2 b | 9 ± 4 b | 0 b |
| | Pintascayo_S | 3 ± 3 b | 17 ± 7 b | 0 b |
| <i>C. fissilis</i> | Guaraní_F | 2 ± 1 b | 38 ± 7 a | 36 ± 10 a |
| | San Antonio_F | 6 ± 2 b | 37 ± 5 a | 43 ± 8 a |
| <i>C. odorata</i> | Testigo_O | 18 ± 10 b | 0 b | 0 b |
| <i>T. ciliata</i> | Testigo_T | 0 b | 23 ± 11 b | 0 b |
| <i>C. angustifolia</i> | Col_masal_L | 0 b | 9 ± 4 b | 0 b |

Tabla 4. Porcentaje de supervivencia de cada población anidada en especie ajustadas para cada sitio (La Moraleja, La Fronterita y El Siambón) al cabo de tres años de plantación.

elevada amplitud térmica (ΔT) (30°C) en la época con déficit hídrico.

En La Moraleja, las poblaciones de Ledesma, San Andrés, Calilegua, Río Seco y Pintascayo pertenecientes a *C. balansae* no presentaron diferencias significativas para la variable altura total, a pesar de que Pintascayo proviene de un franja de mayor altitud y se solapa con el hábitat de *C. saltensis*. En cuanto a la supervivencia, justamente estas poblaciones son las que mayores porcentajes de supervivencia tuvieron, excepto Pintascayo que apenas alcanzó el 3%.

Por otro lado, las poblaciones que provienen de sitios más húmedos se adaptaron mejor en El Siambón ($r=0,87^{**}$), tales como Guaraní y San Antonio de *C. fissilis*.

Los resultados mostrados en la tabla 3, concuerdan con los obtenidos por Ruiz *et al.* (2013), donde las poblaciones de *C. balansae* logran mejor rendimiento que las de *C. fissilis* bajo un régimen de déficit hídrico severo, en particular la población procedente de Ledesma, la cual crece naturalmente en un régimen de precipitación promedio de 863 mm anuales. Por su parte Soldati *et al.* (2013), mediante un estudio realizado con marcadores moleculares AFLP y SSR, concluyó que *C. balansae* constituye una única población en la Argentina, en la cual la mayor variabilidad genotípica se halla entre individuos.

En La Fronterita, se destacan las poblaciones de San Andrés y Calilegua pertenecientes al Híbrido, las cuales presentan los mayores valores de altura total y supervivencia, diferenciándose del resto de las especies. La población de Pintascayo (Híbrido), se destacó del resto de las poblaciones por tener la mayor supervivencia (57%), lo cual no deja

de ser razonable ya que las altitudes de la procedencia y del sitio de ensayo son similares (tabla 3 y 4).

En La Fronterita, todas las poblaciones que componen a la especie *C. balansae* tuvieron los mayores valores de supervivencia, en especial las localidades de Pintascayo, San Andrés y Río Seco que se destacaron del resto (tabla 4). De forma general, en este sitio es donde sobrevivió un mayor espectro de especies (Híbrido, *C. fissilis*, *C. balansae* y *C. saltensis*).

En El Siambón, *C. fissilis*, más específicamente la población San Antonio, es la que mejor comportamiento mostró, presentando un 43% de supervivencia al tercer año de evaluación y una altura total promedio de 106 cm, diferenciándose estadísticamente del resto de las especies estudiadas (tabla 3 y 4). Justamente, este sitio se encuentra ubicado a mayor altitud y registró las condiciones más adversas de temperatura en los tres ciclos de estudio.

De los resultados mostrados en este trabajo se desprende que los diferentes ambientes donde se probó todo el material genético disponible actuaron como un filtro inflexible, forzando a las diferentes poblaciones anidadas en especies a expresar su capacidad de adaptación a las condiciones más extremas (bajas temperaturas y déficit hídrico en ciertos casos). De esta forma, se demarcaron condiciones agroecológicas más y menos propicias como área potencial para el cultivo sustentable del cedro en las Yungas. Sumado a esto, las condiciones silvícolas en que se probaron también fueron extremas dado que se plantaron a cielo abierto y sin protección alguna. En su hábitat natural las diferentes especies se protegen unas a otras en

rodiales disetáneos mixtos donde conviven naturalmente. Esta situación se podría encontrar en otras condiciones de cultivo, como ser el sistema silvicultural llamado "enriquecimiento", en el que se busca incrementar la frecuencia de especies de mayor valor económico en zonas degradadas o empobrecidas donde dichas especies ya fueron aprovechadas. Tal sistema, se contempla como alternativa de producción sustentable para las "zonas amarillas" donde el cambio de uso del suelo está prohibido, según la ley nacional 26.331 en vigencia. Sólo en el NOA, las áreas amarillas ubicadas en el pedemonte superan el millón de hectáreas, surgiendo así una gran oportunidad productiva sustentable de enriquecimiento con especies de alto valor socioeconómico y ecosistémico.

Se podría decir que las estrategias de adaptación a diferentes condiciones ambientales varían según las procedencias de los individuos, sin poder delinear un comportamiento único por especie. Esto indica que las plantas crecidas en condiciones ambientales distintas logran mecanismos de adecuación diferentes por efectos de la divergencia y la selección natural.

Por lo tanto, resultaría muy importante considerar el origen de las semillas en el momento de la planificación de un emprendimiento forestal con estas especies y considerar que la mayor variabilidad se encuentre a nivel familiar o individual.

El material que sobrevivió en estos ensayos y logró el mayor desarrollo, es de indudable valor y servirá de fuente para continuar el programa de domesticación y rescate del material genético dado que pasó por un proceso de selección bajo condiciones ambientales y silviculturales estrictas.

CONCLUSIONES

En general, este estudio es de interés a la hora de recomendar especies y procedencias en relación a los diferentes ambientes en planes de producción sustentable y conservación reguladas por la ley 26.331. A su vez, resulta de importancia para la domesticación de especies nativas de alto valor, ya que permiten ubicar fuentes geográficas de material vegetal superior para incluir en los programas de mejora. Las conclusiones a las cuales se llegó fueron:

Las especies y poblaciones de *Cedrela* probadas bajo estrictas condiciones ambientales y silviculturales tuvieron baja supervivencia. La mayor disminución de plantas vivas ocurrió luego del primer invierno, indicando alta sensibilidad a las bajas temperaturas en el periodo de "establecimiento".

C. fissilis, especialmente la procedencia de San Antonio, mostró un mejor comportamiento en El Siambón, ubicado en la franja entre los 800 y 1100 msnm. Esta especie presenta un particular comportamiento adaptativo a las bajas temperaturas aunque con alta variabilidad individual.

C. balansae se destacó en La Moraleja, mostrando mayor supervivencia las plantas procedentes de San Andrés, Ledesma y Rio Seco. En este ensayo, las plantas estuvieron expuestas a bajas temperaturas y estrés hídrico severo

por ser una zona de transición entre Pedemonte y Chaco.

El Híbrido natural entre *C. balansae* y *C. saltensis* expresó su "vigor híbrido" en La Fronterita (653 msnm), principalmente la procedencia de Pintascayo. El híbrido mostró un comportamiento intermedio entre sus parentales en el resto de los sitios de ensayo.

C. saltensis y *C. angustifolia*, así como las especies testigos (*C. odorata* y *T. ciliata*), no tuvieron desempeños destacados para la altura total y supervivencia. Seguramente se precisa contar con una mayor amplitud de procedencias para definir mejor el comportamiento de estas especies.

La Fronterita se puede considerar con mayor aptitud para el desarrollo de plantaciones con fines productivos, sobre todo para *C. balansae* y *C. fissilis*. El Siambón tuvo la menor supervivencia general, aunque *C. fissilis* alcanzó el 40%. La Moraleja resultó tener mayor aptitud para *C. balansae*.

BIBLIOGRAFÍA

- ASCHERO, V. 2006. Biología reproductiva e importancia de la polinización en *Cedrela lilloi*. In: Pacheco, S., Brown, A. (Eds.), Biología Reproductiva e Importancia de La Polinización En *Cedrela lilloi*. pp. 41–50.
- BATES, D.; MAECHLER, M.; BOLKE, B.; WALKER, S. 2013. Linear mixed-effects models using Eigen and S4. Package "lme4."
- BROWN, A.D.; KAPPELLE, M. 2001. Introducción a los bosques nublados de latinoamerica. Una síntesis regional. In: Brown, A.D., Kappelle, M. (Eds.), Bosques Nublados de Latinoamerica. Editorial INBio, Costa Rica, p. 29.
- BROWN, A.D.; MALIZIA, L.R. 2004. Las Selvas Pedemontanas de las Yungas. *Cienc. Hoy* 14, 52–63.
- BROWN, A.D.; PACHECO, S.; LOMÁSCOLO, T.; MALIZIA, L. 2006. Situación ambiental en los bosques andinos Yungueños. In: Brown, A., Martínez Ortiz, U., Acerbi, M., Corchera, J. (Eds.), La Situación Ambiental Argentina 2005. Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires, Argentina, pp. 53–71.
- CHAMBERS, P.G.S.; BORRALHO, N.M.G; POTTS, B.M. 1996. Genetic Analysis of Survival in *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus*. *Silvae Genet.* 45, 2–3.
- DI RIENZO, J.A.; GUZMAN, A.W.; CASANOVES, F. 2002. A multiple-comparisons method based on the distribution of the root node distance of a binary tree. *J. Agric. Environ. Stat.* 7: 129–142.
- DI RIENZO, J.A.; CASANOVES, F.; BALZARINI, M.G.; GONZALEZ, L.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. 2013. *InfoStat*.
- GALLO, L. 2013. Domesticación y mejora de las especies forestales nativas para la incertidumbre climática. *Rev. Prod. For.* 7, 39–42.
- GILLIES, A.C.M.; NAVARRO, C.; LOWE, A.J.; NEWTON, A.C.; HERNÁNDEZ, M.; WILSON, J.; CORNELIUS, J.P. 1999. Genetic diversity in Mesoamerican populations of mahogany (*Swietenia macrophylla*), assessed using RAPDs. *Heredity*. 83, 722–732.
- IPCC, 2007. Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Ginebra, Suiza. 104 p.
- LOWE, A.J.; JOURDE, B.; BREYNE, P.; COLPAERT, N.; NAVARRO, C.; WILSON, J.; CAVERS, S. 2003. Fine-scale genetic

structure and gene flow within Costa Rican populations of mahogany (*Swietenia macrophylla*). *Heredity*. 90, 268–275.

Meloni, D.A., Fornés, L., Gulotta, M.R., Silva, D.M., 2010. Tolerancia de *Cedrela lilloi* C. DC. a bajas temperaturas: cambios metabólicos. *Quebracho* 18, 16–23.

MINETTI, J.M. 2006. Aprovechamiento forestal de cedro en las Yungas de Argentina. In: Brown Alejandro, Pacheco Silvia (Eds.), *Ecología Y Producción de Cedro (genero Cedrela) En Las Yungas Australes*. LIEY-proyungas, Argentina, pp. 143–154.

PENNINGTON, T.D.; STYLES, B.T. 1975. A generic monograph of the Meliaceae. *Blumea* 22, 419–540.

PINHEIRO, J.; BATES, D.; DEBROY, S.; SARKAR, D. 2013. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects. *Effects Models*. R package.

R DEVELOPMENT Core Team, 2013. R: A language and environment for statistical computing.

RÉGNIÈRE, J.; NEALIS, V.; PORTER, K. 2009. Climate suitability and management of the gypsy moth invasion into Canada. *Biol. Invasions* 11, 135–148.

RÚÍZ, V.E.; MELONI, D. A.; FORNES, L.F.; ORDANO, M.; HILAL, M.; PRADO, F.E. 2013. Seedling growth and water relations of three *Cedrela* species sourced from five provenances: response to simulated rainfall reductions. *Agrofor. Syst.* 87, 1005–1021.

SOLDATI, M.C.; FORNES, L.; VAN ZONNEVELD, M.; THOMAS, E.; ZELENER, N. 2013. An assessment of the genetic diversity of *Cedrela balansae* C. DC. (Meliaceae) in Northwestern Argentina by means of combined use of SSR and AFLP molecular markers. *Biochem. Syst. Ecol.* 47, 45–55.

VALLEJOS, V.H.; SCHNAKE, V.P. 2008. Protección de los recursos forestales nativos. X Jornadas Investig. 6 y 7 Noviembre 2008 21p.

ZAPATER, M.A.; DEL CASTILLO, E.M.; PENNINGTON, T.D. 2004. El género *Cedrela* (Meliaceae) en la Argentina. *Darwiniana* 42, 347–356.