

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES



Tesina de Grado para optar por el título de Bióloga

Efectos de la fertilización en la supervivencia y crecimiento de la especie arbórea nativa *Polylepis australis* Bitt. (Rosaceae) en las Sierras Grandes de Córdoba, Argentina

Tesinista: Gabriela Silvana Chosco

Directora: Dra. Romina Cecilia Torres

Codirector: Dr. Daniel Renison

Centro de Ecología y Recursos Naturales Renovables “Dr. Ricardo Luti” (CERNAR)

2023

Tesina de Grado para optar por el título de Bióloga

Efectos de la fertilización en la supervivencia y crecimiento de la especie arbórea nativa *Polylepis australis* Bitt. (Rosaceae) en las Sierras Grandes de Córdoba, Argentina

Alumna: Gabriela Silvana Chosco

Directora: Dra. Romina Cecilia Torres

Codirector: Dr. Daniel Renison

Tribunal Examinador

Nombre y Apellido: Dr. Diego E. Gurvich

Firma:



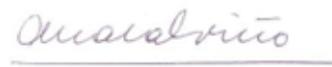
Nombre y Apellido: Dra. Paula Marcora

Firma:



Nombre y Apellido: Dra. Ana Calviño

Firma:



Calificación:

Fecha:

ÍNDICE

RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	5
Objetivo General	9
Objetivo Específico.....	9
Hipótesis y predicciones	9
MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
Área de estudio	10
Especie de estudio.....	12
Diseño experimental	12
Análisis de datos	13
RESULTADOS	14
Supervivencia.....	14
Altura	15
DISCUSIÓN.....	16
CONCLUSIONES.....	21
AGRADECIMIENTOS.....	22
BIBLIOGRAFÍA	23

RESUMEN

Los bosques de *Polylepis* de las Sierras Grandes de Córdoba presentan, en gran parte, suelos en proceso de erosión, debido a que históricamente han sido utilizados para la cría de ganado y con uso de fuego. En consecuencia, estas actividades han impactado fuertemente sobre los suelos de estos bosques, dejándolos desprotegidos y más susceptibles a los agentes erosivos, como el viento y el agua. Así, en las áreas montañosas donde la cobertura vegetal se ha perdido los procesos de erosión pueden llegar a ser muy severos, tendiendo a la formación de cárcavas, y dificultando el establecimiento de las especies leñosas y la recuperación de los bosques. En este trabajo se planteó evaluar el efecto de la aplicación de fertilizante NPK en el desempeño de plantines de *P. australis* plantados dentro y fuera de cárcavas en un área degradada en las Sierras Grandes de Córdoba. Se comparó la supervivencia y el crecimiento en altura de los plantines fertilizados y no fertilizados, plantados tanto dentro como fuera de cárcavas. Se plantaron 800 plantines de *P. australis* distribuidos equitativamente en sitios dentro y fuera de cárcavas, en enero del año 2007. A la mitad de los pozos de plantación de cada sitio se les aplicó 25 g. de fertilizante NPK (triple 15). De este modo se establecieron 4 tratamientos (2 tratamientos de fertilización x 2 sitios). Se registró la supervivencia y la altura de los plantines en el momento de la plantación, y se monitorearon a los 6, 19 y 43 meses posteriores a la plantación. La aplicación de fertilizante no tuvo efecto en la supervivencia de los plantines dentro de cárcavas, pero disminuyó la supervivencia de plantines fuera de cárcavas en un 18% (86 y 56%, respectivamente). La supervivencia final de los plantines fue 19,5% mayor dentro de cárcavas que fuera de las cárcavas (84,5 y 65%, respectivamente). La altura final fue en promedio 17,2 cm mayor para plantines fertilizados que para los no fertilizados (45,8 y 28,6 cm, respectivamente). A su vez, el crecimiento en altura fue en promedio 14,4 cm mayor para los plantines fuera que dentro de cárcavas (44,4 y 30 cm, respectivamente). En conclusión, a la dosis evaluada la fertilización es recomendable en sitios con suelos muy degradados donde aumenta el crecimiento sin afectar a la supervivencia.

Palabras clave: supervivencia, crecimiento, suelo, fertilización, *Polylepis australis*.

INTRODUCCIÓN

Los bosques de *Polylepis* son endémicos de las montañas de Sudamérica, se distribuyen en gran parte de los Andes centrales, desde la cordillera de Mérida (Venezuela) hasta las Sierras de los Comechingones, en el centro de la Argentina (Arnal et al., 2014). Estos bosques andinos llegan hasta altitudes entre 3500 a 4400 msnm y, están dominados por los árboles del género *Polylepis*, pero también albergan otras especies asociadas siendo algunas de ellas arbóreas, arbustivas y herbáceas (Kessler, 2006; Renison et al., 2013). Son ecosistemas únicos de suma importancia, debido a que representan hábitats naturales de una gran biodiversidad, un elevado número de endemismos tanto de plantas como de animales y porque protegen la parte superior de las cuencas hidrográficas de la mayoría de los ríos de la región (Cuyckens & Renison, 2018). Los bosques de *Polylepis* incrementan el aporte hídrico mediante la condensación de neblina en sus hojas como así también por la capacidad de filtración de agua en el suelo (Poca et al., 2018). Asimismo, regulan la escorrentía y reducen la erosión de los suelos reteniendo los sedimentos y los nutrientes (Fjeldså & Kessler, 2004; Renison et al., 2010; Cuyckens & Renison, 2018). Estos bosques y sus suelos, también son importantes porque contribuyen a mitigar el efecto invernadero, debido a que capturan una gran cantidad de carbono (Vázquez et al., 2014; Morales Aranibar, 2015).

Los bosques de *Polylepis* son uno de los ecosistemas de bosques montanos en mayor peligro de desaparecer (UNEP-WCMC, 2004; Kessler, 2006), siendo principalmente vulnerables a los disturbios, naturales o antrópicos, y al cambio climático. Se destacan entre las amenazas a estos bosques, la invasión por especies exóticas, la tala, la minería, las prácticas ganaderas, la expansión de la frontera agrícola y de las carreteras (Purcell & Brelford, 2004; Cuyckens & Renison, 2018). Dentro de las prácticas ganaderas se incluye la quema para estimular el rebrote de los pastos, el ramoneo directo y el pisoteo por el ganado doméstico (Cuyckens & Renison, 2018). Estas prácticas en conjunto promueven la apertura de los pajonales y así dan lugar a céspedes de pastoreo (Cingolani et al., 2003). A su vez, las condiciones de sobrepastoreo producen un aumento de la erosión del suelo, una reducción de la cobertura de la vegetación y un aumento de la superficie de roca expuesta (Cingolani et al., 2003, 2008, 2013; Renison et al., 2010, 2011). En consecuencia, estos bosques presentan un alto grado de fragmentación y pérdida de hábitat debido en gran medida a la influencia antrópica (Purcell & Brelford, 2004). Precisamente, la restricción de la gran mayoría de estos bosques a laderas rocosas y quebradas o en matorrales abiertos en laderas montañosas, se debe a que allí presentan mayor protección y son de difícil acceso para el

humano y el ganado (Kessler, 2006; Renison et al., 2006, 2015; Cingolani et al., 2008; Alinari et al., 2015).

Debido a los disturbios mencionados, los suelos de estos bosques quedan desprotegidos y más susceptibles a la acción de agentes erosivos como el viento y el agua, produciéndose erosión eólica y erosión hídrica, respectivamente (Paz González & Vidal Vázquez, 2004; Renison et al., 2010; Cingolani et al., 2013). En particular, en estos sistemas montañosos es de interés la erosión hídrica por escorrentía, ya que puede dar lugar a la formación de cárcavas. En este proceso, la escorrentía se produce cuando el suelo no es capaz de infiltrar toda el agua, por lo que se acumula y concentra en surcos y canales estrechos por períodos cortos de tiempo. Posteriormente, la escorrentía fluye y remueve el suelo o los sedimentos haciendo que circulen tanto en la superficie como en la profundidad. De este modo, el suelo colapsa, se derrumba, y puede ser arrastrado por la escorrentía junto a los sedimentos hacia el fondo o a otros sitios. Así, la erosión influye de manera directa sobre la vegetación causando la pérdida de las plantas y alterando el banco de semillas (García-Fayos, 2004; Paz González & Vidal Vázquez, 2004). Conjuntamente, también influye de manera indirecta, al alterar la estructura del suelo o eliminando las capas superficiales, que es en donde se establecen las plántulas y residen gran parte de la reserva de agua y nutrientes (García-Fayos, 2004). En consecuencia, en las cárcavas hay una pérdida significativa del perfil del suelo y este pierde la capacidad de retener humedad, lo que va a limitar la germinación de las semillas, la supervivencia de las plántulas y la posterior colonización vegetal (García-Fayos, 2004; Landi & Renison, 2010; Herrero, 2019).

En este contexto, varios estudios se han centrado en generar conocimientos con el fin de facilitar la restauración de los bosques de *Polylepis* mediante la reforestación para recuperar áreas con suelos degradados (Renison et al., 2002, 2005, 2013; Becerra et al., 2019). Así, en uno de ellos, Renison et al. (2002) han estudiado como técnica para mejorar el crecimiento y la supervivencia de los plantines de *P. australis* en suelos degradados y no degradados, la optimización de su protección mediante la adición de tubos plásticos y rocas. No obstante, en las áreas montañosas con pendientes pronunciadas, donde los procesos erosivos fueron muy severos y formaron cárcavas, es muy difícil que la reforestación con plantines de *Polylepis* por sí sola logre recuperar esas áreas. Por este motivo, en los suelos altamente degradados como los que presentan las cárcavas se podría mejorar la técnica de reforestación con el empleo de fertilizantes. Se conoce que la aplicación de fertilizantes modifica en forma directa la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Taiz & Zeiger, 2006), promoviendo el crecimiento de nuevas raíces (Mengel & Kirkby, 2000), en tanto que

también mejora la tolerancia a la herbivoría (Santos et al., 2021), la capacidad de supervivencia y el crecimiento inicial de las plantas en sitios con competencia (Cuesta et al., 2010). Por consiguiente, la adición de nutrientes al mejorar las características morfológicas y fisiológicas de los plantines, aumentaría la probabilidad de un desempeño favorable en el campo (Luis et al., 2009; Villar-Salvador et al., 2012, 2013). Asimismo, para que la aplicación de fertilizantes sea exitosa, se debe tener en cuenta que la misma dependerá no solo de las condiciones del sustrato, sino también de la fisiología de la especie, la cual definirá los tipos de nutrientes y la dosis requerida por la planta, ya que con su aplicación se logra acelerar o retrasar el crecimiento tanto de la parte foliar como radicular (Rose et al., 2004; Jacobs et al., 2005; Taiz & Zeiger, 2006).

Los nutrientes de las plantas se clasifican en dos grandes grupos, orgánicos e inorgánicos (Azcón-Bieto & Talón, 2013). El primer grupo representa el 90-95% del peso seco de las plantas, y lo constituyen los elementos que se obtienen principalmente a partir del agua y el dióxido de carbono (carbono, oxígeno e hidrógeno). El segundo grupo representa al 5-10% restante, conformando la fracción mineral y son los elementos que se obtienen del suelo. Aunque, tradicionalmente también se los clasificaron en macronutrientes y micronutrientes según la cantidad requerida por la planta, una clasificación más apropiada es de acuerdo a su papel biológico y su función fisiológica (Mengel & Kirkby, 2000; Taiz & Zeiger, 2006). Por consiguiente, dentro de los macronutrientes (elementos que se requieren en elevada cantidad) se destacan el nitrógeno, el fósforo y el potasio como elementos claves en la nutrición mineral (Azcón-Bieto & Talón, 2013). Así, en el caso del nitrógeno su importancia se debe a que es el elemento mineral que las plantas necesitan en mayor cantidad porque forma parte de los compuestos orgánicos, entre ellos las proteínas, los ácidos nucleicos y los aminoácidos. El fósforo es importante porque forma parte de la estructura de muchas moléculas y por los procesos en los que participa, como la fotosíntesis, la respiración y todo el metabolismo energético (componente del ATP). Por último, el potasio es igualmente importante que el nitrógeno y el fósforo, ya que es necesario por ser un activador de sistemas enzimáticos (cofactor de una gran cantidad de enzimas), por tener un papel clave en la osmorregulación, en los procesos de apertura y cierre estomáticos y porque es el catión principal en el establecimiento de la turgencia celular (Taiz & Zeiger, 2006; Azcón-Bieto & Talón, 2013). Dado que estos elementos son claves para el crecimiento vegetal y no siempre se encuentran en las concentraciones necesarias en los suelos (Mengel & Kirkby, 2000; Taiz & Zeiger, 2006), es común su adición mediante el empleo de fertilizantes en aquellos suelos que presentan cantidades deficientes de nutrientes (Taiz & Zeiger, 2006).

Si bien la mayor parte de la información disponible sobre la aplicación de fertilizantes es resultado de estudios realizados en especies cultivadas con fines agrícolas y en algunas especies forestales de interés económico (Rose et al., 2004; Martínez-Bravo, 2022), recientemente comenzó a ser una técnica empleada en estudios con fines de restauración de áreas degradadas (Herrero, 2019). Aun así, debido a que para la restauración de áreas degradadas no siempre se utilizan especies nativas, para estas especies son escasos los estudios que abordan sobre sus requerimientos nutricionales y su potencial en la restauración (Herrero, 2019). En consecuencia, para las especies sin antecedentes previos sobre sus requerimientos nutricionales y su desempeño en un determinado suelo, se puede comenzar a investigar sobre el tema realizando una fertilización empírica (Martínez-Bravo, 2022). Para estos casos, se pueden emplear los fertilizantes químicos más utilizados comercialmente, “fertilizantes mixtos o compuestos”, que aportan sales de los macronutrientes nitrógeno, fósforo y potasio (Taiz & Zeiger, 2006; Azcón-Bieto & Talón, 2013). Esta elección se debe a la importancia fisiológica de cada uno de estos elementos y, porque se los consideran junto con el agua como los principales factores limitantes del crecimiento y desarrollo de los cultivos (Barrera et al., 2010; Azcón-Bieto & Talón, 2013). Precisamente, ciertos estudios que emplearon los fertilizantes compuestos (fertilizantes NPK) en plantaciones de especies nativas en suelos degradados obtuvieron resultados positivos en cuanto al desempeño. Así, Santos et al. (2021) reportaron que en áreas degradadas (barrancos y áreas con deposición de suelos erosionados) donde la baja disponibilidad de nutrientes limita el crecimiento de la vegetación, cuando a las plantaciones de ciertas especies nativas se les añadió fertilizante NPK, estas respondieron positivamente en su desempeño. También, Singh & Singh (2006), obtuvieron resultados similares, cuando se añadió fertilizante NPK a la revegetación con especies nativas en sitios con suelos altamente degradados (anteriormente áreas mineras).

En el centro de Argentina, los bosques de las Sierras Grandes de Córdoba están dominados por la especie *Polylepis australis* (Renison et al., 2013). Históricamente, esta área fue utilizada para la principal actividad económica, la ganadería y como práctica asociada, el uso del fuego para promover el rebrote de los pastos. También, en el pasado esta área fue utilizada para la extracción de leña para la obtención de energía local (Cingolani et al., 2008, 2013; Renison et al., 2005, 2013; Poca et al., 2018). En consecuencia, y en parte, debido a la influencia antrópica, la mayoría de los suelos de esta área se encuentran en proceso de erosión. Así, en relación a las diferentes condiciones del suelo, un estudio señaló que las diferencias que existen entre las propiedades de los suelos conservados y degradados influyen en el desempeño de los plantines de *P. australis*. Los autores en dicho estudio

registraron que los plantines plantados en los suelos de bosques degradados obtienen tasas de crecimiento más lentas en comparación a los suelos de bosques conservados, debido a que son deficientes en nutrientes y humedad (Renison et al., 2005). A su vez, un estudio reciente evaluó si la aplicación de fertilizante NPK influye en la palatabilidad y el desempeño de los plantines de *P. australis* en sitios con vegetación alta (no palatable) y vegetación baja (palatable). Este último estudio, mostró que la fertilización no influye en la poda por hormigas, pero si afecta la supervivencia debido a que los plantines fertilizados en sitios con cobertura vegetal alta fueron los que obtuvieron la menor supervivencia (Renison et al., 2022). En este contexto, dado que es escasa la información sobre los requerimientos nutricionales de *P. australis* y teniendo en cuenta que muchas de las áreas donde se está plantando esta especie se encuentran degradadas, este estudio se propone una fertilización empírica en sitios dentro y fuera de cárcavas, con el fin de compensar la deficiencia de nutrientes y así mejorar su desempeño.

Objetivo General

- ✓ Contribuir a la recuperación de los bosques de altura mediante la optimización de técnicas de reforestación con la aplicación de fertilizante en áreas degradadas.

Objetivo Específico

- ✓ Comparar la supervivencia y el crecimiento en altura de plantines de *Polylepis australis* plantados a campo con y sin aplicación de fertilizante (NPK).
- ✓ Comparar el efecto de la aplicación de fertilizante (NPK) en la supervivencia y crecimiento en altura de plantines plantados en sitios con suelos degradados (dentro de cárcavas) y suelos poco degradados (fuera de cárcavas).

Hipótesis y predicciones

Hipótesis. La aplicación de fertilizante (NPK) en los pozos de plantación de *Polylepis australis* influye positivamente en el desempeño de los plantines, debido a que aumenta la disponibilidad de nutrientes necesarios para su crecimiento y desarrollo. Este efecto positivo es más evidente cuando la plantación se realiza en sitios con suelos degradados (dentro de cárcavas), donde se ha perdido el horizonte fértil y la cobertura vegetal. En cambio, cuando la plantación se realiza en sitios con suelos poco degradados (fuera de cárcavas) donde, si

bien ha habido uso antrópico, no se ha perdido el horizonte fértil y aún existe cobertura vegetal, el efecto positivo de la aplicación de fertilizante en el desempeño de los plantines es menor.

Predicción 1. Los plantines fertilizados tendrán en promedio mayor supervivencia y/o crecimiento en altura que los plantines no fertilizados.

Predicción 2. Los plantines situados en suelos degradados (dentro de cárcavas), tendrán menor supervivencia y/o crecimiento en altura con respecto a los plantines situados en suelos poco degradados (fuera de cárcavas).

Predicción 3. La diferencia entre la supervivencia y/o crecimiento en altura de los plantines con y sin fertilizante será mayor en suelos degradados (dentro de cárcavas) que en suelos poco degradados (fuera de las cárcavas).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El experimento se realizó en un área de 22 ha abocada a la restauración del bosque nativo y con exclusión del ganado desde el año 1997 ubicada en los Gigantes (coordenadas S 31° 25' 4.7", O 64° 48' 8"), en las Sierras Grandes de Córdoba (<https://www.ecosistemasarg.org.ar/proyectos>). La plantación se llevó a cabo en enero de 2007 en sitios con suelos degradados (dentro de cárcavas) y sitios con suelos poco degradados (fuera de las cárcavas) (Fig. 1), aplicándose el fertilizante según correspondió el tratamiento. En el caso de las cárcavas, los plantines se plantaron en el fondo de las mismas y en los bordes o laterales con poca pendiente.



Figura 1. Representación de parte del área de plantación. Se indica en sombreado color violeta el sitio dentro de cárcava que presenta suelo degradado, mientras que los sitios sin sombreado son los sitios fuera de cárcava que presentan suelo poco degradado.

Las Sierras Grandes de Córdoba (orientación norte-sur) presentan un clima de montaña con heladas frecuentes durante el invierno (estación seca marcada), variaciones térmicas diarias considerables y una estacionalidad importante en las precipitaciones (Renison et al., 2013). La temperatura media anual es 8,7°C y no se registran meses libres de heladas (Colladon, 2004). La precipitación media anual varía entre 750 y 970 mm, y las lluvias se concentran entre octubre y abril (Colladon, 2010). El paisaje consiste en un mosaico complejo y variable de vegetación, conformada por parches de bosques dominados por *P. australis*, pastizales, céspedes de pasto corto, afloramientos de granito y áreas erosionadas con superficies de roca expuesta (Cingolani et al., 2004, 2008).

Los suelos de los bosques de *P. australis* del área de estudio varían en sus propiedades (proporción de materia orgánica, salinidad, acidez, compactación) según el estado de degradación. Así, los suelos de bosques que están altamente degradados poseen una baja proporción de materia orgánica, carbono, nitrógeno, fósforo, nitratos y son más alcalinos que aquellos suelos con intermedia y baja degradación (Renison et al., 2010; Becerra et al., 2019). A la vez, los suelos degradados presentan una mayor salinidad que los suelos poco degradados. En cuanto a la rugosidad del terreno, se señala que los suelos más ásperos

poseen mayor cantidad de materia orgánica, menor compactación y son más ácidos que los suelos con menor rugosidad que poseen menor cantidad de materia orgánica, mayor compactación y son más alcalinos (Renison et al., 2010).

En relación a propiedades más específicas del perfil del suelo, el mismo se lo clasifica como Hapludol éntico-lítico con un desarrollo incipiente y es altamente susceptible a la erosión (Gorgas & Tassle, 2003; Cingolani et al., 2008; Panigatti, 2010). Posee dos horizontes desarrollados, un horizonte superficial A de color oscuro, con alto contenido de materia orgánica y textura franco-arenosa y un horizonte B_t de color rojizo, con menor contenido de materia orgánica, fuertemente ácido y una mayor acumulación de arcillas (Gorgas & Tassle, 2003, Landi & Renison, 2010). Precisamente, los suelos degradados fuera de cárcavas son más desarrollados ya que presentan ambos horizontes y en el caso de los suelos altamente degradados dentro de las cárcavas, debido a la pérdida de profundidad, están poco desarrollados y solo presentan el horizonte más profundo de color rojizo (horizonte B_t.) Asimismo, las cárcavas de erosión del área, se caracterizan por tener pendientes de 45° hasta los 90°, poseer escasa o nula vegetación y un fondo relativamente plano y pedregoso (Cingolani et al., 2003; Landi & Renison, 2010; Herrero, 2019).

Especie de estudio

Polylepis australis Bitter (“tabaquillo”), perteneciente a la familia Rosaceae, es la especie dominante de los bosques de montaña, con un rango de distribución altitudinal amplio entre 900 y 2700 msnm (Marcora et al., 2008). Es de hábito arbustivo o arbóreo (Enrico et al., 2004), de crecimiento lento y puede alcanzar hasta los 14 m de altura (Renison et al., 2005). Las plántulas de *P. australis* en presencia de ganado difícilmente crecen (Giorgis et al., 2010; Renison et al., 2011; Pollice et al., 2013), y bajo la exclusión ganadera crecen aproximadamente 8 cm por año (Simoes-Macayo & Renison, 2015).

Diseño experimental

Para evaluar el efecto de la aplicación de fertilizante en el desempeño de los plantines de *P. australis* se realizó un experimento de plantación a campo con un diseño a dos factores. Factor fertilizante, con dos niveles: (1) 25 gr. de fertilizante NPK (triple 15), y (2) control sin aplicación de fertilizante. Factor degradación, con dos niveles: (1) sitios con suelos degradados, que consistieron en cárcavas de erosión, y (2) sitios con suelos poco degradados,

que son sitios cercanos a las cárcavas, pero fuera de ellas. De esta manera quedan determinados 4 tratamientos, en cada uno de los cuáles se plantaron 200 plantines (2 tratamientos de fertilización x 2 sitios x 200 plantines = 800 plantines). Los plantines de tabaquillo fueron producidos en un vivero en la localidad de Cuesta Blanca con suelo del lugar y a partir de semillas colectadas en las Sierras Grandes de Córdoba a menos de 5 Km de la zona de plantación experimental. Al momento de la plantación, los plantines tenían 10 meses (con altura promedio de 5,96 cm) y fueron regados por única vez con 5 L de agua. Las plantaciones se realizaron en el mes de enero del año 2007 y la aplicación de fertilizante se realizó en el pozo de plantación, cubriendo el fertilizante con 10 cm de suelo antes de ubicar el plantín. De esta forma las raíces no quedaban en contacto directo con el fertilizante.

La altura de los plantines se registró en el momento de la plantación, midiendo de la base hasta su ápice/yema apical más distante, a los 6, 19 y 43 meses después de la plantación.

Cabe aclarar que la dosis de fertilizante empleada para los plantines de *P. australis* en este estudio, es próxima a la dosis empleada en otras plantaciones de especies forestales (Rose et al., 2004).

Análisis de datos

Para analizar el desempeño de los plantines en los distintos tratamientos al final del experimento, se emplearon modelos lineales generalizados, empleando como variable respuesta la supervivencia final (1 = vivo, 0 = muerto) con asunción de distribución binomial, y la altura final con asunción de distribución normal. En los análisis, se incluyeron como efectos fijos el factor fertilizante y el factor degradación, y la interacción fertilizante x degradación. También, en ambos análisis se incluyó como covariable la altura inicial de los plantines para observar si influyó tanto en la supervivencia como en la altura final.

Para analizar el desempeño de los plantines en los distintos tratamientos en el tiempo, se emplearon modelos lineales generalizados mixtos, empleando como variable respuesta los valores de supervivencia y altura correspondientes a los meses de monitoreo (0, 6, 19 y 43). Además de los efectos fijos de los factores fertilizante y degradación, se incluyó el tiempo y su interacción, y como factor aleatorio el plantin en los modelos. El plantin se incluyó como factor aleatorio para atender a la falta de independencia de las mediciones hechas en el tiempo sobre un mismo individuo (Agresti, 2018).

Se comprobaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Se consideró un nivel de significancia del 0.05. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa Infostat (Di Rienzo et al., 2017).

RESULTADOS

Supervivencia

Al finalizar el experimento, 43 meses después de la plantación, la supervivencia promedio de todos los tratamientos superó el 50%. En los sitios con suelos degradados, la supervivencia final de los plantines fertilizados y no fertilizados resultó similar (86% y 83%, respectivamente). En cambio, en los sitios con suelos poco degradados, la supervivencia final de los plantines fertilizados fue significativamente menor que en los no fertilizados (56% y 74%, respectivamente; interacción fertilizante x degradación, $p = 0,0041$, MLGM, $n = 800$; Fig. 2A). Se destaca también que la altura inicial de los plantines no influyó en la supervivencia final ($p = 0,5336$).

Cuando se analizó la supervivencia en el tiempo, se encontró que la mayor parte de la mortalidad responsable de las diferencias entre tratamientos en la supervivencia final ocurrió durante los 6 primeros meses después de la plantación (Fig. 2B). Luego del mes 6 (julio 2007) y hasta el mes 43 (agosto 2010), la supervivencia disminuyó poco y con un patrón similar entre tratamientos (interacción fertilización x degradación x tiempo, $p = 0,1641$, MLGM, $n = 3200$; Fig. 2B).

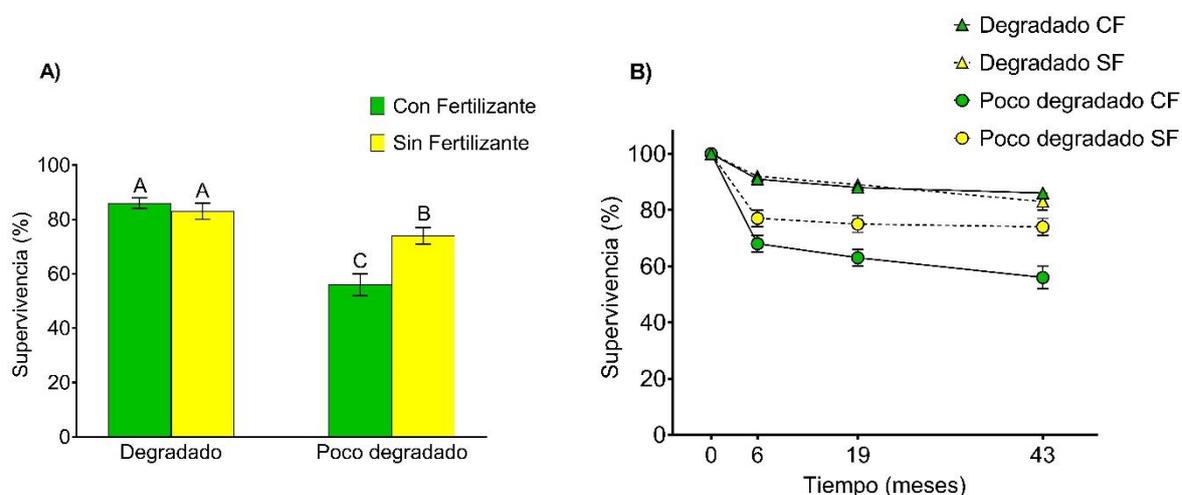


Figura 2. (A) Supervivencia (%) de *P. australis* a los 43 meses de plantados en sitios con suelos degradados (cárcavas) y poco degradados (fuera de cárcavas), con y sin aplicación de fertilizante NPK (triple 15). Las barras sobre las columnas indican el error estándar y las letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$). **(B)** Supervivencia (%) de los plantines a lo largo del tiempo (mes 0, enero 2007; mes 6, julio 2007; mes 19, agosto 2008; mes 43, agosto 2010) según el tratamiento. Líneas enteras y símbolos rellenos color verde representan plantines con fertilizante (CF). Líneas cortadas y símbolos rellenos color amarillo representan plantines sin fertilizante (SF). Las barras sobre los símbolos indican el error estándar.

Altura

El promedio de la altura de los plantines al finalizar el experimento fue 17,2 cm mayor para los plantines fertilizados que para los no fertilizados ($p < 0,0001$, MLG, $n=596$; Fig. 3A). Además, la altura fue en promedio 14,4 cm mayor para los plantines en sitios con suelos poco degradados que en sitios con suelos degradados ($p < 0,0001$, Fig. 3A). Se destaca también que la altura inicial de los plantines influyó positivamente en la altura final ($p = 0,0005$). No se encontró un efecto de la interacción entre la degradación del sitio y la fertilización sobre la altura de los plantines ($p = 0,0712$).

Cuando se analizó la altura de los plantines en el tiempo se encontraron variaciones entre los tratamientos y en relación al tiempo (interacción fertilización x degradación x tiempo, $p < 0,0001$, MLGM, $n= 2682$, Fig. 3B). A los 6 meses (julio 2007), la altura de los plantines sin fertilizante plantados en sitios con suelos degradados fue menor que en el resto de los tratamientos. A los 19 meses (agosto 2008), la altura de los plantines en ambos tratamientos con fertilizante fue mayor, intermedia en los plantines sin fertilizante en suelos poco degradados, y menor en los plantines sin fertilizante en suelos degradados. Al final del experimento (mes 43, agosto 2010), la altura de los plantines con fertilizante en suelos poco degradados fue mayor que en los plantines con fertilizante en sitios con suelos degradados, y que, en plantines sin fertilizante en suelos poco degradados, sin diferencias entre estos dos últimos tratamientos. A lo largo del tiempo, los plantines sin fertilizante plantados en sitios con suelos degradados tuvieron siempre una altura menor al resto de los tratamientos (Fig. 3B).

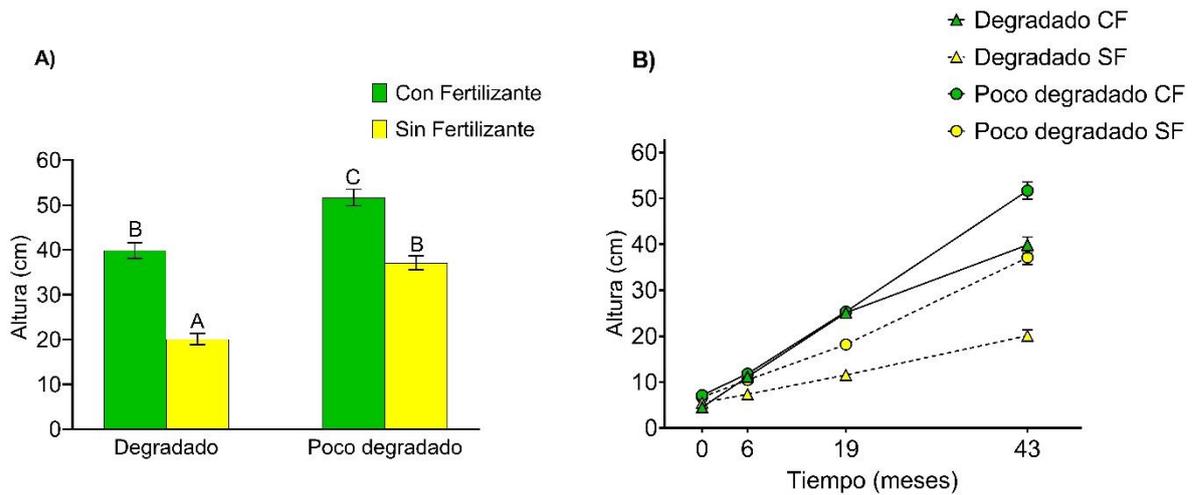


Figura 3. (A) La altura media (cm) final de plantines de *P. australis* a los 43 meses de plantados en sitios con suelos degradados (cárcavas) y suelos poco degradados (fuera de cárcavas), con aplicación y sin aplicación de fertilizante NPK (triple 15). Las barras sobre las columnas indican el error estándar y las letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$). **(B)** La altura media (cm) de los plantines a lo largo del tiempo (mes 0, enero 2007; mes 6, julio 2007; mes 19, agosto 2008; mes 43, agosto 2010) según el tratamiento. Líneas enteras y símbolos rellenos color verde representan plantines con fertilizante (CF). Líneas cortadas y símbolos rellenos color amarillo representan plantines sin fertilizante (SF). Las barras sobre los símbolos indican el error estándar.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que la dosis aplicada de fertilizante NPK (triple 15) tuvo efectos diferentes en el desempeño de los plantines de la especie nativa *P. australis* según la degradación del suelo en el sitio de plantación, aunque las diferencias encontradas no fueron como las habíamos predicho según la hipótesis planteada. La aplicación de fertilizante no afectó la supervivencia de los plantines situados en suelos degradados, pero sí afectó negativamente la supervivencia de los plantines situados en suelos poco degradados. En cambio, para el crecimiento, la fertilización afectó positivamente a los plantines tanto en suelos degradados como poco degradados.

Contrario a lo esperado, al finalizar el experimento, la aplicación de fertilizante no afectó la supervivencia de los plantines situados dentro de las cárcavas, lo cual indicaría que pueden sobrevivir en los suelos degradados de las mismas y, que aumentar la disponibilidad de nutrientes no aumenta su supervivencia. En cuanto a los plantines fertilizados situados fuera de las cárcavas, el fertilizante tuvo un efecto negativo en su supervivencia, puesto que

este tratamiento obtuvo el valor más bajo de todo el experimento. Esta disminución de la supervivencia de los plantines post fertilización puede deberse a múltiples causas, entre ellas, que el aumento de los nutrientes minerales en el suelo puede haber limitado la disponibilidad de agua, o bien que en los tejidos de los plantines se superó la concentración óptima de uno o más nutrientes promoviendo así un efecto tóxico (Taiz & Zeiger, 2006). No obstante, debido a la falta de información sobre los requerimientos nutricionales de *P. australis* y sobre las cantidades de los nutrientes presentes en los sitios de plantación, resulta difícil de determinar si el efecto tóxico se debe a los tres nutrientes añadidos o a uno en específico. Teniendo en cuenta esto, Pareliussen et al. (2006) reportaron resultados similares sobre los efectos de toxicidad por la aplicación de una única dosis de fertilizante NPK en plantines de especies nativas plantadas en pastizales contiguos a fragmentos de bosques. Estos autores registraron que la fertilización disminuyó la supervivencia de todas las especies cuando fueron plantadas en área de pastizal en la cima de la ladera (nula pendiente), y en cambio, cuando fueron plantadas en área sin pastizal sobre las laderas (con cierta pendiente) disminuyeron la supervivencia post fertilización solo algunas especies.

Otra posible causa de la disminución de la supervivencia post fertilización en las plantaciones situadas fuera de las cárcavas, es que en la vegetación preestablecida del sitio ya existe una competencia por los recursos. De este modo, la aplicación de fertilizante también aumentaría la competencia por los recursos, favoreciendo el desarrollo de la cobertura vegetal y no solo el desarrollo de las plantaciones en estudio. En esta situación la cobertura vegetal podría haber aprovechado mejor los nutrientes añadidos y de manera indirecta influir en la supervivencia de los plantines de *P. australis*. En este contexto, resultados similares sobre la competencia de recursos, fueron reportados por Moreno-Betancur & Cuartas-Hernández (2014), en un estudio de fertilización de especies nativas en un bosque montano degradado en Colombia. Los autores, señalaron que obtuvieron la menor supervivencia para los plantines en los sitios donde ya había cobertura vegetal conformada por pastos. Además, registraron que los pastos post fertilización crecieron más y seguidamente, demostraron estar altamente representados en el banco de semillas. En este punto, destacamos el antecedente previo de fertilización de *P. australis* en las Sierras Grandes de Córdoba (Renison et al., 2022), donde se registró que la especie gramínea *Poa stuckertii* que conforma parte de la cobertura vegetal, ejerce un efecto competitivo sobre los plantines de *P. australis* solo cuando estos últimos son fertilizados. Así, en otro estudio (Renison et al., 2005) sobre plantaciones de *P. australis* en suelos no degradados con cobertura vegetal abundante, se observó que la misma no influye en la supervivencia de los

plantines. Esto nos indica que la cobertura vegetal del sitio ofrece condiciones más favorables de humedad y temperatura para el establecimiento de la plantación mediante la facilitación (Gómez-Romero et al., 2013). De este modo, considerando nuestros resultados y ambos posibles escenarios, se podría inferir que en un principio hay facilitación por parte de la cobertura vegetal presente hacia la plantación experimental (tratamiento control), pero el añadir fertilizante da lugar a una competencia por los recursos (tratamiento fertilización).

Por otro lado, en el análisis de la supervivencia en el tiempo, se observa que las mayores caídas de supervivencia ocurren en los primeros meses post plantación, que corresponden al período de establecimiento de los plantines, durante el cual se están aclimatando a las nuevas condiciones ambientales. Igualmente, por su tamaño pequeño, los plantines son más vulnerables a las condiciones microclimáticas estresantes (viento, radiación fuerte y falta de humedad) y en sus primeras etapas pueden fácilmente desecarse (Renison et al., 2015). A su vez, en comparación a estudios locales destacamos que los valores que obtuvimos para la supervivencia final se encuentran un poco por debajo del que registraron Landi & Renison (2010), en plantaciones de *P. australis* sobre cárcavas con pendientes de hasta 45 grados. En dicho estudio, los plantines al cabo de tres años obtuvieron una supervivencia final del 92,5%, pero a diferencia de nuestro estudio, en su experimento las plantaciones de *P. australis* se realizaron en terrazas con y sin vegetación. También, en otro estudio sobre plantaciones de *P. australis* en suelo degradado y no degradado, registraron que a los cinco años del experimento la supervivencia promedio fue del 70% (Renison et al., 2005), siendo este valor mayor al de nuestro tratamiento de fertilización en suelos poco degradados. Precisamente, debido a la baja supervivencia obtenida en dicho tratamiento, indicaríamos que la dosis empleada no es la adecuada para utilizar en plantaciones de esta especie en sitios con suelos poco degradados. Por tal motivo, para las plantaciones en estos suelos se podría estudiar el empleo de menores dosis de fertilizante NPK o emplear otro fertilizante y así evaluar si efectivamente la adición de nutrientes resulta tóxica. Asimismo, se destaca que las diferencias de supervivencia entre este estudio y otros reportados previamente pueden deberse a las condiciones climáticas en los años de plantación y monitoreo.

De acuerdo a lo esperado, los plantines situados dentro de las cárcavas obtuvieron menor crecimiento en altura con respecto a los plantines situados fuera de las mismas, y tales diferencias pueden deberse principalmente a la ausencia y presencia de cobertura vegetal, respectivamente. En parte esto es acorde a Renison et al. (2005), quienes registraron que los plantines de *P. australis* crecen más rápido en los sitios con abundante cobertura vegetal en

comparación a los sitios sin cobertura vegetal. Esto corrobora nuestro supuesto sobre la relación positiva entre la presencia de cobertura vegetal y el crecimiento en altura de los plantines sucede en los suelos fuera de las cárcavas. De este modo, la fertilización no resulta necesaria para aumentar el crecimiento en altura de los plantines cuando se los planta en estos sitios y a su vez no se produciría una disminución de la supervivencia por un aumento de la competencia de recursos. Por el contrario, para los tratamientos dentro de las cárcavas, debido a la ausencia de cobertura vegetal no hay competencia por los recursos, y en efecto, los plantines cuando son fertilizados aprovechan mejor los nutrientes disponibles y crecen más en altura con respecto a los plantines no fertilizados. Es así que, debido a las diferencias encontradas entre los diferentes tratamientos por la presencia de cobertura vegetal, se podría considerar incluir esta variable en la toma de datos de futuros estudios de fertilización. Además, como se mencionó en el caso de la especie *Poa stuckertii* cuando los plantines de *P. australis* son fertilizados hay competencia por los recursos (Renison et al., 2022), pero también hay otro registro de que *Poa stuckertii* facilita el establecimiento de los plantines de la especie en estudio cuando se los planta sobre terrazas en suelo superficial dentro de cárcavas (Landí & Renison, 2010). Por lo que una misma especie según las condiciones del suelo puede estar compitiendo por los recursos o cumpliendo el rol de nodriza. Por este motivo, también se podría considerar determinar que especies conforman la cobertura vegetal, ya que posiblemente puede haber otras especies que compitan exclusivamente por los recursos con *P. australis*.

De los resultados obtenidos de la altura final, también se puede inferir que ambos tipos de suelos presentan deficiencia de nutrientes, ya que en ambas situaciones los plantines fertilizados aumentaron significativamente su crecimiento en comparación a los plantines no fertilizados. Esto podría corroborarse de manera indirecta comparando la proporción de nutrientes (N, P y K) presentes en ambos tipos de suelo, a partir de los valores obtenidos de la altura final en los tratamientos control (sin fertilizante NPK). De esta comparación se puede concluir que las diferencias encontradas posiblemente se deban a que los suelos de las cárcavas son más deficientes en nutrientes puesto que los plantines allí tienden a crecer menos y a su vez, que la deficiencia de nutrientes no se puede compensar añadiendo la misma cantidad de fertilizante NPK en ambos sitios. En parte, esto es acorde a otro estudio realizado en las Sierras Grandes, que señaló que los suelos de bosques degradados contienen baja cantidad de nutrientes en comparación a bosques conservados (Renison et al., 2010). Además, se observó que la deficiencia de nutrientes de los suelos dentro de las cárcavas es compensada por la dosis empleada de fertilizante ya que los plantines fertilizados plantados

allí obtienen una altura final similar a la de los plantines no fertilizados plantados fuera de las cárcavas. Debido a esta respuesta de los plantines por la aplicación de fertilizante, en los suelos de las cárcavas los nutrientes N, P y K se encontrarían en baja proporción y serían los limitantes del crecimiento en altura. En efecto, esto se puede observar en el análisis de la altura en el tiempo, ya que las tasas más lentas de crecimiento corresponden a los plantines sin fertilizar situados dentro de las cárcavas seguidos de los plantines sin fertilizar situados fuera de cárcavas y, que las mayores tasas de crecimiento corresponden a los plantines fertilizados en ambos tipos de suelo.

En cuanto a resultados similares de fertilización en otras especies forestales, Gómez-Romero et al. (2012), reportaron los efectos de la fertilización (con diferentes fuentes de N, P y K) de plantines de cuatro especies nativas del género *Pinus* que fueron plantados en un área con sitios degradados (incluyendo cárcavas), en su mayoría sin vegetación y con diferentes pendientes ($0-5^\circ$, $5-30^\circ$ y $>30^\circ$). En dicho estudio, una de las conclusiones de los autores fue que la pendiente influye en la supervivencia de los plantines, de modo que, a mayor pendiente mayor supervivencia. Si bien, en nuestro estudio no se midió la pendiente de los sitios de plantación, se considera que hay una diferencia entre los sitios fuera y dentro de cárcavas, ya que los primeros sitios presentan suelos nivelados y los segundos poseen suelos con mayor pendiente. Esta diferencia podría haber influido en la supervivencia de los plantines de *P. australis*, ya que los mismos fueron plantados dentro de las cárcavas en los fondos y en los bordes con poca pendiente. Asimismo, otras características no medidas de las cárcavas que podrían ser las que favorecen el desarrollo de los plantines, son la menor incidencia solar y suelos que presentan mayor roca expuesta. En relación a esta última característica, se ha señalado anteriormente que ofrecen protección contra la herbivoría a los plantines de *P. australis* (Renison et al., 2022). De este modo, si bien las cárcavas presentan suelos menos fértiles, los bordes de las mismas, podrían estar ofreciendo mayor protección contra los vientos y los herbívoros, lo que resulta favorable para su desempeño.

Finalmente, otro aspecto a destacar de este estudio es la duración del experimento, ya que permitió evidenciar efectos de corto y mediano plazo de la fertilización en el desempeño de los plantines. De esta manera, para la supervivencia se observa mayormente las respuestas al fertilizante en corto (6 y 19 meses) y mediano plazo (43 meses), mientras que para el crecimiento se observan a mediano plazo. Al mismo tiempo, cabe mencionar que para el estudio de los efectos de la aplicación de fertilizante en el desempeño de los plantines en su establecimiento a campo, se debería considerar no solo la disponibilidad de los nutrientes sino también otras características del suelo (pendiente, cobertura vegetal, salinidad del suelo,

el pH del suelo y disponibilidad de agua) y también, las características ambientales (temperatura, radiación solar y humedad) del sitio a las que se asocia la vegetación (Prince et al., 2001; Gómez-Ramiro et al., 2012). Esto es importante, debido a que la respuesta de la especie a la fertilización depende del sitio de plantación (Rose et al., 2004; Martínez-Bravo et al., 2022) y por ello, sus diferentes características y condiciones pueden afectar los efectos ya conocidos sobre la fertilización en otras especies forestales.

CONCLUSIONES

Este estudio aporta información sobre los efectos de la aplicación de fertilizante NPK en el desempeño de los plantines de la especie arbórea nativa *P. australis*. Los resultados aquí obtenidos indicarían que la dosis de fertilizante NPK empleada en plantines de dicha especie, no tiene efecto positivo en la supervivencia de las plantaciones situadas dentro de cárcavas y tuvo un efecto negativo en la supervivencia de las plantaciones situadas fuera de cárcavas. En tanto que, para el crecimiento en altura, tiene un efecto positivo tanto dentro como fuera de las cárcavas. Así, con lo desarrollado en este estudio exploratorio sobre el empleo de fertilizante NPK, se podría recomendar su aplicación en plantines de esta especie empleando la dosis estudiada (25 gr. de fertilizante NPK (triple 15)) sólo cuando se los plantan dentro de las cárcavas. De este modo, se podría reforestar y aumentar la protección de los suelos desnudos de las cárcavas y, en la medida de que sea posible de manera gradual disminuir la erosión por escorrentía.

Entre las recomendaciones para futuros estudios de fertilización de plantines de esta especie, se podría considerar evaluar de manera complementaria los efectos de la fertilización en los caracteres morfológicos de la parte aérea (hojas y tallo) y subterránea (raíces) de la planta. De este modo, se observaría más claramente los síntomas característicos por deficiencias de cada nutriente cuando se los plantan en suelos degradados. También se podrían añadir más variables al diseño experimental, las cuales pueden ser las características del suelo como la topografía, la pendiente (y su orientación), la compactación, la salinidad, el pH, la infiltración del agua y la cobertura vegetal. Esta última característica es de importancia debido a que, al añadirse nutrientes al suelo, estos estarán en mayor disponibilidad tanto para la plantación como para la cobertura vegetal presente. Además, de ser posible determinar las especies que conforman la cobertura vegetal, y realizar un mantenimiento del mismo como una medida preventiva, ya que como se observó, la

plantación experimental en ausencia de vegetación puede resultar mayormente favorecida por el fertilizante.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Córdoba, por la educación pública y gratuita.

A mis directores, Dra. Romina Torres y Dr. Daniel Renison, quienes me recibieron en un contexto pandémico, gracias por la paciencia infinita y por tener siempre la mejor predisposición para realizar este trabajo. Gracias a ellos, fue muy grato el aprendizaje que implica esta última instancia de la carrera. Muchas gracias Romi, por entender mis tiempos facultativos y no facultativos en toda esta etapa.

A mi familia, a mis padres, Rosa y Horacio, y mis hermanos, Anabel y Alejandro. Pero sobre todo gracias a mi mamá, que hoy ya no está presente, pero fue quien siempre apoyo cada una de mis decisiones, inclusive la de vivir lejos, para estudiar y crecer. Gracias mamá por haber sido mi mayor ejemplo y mi mejor compañía, fuiste mi fortaleza para hacer y terminar esta carrera.

A mi amiga y hermana de la vida, Galie, que esta desde siempre acompañándome, sin importar donde nos encontremos.

A todas las maravillosas personas que me dio la facultad, estos años no hubieran sido lo mismo sin ellas. En especial gracias a Anto, Mica, Ley, Flor, Irene, Yoa, Meli y Ana, amigas y hermanas de la vida, la vida facultativa cordobesa fue única e inolvidable porque nos encontramos aquí.

Por último, agradecer a quienes hicieron posible la parte de campo de este gran trabajo de restauración:

A la familia Nores que permitió hacer la restauración del bosque nativo en su propiedad incluyendo el presente experimento.

A Ronaldo H. Renison quien donó los plantines.

Al Club Andino Córdoba que proveyó alojamiento gratuito durante las plantaciones.

A Ecosistemas Argentinos vía un Rufford Small Grant que proporcionó los fondos para realizar las actividades de campo.

A Carla Coutsiere, Julio Dominguez, Julieta Pollice, Mario y Horacio Lopez, Ana Costa, Marcos Landi, Jerónimo Segura, Clelia Papeleo, Lucrecia Díaz, Fernando Aiello, Magali Pino, Cristian Tosco, Juan Nazer, Natalia Noda, Luis Pérez y mucha más gente voluntaria que ayudaron a transportar plantines y estacas, y en las plantaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- AGRESTI, A. 2018. An introduction to categorical data analysis. John Wiley & Sons.
- ALINARI, J., MULLER, A. V. & RENISON, D. 2015. The contribution of fire damage to restricting high mountain *Polylepis australis* forests to ravines: Insights from an un-replicated comparison. *Ecología Austral*, 25:11-18.
- ARNAL, H., SAMPSON, A., NAVARRO, G., PALOMINO, W., FERREIRA, W., ROMOLEROUX, K. CARO, D., TEICH, I., CUYCKENS, E., ANTENAZA, C., ARRAZOLA, S., AUCCA, C., BALDERRAMA, J., BECK, S., BURNEO, S., DE LA BARRA, N., FANDINSO FERRO, Y., GÓMEZ, I., GUZMÁN, G., IGLESIAS, J., IRAZABAL, J., LOZANO, P., MERCADO, M., MONSALVE, A., RENISON, D., SALGADO, S. & SAMOCHUALLPA, E. 2014. Mapa pan Andino de bosques de *Polylepis* prioritarios para conservación. The Plains, USA.
- AZCÓN-BIETO, J & TALÓN, M. 2013. *Fundamentos de fisiología vegetal*. 2da edición. Editorial McGraw-Hill – Interamericana.
- BARRERA, J., CRUZ, M. & MELGAREJO, L. M. 2010. Nutrición mineral. *Experimentos en fisiología y bioquímica vegetal*, 80-106.
- BECERRA, A. G., DIVÁN, A. & RENISON, D. 2019. Bare soil cover and arbuscular mycorrhizal community in the first montane Forest restoration in Central Argentina. *Restoration Ecology* Vo. 27, No. 4, pp. 804-812.
- CINGOLANI, A. M., CABIDO, M. R., RENISON, D. & SOLÍS NEFFA, V. 2003. Combined effects of environment and grazing on vegetation structure in Argentine granite grasslands. *Journal of Vegetation Science*, 14 (2):223-232.
- CINGOLANI, A. M., RENISON, D. & CABIDO, M. 2004. Mapping vegetation in a heterogeneous mountain rangeland using Landsat data: an alternative method to define and classify land-cover units. *Remote Sensing Environment*, 92:84-97.

- CINGOLANI, A. M., RENISON, D., TECCO, P. A., GURVICH, D. E. & CABIDO, M. 2008. Predicting cover types in a mountain range with long evolutionary grazing history: a GIS approach. *Journal of Biogeography*, 35 (3):538-551.
- CINGOLANI, A. M., VAIERETTI, M. V., GIORGIS, M. A., LA TORRE, N., WHITWORTH HULSE, J. I. & RENISON, D. 2013. Can livestock and fires convert the sub-tropical mountain rangelands of central Argentina into a rocky desert? *The Rangeland Journal*, 35 (3):285-297.
- COLLADON, L. 2004. Anuario de temperaturas medias 1994–2003. Cuenca del Río San Antonio. Sistema del Río Suquía - Provincia de Córdoba. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INAA) y Centro de Investigaciones de la Región Semiárida (CIRSA). Córdoba, Argentina.
- COLLADON, L. 2010. Anuario pluviométrico 1992-2010. Cuenca del Río San Antonio. Sistema del Río Suquía - Provincia de Córdoba. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INAA) y Centro de Investigaciones de la Región Semiárida (CIRSA). Córdoba, Argentina.
- CUESTA B., P., VILLAR-SALVADOR, J., PUÉRTOLAS, D. F., JACOBS & REY BENAYAS, J. M. 2010. Why do large, nitrogen rich seedlings better resist stressful transplanting conditions? A physiological analysis in two functionally contrasting Mediterranean forest species. *Forest Ecology and Management*, 260:71-78.
- CUYCKENS, G. A. E. & RENISON, D. 2018. Ecología y conservación de los bosques montanos de *Polylepis*: Una introducción al número especial. *Ecología Austral*, 28:157-162.
- DI RIENZO, J.A., CASANOVES, F., BALZARINI, M.G., GONZALEZ, L. A., TABLADA, M., & ROBLEDO, C.W., 2017. InfoStat. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- ECOSISTEMAS ARGENTINOS. 2023. Proyectos. URL <https://www.ecosistemasarg.org.ar/proyectos>
- ENRICO, L., FUNES, G. & CABIDO, M. 2004. Regeneration of *Polylepis australis* Bitt. in the mountains of central Argentina. *Elsevier Science. Forest Ecology and Management*, 190 (2-3), 301-309.
- FJELDSÅ, J., & KESSLER, M. 2004. Conservación de la biodiversidad de los bosques de *Polylepis* de las tierras altas de Bolivia. Una contribución al manejo sustentable de los Andes. FAN, San Cruz de la Sierra, Bolivia.

- GARCÍA-FAYOS, P. 2004. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Capítulo 11: Interacciones entre la vegetación y la erosión hídrica. Pág. 309-334.
- GIORGIS, M. A., CINGOLANI, A. M., TEICH I., RENISON, D. & HENSEN, I. 2010. Do *Polylepis australis* tree tolerate herbivory? Seasonal patterns of shoot growth and its consumption by livestock. *Plant Ecology*, 207:307–319.
- GÓMEZ-ROMERO, M., SOTO-CORREA, J. C., BLANCO-GARCÍA, J. A., SÁENZ-ROMERO, C., VILLEGAS, J. & LINDIG-CISNEROS, R. 2012. Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia*, 46 (8), 795-807.
- GÓMEZ-ROMERO, M., DE LA BARRERA, E., VILLEGAS, J. & LINDIG-CISNEROS, R. 2013. Fertilización y asociación con especies pioneras herbáceas en el crecimiento de *Pinus pseudostrobus*. *Phyton (Buenos Aires)*, 82 (1), 135-143.
- GORGAS, J. A. & TASSLE, J. L. 2003. Los suelos. Agencia Córdoba Ambiente, Córdoba, Argentina. 612 pp.
- HERRERO, M. L. 2019. Asistiendo a la sucesión ecológica en suelos montanos erosionados. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba.
- JACOBS, D.F., SALIFU, K. F. & SEIFERT, J. R. 2005. Growth and nutritional response of hardwood seedlings to controlled-release fertilization at outplanting. *Forest Ecology and Management*, 214:28-39.
- KESSLER, M. 2006. Bosques de *Polylepis*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. *Botánica Económica de los Andes Centrales*, 110-120.
- LANDI, M. A. & RENISON, D. 2010. Forestación con *Polylepis australis* en suelos erosionados de las Sierras Grandes de Córdoba: evaluación del uso de terrazas y vegetación nodriza. *Ecología austral*, 20:47-55.
- LUIS, V. C., PUÉRTOLAS, J., CLIMENT, J., PETERS, J., GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, Á. M., MORALES, D., & JIMÉNEZ, M. S. 2009. Nursery fertilization enhances survival and physiological status in Canary Island pine (*Pinus canariensis*) seedlings planted in a semiarid environment. *European Journal of Forest Research*, 128 (3), 221–229.
- MARCORA, P. I., HENSEN, I., RENISON, D., SELTMANN, P. & WESCHE, K. 2008. The performance of *Polylepis australis* tree along their entire altitudinal range: implications of climate change for their conservation. *Diversity and Distributions*, 14, 630–636.

- MARTÍNEZ-BRAVO, R. D., RICKER, M., NAVA-CRUZ, Y. & SIEBE, C. 2022. Mineral fertilization in tropical reforestation: seedling growth and survival of ten native tree species in Tabasco, Mexico. *Madera y Bosques*, vol. 28, No. 1, e28122669.
- MENGEL, K. & KIRKBY, E. A. 2000. *Principios de nutrición vegetal*.
- MORALES ARANIBAR, L. F. 2015. Estado actual del bosque de *Polylepis* y su eficiencia en la captura de CO₂ en la provincia Tarata, departamento de Tacna. *Revista Ciencia & Desarrollo*, 19:36-43.
- MORENO BETANCUR, D. J. & CUARTAS HERNÁNDEZ, S. E. 2014. Sobrevivencia y crecimiento de plántulas de tres especies arbóreas en áreas de bosque montano andino degradadas por ganadería en Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 2015; 20 (2): 85-100.
- PANIGATTI, L. 2010. Argentina: 200 años, 200 suelos. (No. P32 INTA 18474 y CD 67).
- PAZ GONZALÉZ, A. & VIDAL VAZQUÉZ, E. 2004. Erosión y escorrentía. *Universidad de La Coruña. Facultad de Ciencias. España*, 11.
- PARELIUSSEN, I., OLSSON, E. G. A. & ARMBRUSTER, W. S. 2006. Factors limiting the survival of native tree seedlings used in conservation efforts at the edges of forest fragments in upland Madagascar. *Restoration Ecology*, Vol. 14, No. 2, pp, 196-203.
- POCA, M., CINGOLANI, A. M., GURVICH, D. E., WHITWORTH-HULSE, J. I. & SAUR PALMIERI, V. 2018. La degradación de los bosques de altura del centro de Argentina reduce su capacidad de almacenamiento de agua. *Ecología Austral*, 28:235-248.
- POLLICE J., MARCORA P., RENISON D. 2013. Seed production in *Polylepis australis* (Rosaceae) as influenced by tree size, livestock and interannual climate variations in the mountains of central Argentina. *New Forest*, 44:233–247.
- PRINCE, T. D., ZIMMERMANN, N. E., VAN DER MEER, P., LEXER, M. J., LEADLEY, P., JORRISTSMA, I. T. M., SCHABER, J., CLARCK, D. F., LASCH, P., MCNULTY, S., JIANGUO, W. & SMITH, B. 2001. Regeneration in gap models: Priority issues for studying forest responses to climate change. *Climatic Change*, 3-4 (51): 475-508.
- PURCELL, J. & BRELSFORD, A. 2004. Reassessing the causes of decline of *Polylepis*, a tropical subalpine forest. *Ecotropica*, 10:155-158.
- RENISON, D., CINGOLANI, A. M. & SCHINNER, D. 2002. Optimizing restoration of *Polylepis australis* woodlands: when, where and how to transplant seedlings to the mountains? *Ecotropica*, 8: 219-224.

- RENISON, D., CINGOLANI, A. M., SUAREZ, R., MENOYO, E., COUSIERS, C., SOBRAL, A. & HENSEN, I. 2005. The restoration of degraded mountain Woodlands: effects of seed provenance and microsite characteristics on *Polylepis australis* seedling survival and growth in central Argentina. *Restoration Ecology*, 13 (1), 129-137.
- RENISON, D., HENSEN, I., SUÁREZ, R. & CINGOLANI, A. M. 2006. Cover and growth habit of *Polylepis* woodlands and shrublands in the mountains of central Argentina: human or environmental influence? *Journal of Biogeography*, 33:876-887.
- RENISON, D., HENSEN, I., SUAREZ, R., CINGOLANI, A. M., MARCORA, P. & GIORGIS, M. A. 2010. Soil conservation in *Polylepis* mountain forests of Central Argentina: Is livestock reducing our natural capital? *Austral Ecology*, 35, 435-443.
- RENISON, D., HENSEN I. & SUAREZ R. 2011. Landscape structural complexity of high-mountain *Polylepis australis* forests: A new aspect of restoration goals. *Restoration Ecology*, 19:390-398.
- RENISON, D., CUYCKENS, G. A. E., PACHECO, S., GUZMAN, G. F., GRAU, H. R., MARCORA, P., ROBLEDO, G., CINGOLANI, A. M., DOMINGUEZ, J., LANDI, M., BELLIS, L. & HENSEN, I. 2013. Distribución y estado de conservación de las poblaciones de árboles y arbustos del género *Polylepis* (Rosaceae) en las montañas de Argentina. *Ecología Austral*, 23:27-36.
- RENISON, D., CHARTIER, M. P., MENGHI, M., MARCORA, P. I., TORRES, R. C., GIORGIS, M., HENSEN, I. & CINGOLANI, A. M. 2015. Spatial variation in tree demography associated to domestic herbivores and topography: Insights from a seeding and planting experiment. *Forest Ecology and Management*, 335, 139-156.
- RENISON, D., JAACKS, G., POLLICE, J. & HERRERO, M. L. 2022. Forest restoration under leaf-cutting ant pressure: distance from ant nests and plastic tree shelters improve sapling survival. *Restoration Ecology*.
- RENISON, D., RODRIGUEZ, J. M., GARCÍA CANNATA, L., VON WEHRDEN, H. & HENSEN, I. 2022. Invertebrate herbivory rather than competition with tussocks will increasingly delay highland forest regeneration in degraded areas under active restoration. *Forest Ecology and Management*, 506, 119990.
- ROSE, R., HAASE, D. L. & ARELLANO, E. 2004. Fertilizantes de entrega controlada: potencial para mejorar la productividad de la reforestación. *Bosque (Valdivia)*, 25 (2):89-100.

- SANTOS, G. A. DOS., BURSLEM, D. F. R. P., MEIRA JR, M. S. & CARDOZO, S. P. 2021. Introduction of native tree species into degraded Cerrado vegetation. *Interação*, 21 (2), 61-84.
- SIMOES MACAYO, N., & RENISON, D. 2015. ¿Cuántos años monitorear el éxito de plantaciones con fines de restauración? Análisis en relación al micrositio y procedencia de las semillas. *Bosque*, 36:315–322.
- SINGH, A. N. & SINGH, J. S. 2006. Experiments on ecological restoration of coal mine spoil using native tree in a dry tropical environment, India: a synthesis. *New Forests*, 31:25-39.
- TAIZ, L. & ZEIGER, E. 2006. *Fisiología vegetal*. Vol 10. Universitat Jaume I.
- UNEP-WCMC. 2004. United Nations Environment Programme, World Conservation Monitoring Center. URL: www.unep-wcmc.org.
- VÁZQUEZ, E., LADD, B., & BORCHARD, N. 2014. Carbon storage in high-altitude *Polylepis* woodland in the Peruvian Andes. *Alpine Botany*, 124, 71-75.
- VILLAR-SALVADOR, P., PUÉRTOLAS, J., CUESTA, B., PEÑUELAS, J. L., USCOLA, M., HEREDIA-GUERRERO, N., & REY BENAYAS, J. M. 2012. Increase in size and nitrogen concentration enhances seedling survival in Mediterranean plantations. Insights from an ecophysiological conceptual model of plant survival. *New Forests*, 43 (5–6), 755–770.
- VILLAR-SALVADOR, P., PEÑUELAS, J. L., NICOLÁS-PERAGÓN, J. L., BENITO, L. F., & DOMÍNGUEZ-LERENA, S. 2013. Is nitrogen fertilization in the nursery a suitable tool for enhancing the performance of Mediterranean oak plantations? *New Forests*, 44 (5), 733–751.