

Restauración del bosque montano en suelos degradados: La fertilización temprana quintuplica el crecimiento post- plantación de *Polylepis australis*

PAOLA A. ROCABADO^{1,✉}, JAVIER SPARACINO^{1,2}, ROMINA C. TORRES^{1,2,3}, RAÚL E. DÍAZ¹
& DANIEL RENISON^{1,2,3}

¹Centro de Ecología y Recursos Naturales Renovables, "Dr. Ricardo Luti". Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba-CONICET. Córdoba, Argentina. ²ONG Ecosistemas argentinos. Córdoba, Argentina.

³Instituto de Investigaciones Biológicas y Tecnológicas. CONICET-Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.

RESUMEN. Los suelos montañosos afectados por la pérdida de bosque, el fuego y la ganadería son más propensos a la erosión y, en consecuencia, a una degradación más rápida que afecta su fertilidad. La degradación del suelo dificulta la restauración del bosque nativo y ocasiona bajas tasas de reclutamiento natural y crecimiento lento en las plantaciones. Para contribuir a una restauración más efectiva del bosque, pusimos a prueba la hipótesis de que en suelos montañosos degradados, la adición temprana de fertilizantes mejora la supervivencia y el crecimiento de los plantines en los primeros meses de la plantación. Nuestra especie modelo fue *Polylepis australis*, una arborea muy usada en proyectos de restauración en las montañas más altas del centro argentino. En un área en restauración con parches de suelos degradados, aplicamos siete tratamientos: tres dosis de NPK triple 15 (25, 34 y 67 g), tres dosis de urea (10, 20 y 30) y un tratamiento sin fertilizante (control). La supervivencia a los 14 meses de plantados fue del 80% y no estuvo asociada al tratamiento de fertilización. Independientemente de la dosis, los plantines fertilizados con NPK crecieron en promedio 5 veces más que los no fertilizados y más del doble que los fertilizados con urea. El crecimiento de los plantines sin fertilizante y los fertilizados con urea no difirió significativamente. Los resultados sugieren que, para *P. australis*, hay una deficiencia de nitrógeno (N), fósforo (P) o potasio (K) en los suelos degradados, que —al parecer— se pudo enmendar con cualquiera de las dosis de NPK y no así con la adición de urea (únicamente N). Concluimos que en suelos montañosos degradados, adicionar nutrientes en el momento de la plantación puede ser una estrategia efectiva para incrementar la cobertura arborea en menos tiempo y así reducir la erosión de suelos más rápidamente.

[Palabras clave: bosque nativo, fertilizante, degradación, NPK, urea, crecimiento, supervivencia]

ABSTRACT. Restoration of montane forest on degraded soils: Early fertilization quintuples post-plantation growth of *Polylepis australis*. Montane soils disturbed by forest loss, fire and livestock, are highly susceptible to erosion, leading to rapid degradation that reduces their fertility. Soil degradation hampers native forest restoration efforts, resulting in low natural recruitment rates and slow growth in field plantations. In order to contribute to more effective forest restoration strategies, we conducted a study to test the hypothesis that early addition of fertilizers in degraded montane soils improves the survival and growth of saplings during the initial months after planting. Our model species for this study was *Polylepis australis*, a tree commonly used in restoration projects in the highest mountains of central Argentina. In an area undergoing restoration with patches of degraded soils, we implemented seven treatments: three different doses of NPK (25, 34 and 67 g), three doses of urea (10, 20 and 30 g), and a control without fertilizer. After 14 months, the overall survival rate was 80%, and there was no significant correlation with the fertilization treatment. Regardless of the doses, saplings fertilized with NPK exhibited an average growth five times greater than unfertilized saplings, and more than twice that of urea-fertilized saplings. There were no significant differences in growth between unfertilized saplings and those fertilized with urea. These results suggest a deficiency of nitrogen (N), phosphorus (P), and/or potassium (K) in the degraded soils for *P. australis* saplings, which apparently could be amended with any of the tested NPK doses, but no with the addition of urea alone (nitrogen only). We conclude that early nutrients addition in degraded montane soils can be an effective strategy to increase tree cover and reduce soil erosion in a shorter timeframe.

[Keywords: native forest, fertilizer, degradation, NPK, urea, growth, survival]

INTRODUCCIÓN

En las montañas tropicales y subtropicales, los ecosistemas boscosos se encuentran muy fragmentados por actividades de origen antrópico como el pastoreo de ganado doméstico y el fuego inducido (Liu et al. 2021). Estas actividades han conducido a una degradación intensa de suelos, en especial hacia altitudes elevadas y en topografías como cumbres convexas y mesetas, donde la vegetación está más expuesta a las condiciones ambientales hostiles típicas de alta montaña como heladas, vientos intensos y niveles de radiación extrema (Zweifel et al. 2019). En estos lugares se evidencian modificaciones de las propiedades fisicoquímicas del suelo (e.g., cambios en el pH, pérdida de materia orgánica, transformación de la estructura de la vegetación), lo cual resulta en una reducción de la tasa de infiltración y la profundidad del suelo. La alteración del suelo y la vegetación, sumada a las condiciones climáticas extremas, ocasiona que los suelos sean más propensos a la erosión y, por lo tanto, se genere un ambiente que dificulta la regeneración natural del componente arbóreo (Pröll et al. 2015).

Los ecosistemas de montaña cumplen un papel estratégico en la regulación hídrica y climática, y poseen una elevada diversidad de endemismos; por ello, su recuperación es una prioridad a nivel regional y mundial (Loranger et al. 2017). Si bien existen diversos estudios sobre el desarrollo de la vegetación arbórea de montaña y su relación con diversos factores ambientales (Ettinger and Hillerislambers 2017), la alteración de la fertilidad de los suelos causada por la degradación del ecosistema y su relación con el componente arbóreo aún es un tema muy poco estudiado en el contexto de la restauración del bosque nativo.

Cuando los suelos no aportan los nutrientes que las plantas necesitan para crecer correctamente, la fertilización suele ser una alternativa para subsanar esta situación, siempre y cuando el déficit de nutrientes sea el principal factor limitante del crecimiento (Donoso et al. 2015). El uso de fertilizantes es muy común para favorecer la producción de madera, en especial en plantaciones de especies exóticas de crecimiento rápido y de gran interés económico como *Pinus* spp. y *Eucalyptus* spp. (Trazzi et al. 2019; Pereira et al. 2020). No obstante, en muy pocas ocasiones se reportó su uso en especies nativas de relevancia ecológica y/o productiva, entre las cuales podemos mencionar a *Nothofagus*

obliqua (roble pellín), *Nothofagus alpina* (raulí), *Nothofagus dombeyi* (coihue), *Austrocedrus chilensis* (ciprés de la cordillera) y *Eucryphia cordifolia* (ulmo) (Bustos et al. 2008; Donoso et al. 2015; Massone et al. 2018).

Se ha estudiado que la fertilización temprana —es decir, en el momento de la plantación— puede aumentar la supervivencia y la productividad a corto plazo (Fox et al. 2006), reducir la competencia por luz, agua y nutrientes, y mejorar las tasas de crecimiento (Nilsson and Örländer 2003). En estos casos se evidencia una etapa post-plantación menos crítica para el desarrollo de las plantas (Gómez 2012).

En regiones montañosas del centro argentino se intenta recuperar los suelos degradados a través de la restauración de los bosques de *Polylepis australis*. Sin embargo, experiencias previas en restauración reportaron tasas de crecimiento más lentas en sitios degradados (Renison et al. 2005), posiblemente debido a una deficiencia de nutrientes y de humedad a causa de la poca profundidad de la capa superficial del suelo o a su ausencia (Cingolani et al. 2003). En suelos muy degradados, la falta de micorrizas a menudo es un factor limitante para el crecimiento, dado que mejoran la absorción de nutrientes de la planta huésped y, por ende, su desarrollo (Smith and Read 2008). No obstante, en el caso de plantines de *P. australis*, inocular micorrizas nativas a campo no mejoró su crecimiento (Soteras et al. 2014). Quedaría pendiente investigar si la adición de nutrientes en sitios degradados favorece el crecimiento de *P. australis*. La relación entre la fertilidad química del suelo y el desarrollo de la vegetación arbórea fue respaldada por otras investigaciones que si bien no tuvieron como objetivo principal el estudio de la fertilidad, evidenciaron una relación positiva entre la cobertura boscosa y el contenido de materia orgánica y de macro- y micronutrientes en el suelo (Renison et al. 2010).

Con el fin de contribuir a las iniciativas de restauración del bosque nativo en el centro argentino, en suelos degradados evaluamos el efecto de la adición temprana de diferentes dosis de fertilizantes minerales (NPK triple 15 y urea) en el desempeño post-plantación de *Polylepis australis*. En este sentido, se puso a prueba la hipótesis de que en suelos montanos degradados, la adición temprana de fertilizantes mejora la supervivencia y el crecimiento de los plantines en los primeros meses de la plantación. Predecimos que la

supervivencia y crecimiento será mayor en alguno de los tratamientos de fertilización, en comparación con aquellos sin fertilizar. Por lo tanto, un crecimiento más rápido de la biomasa aérea protegería más temprano al suelo de los factores erosivos, lo que optimizaría el proceso de restauración del ecosistema.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en las montañas de Córdoba, Argentina central (orientación norte-sur; 31°34' S - 64°50' O), con una altitud máxima de 2884 m s. n. m. (aunque para la mayor parte del área, el rango altitudinal oscila entre 2000 y 2300 m s. n. m.) (Cabido et al. 1987). La temperatura media anual es 8.6 °C, con una media de 4.9 °C en el mes más frío (julio) y de 12.1 °C en el mes más cálido (enero), y durante todo el año ocurren temperaturas bajo cero (datos de 1994 a 2003 tomados a 2200 m s. n. m.) (Colladon 2004). La precipitación media anual es 835 mm, concentrada en los meses más cálidos (datos de 2005 a 2009 tomados a 2200 m s. n. m.) (Colladon 2010).

El paisaje es muy heterogéneo. La topografía consiste en lomas y planicies con valles suaves y profundos, suelos Molisoles con altos contenidos de materia orgánica derivados del lavado de la roca granítica, y depósitos eólicos de textura fina (Cabido et al. 1987). En topografías superiores como cumbres convexas y mesetas, los suelos tienden a ser poco profundos y bien drenados debido a una textura más gruesa, mientras que en los niveles medios pueden ser algo más profundos y con menor contenido de arena. En las laderas más bajas y en los pisos de valle, la profundidad del suelo puede alcanzar varios metros, la textura es más fina y el drenaje es más pobre (Cingolani et al. 2003). La pérdida de suelo se evidencia como bordes de erosión activos (sin vegetación) e inactivos (con vegetación) que tienen diferentes alturas según la profundidad del perfil del suelo y que al avanzar pueden dejar rocas expuestas o un suelo degradado y menos profundo (Cingolani et al. 2013).

La vegetación corresponde a un mosaico de bosques y pastizales alternados con superficies rocosas en forma de afloramientos naturales y rocas expuestas por la erosión reciente del suelo. La canopia de los bosques generalmente es dominada por *Polylepis australis* Bitter, y los

parches de bosque varían desde menos de 1 ha a 300 ha (Cingolani et al. 2004). *P. australis* es la especie más austral del género *Polylepis*, que en el centro argentino crece desde los 900 a los 2880 m s. n. m. (Renison et al. 2013). Puede presentar crecimiento arbóreo o arbustivo, de 3 a 14 m de altura, con una corteza formada por numerosas laminas finas de color rojizo (Renison et al. 2011). Para aumentar la superficie de bosques y reducir la erosión de suelos de la zona, se está intentando restaurar los bosques de *P. australis* en 14 áreas que en su conjunto suman ~1000 ha y donde se están plantando alrededor de 250000 plantines al año (EA 2022).

Diseño experimental

El experimento de fertilización a campo se realizó en la estancia Santo Tomás, en la Reserva Nacional Quebrada del Condorito (2200 m s. n. m.; 31°35' S - 64°45' O). El lugar comprende un área cercada de 75 ha con fines de restauración e investigación, sin actividades ganaderas desde 2019.

Para analizar el efecto de la fertilización en suelos degradados sobre el crecimiento y la supervivencia de los plantines de *P. australis*, se seleccionaron 19 sitios de plantación que consideramos degradados por presentar bordes de erosión (Figura 1a), suelo desnudo (i.e., superficie expuesta de suelo) y una cobertura vegetal menor a 50%. La mayoría de los sitios poseía un estrato herbáceo de gramíneas y dicotiledóneas menor a 15 cm de altura. Los sitios de plantación consistieron en cumbres ubicadas a 2200 m s. n. m., con pendientes moderadas orientadas mayormente hacia el norte y el noroeste, y suelos medianamente profundos (Tabla 1). Las distancias entre los sitios de plantación variaron entre los 18 m y 1300 m, aproximadamente. Se plantaron siete plantines en cada uno de los 19 sitios de plantación (uno por tratamiento), generando un total de 133 unidades experimentales (7×19=133). Los tratamientos de fertilización fueron asignados al azar en cada sitio (Figura 1b y 1c).

La plantación se realizó en diciembre de 2020 y el monitoreo culminó en febrero de 2022. Durante ese período (14 meses), la temperatura media fue 10.44±0.95 °C, la mínima mensual en la temporada seca (mayo a septiembre de 2021) fue 0.54±0.55 °C y la máxima mensual en la temporada húmeda (octubre 2021 a febrero de 2022) fue 16.98±0.51 °C. La precipitación en

Tabla 1. Características abióticas y bióticas de los sitios estudiados (* Precipitación durante el período pluviométrico: agosto 2020 y julio 2021).

Table 1. Abiotic and biotic characteristics of the degraded study sites (* Precipitation during the pluviometric period: from August 2020 to July 2021).

Factores abióticos	Valor promedio y error estándar
Temperatura media (°C)	10.44±0.95
Temperatura mínima (°C)	0.54±0.55
Temperatura máxima (°C)	16.98±0.51
Precipitación (mm)	766.67*
Altitud (m s. n. m.)	2224.22±0.62
Pendiente (°)	7.71±0.40
Exposición solar (°)	169±0.34
Profundidad del suelo (cm)	71.86±1.09
Nro. de sitio de plantación	Orientación
9, 10, 11, 13, 15	N
4, 18	O
2, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 16, 17	NO
19	SE
1, 3	SO
Factor biótico	Estimación general
Cobertura de la vegetación (%)	10-40

ese lapso fue 767 mm. Los datos climatológicos se obtuvieron de una estación meteorológica (lat -31.6142, long -64.7956; 2140 m s. n. m.) ubicada a 6 km del área de estudio (Tabla 1).

Al no contar con información suficiente con respecto a la fertilización a campo de especies forestales nativas de crecimiento lento como *P. australis* ni sobre sus requerimientos nutricionales, para el experimento se seleccionaron fertilizantes químicos de uso agrícola y en jardinería (NPK triple 15 y urea) por su fácil accesibilidad y por presentar una composición conocida de nutrientes, necesaria para determinar las dosis a evaluar. Puesto

que la composición de nutrientes de los fertilizantes orgánicos no es específica y su liberación puede resultar impredecible (muy lenta o rápida) (Jacobs and Landis 2009), se descartó su aplicación para los ensayos. El NPK triple 15 (desde ahora, NPK), compuesto por N, P₂O₅ y K₂O en una proporción 15:15:15, es uno de los fertilizantes más completos a nivel nutricional por aportar de manera simultánea los tres principales macronutrientes para las plantas: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Por otro lado, la urea (CO[NH₂]₂) es un fertilizante que aporta una concentración alta de N (46% de N en forma amínica), un elemento esencial para el crecimiento de las plantas (Fageria and Oliveira 2014).

Para determinar las dosis de NPK y urea, nos basamos en una serie de dosis máximas estimativas (N: 10 g; P: 5 g; K: 3 g) utilizadas para plantas arbóreas de rápido crecimiento en suelos pobres, pero estructuralmente buenos (Donoso et al. 2015). Considerando que *P. australis* es de crecimiento lento —más aun en suelos degradados (Renison et al. 2005)—, se decidió establecer las dosis de ambos fertilizantes en función de dicho comportamiento, a la condición degradada de la zona y a las dosis máximas estimativas mencionadas (Tabla 2).

Los plantines de *P. australis* para la plantación experimental poseían características típicas de aquellos utilizados en proyectos de restauración en la zona. Presentaban 8 meses de edad al momento de la plantación y una altura promedio de 2.21±0.22 cm, considerando la medición desde la parte basal del tallo hasta la yema apical más alta. Los plantines se produjeron en vivero a partir de semillas colectadas de zonas aledañas al área de estudio (menor a 1 km) y tuvieron un mes de rusticación antes de ser plantados.

Tabla 2. Tratamientos de fertilización; y contenido en gramos de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) según la dosis de fertilizante.

Table 2. Fertilization treatments; and content in grams of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) according to the fertilizer dose.

Fertilizante	Tratamiento	Dosis de fertilizante (g/plantín)	N	P (g/plantín)	K	Nº plantines/tratamiento
NPK 15	1	25	3.8	1.6	3.1	19
	2	34	5.0	2.2	4.2	19
	3	67	10.0	4.4	8.3	19
Urea	4	10	4.6	-	-	19
	5	20	9.0	-	-	19
	6	30	14.0	-	-	19
Control	7	-	-	-	-	19
Total						133

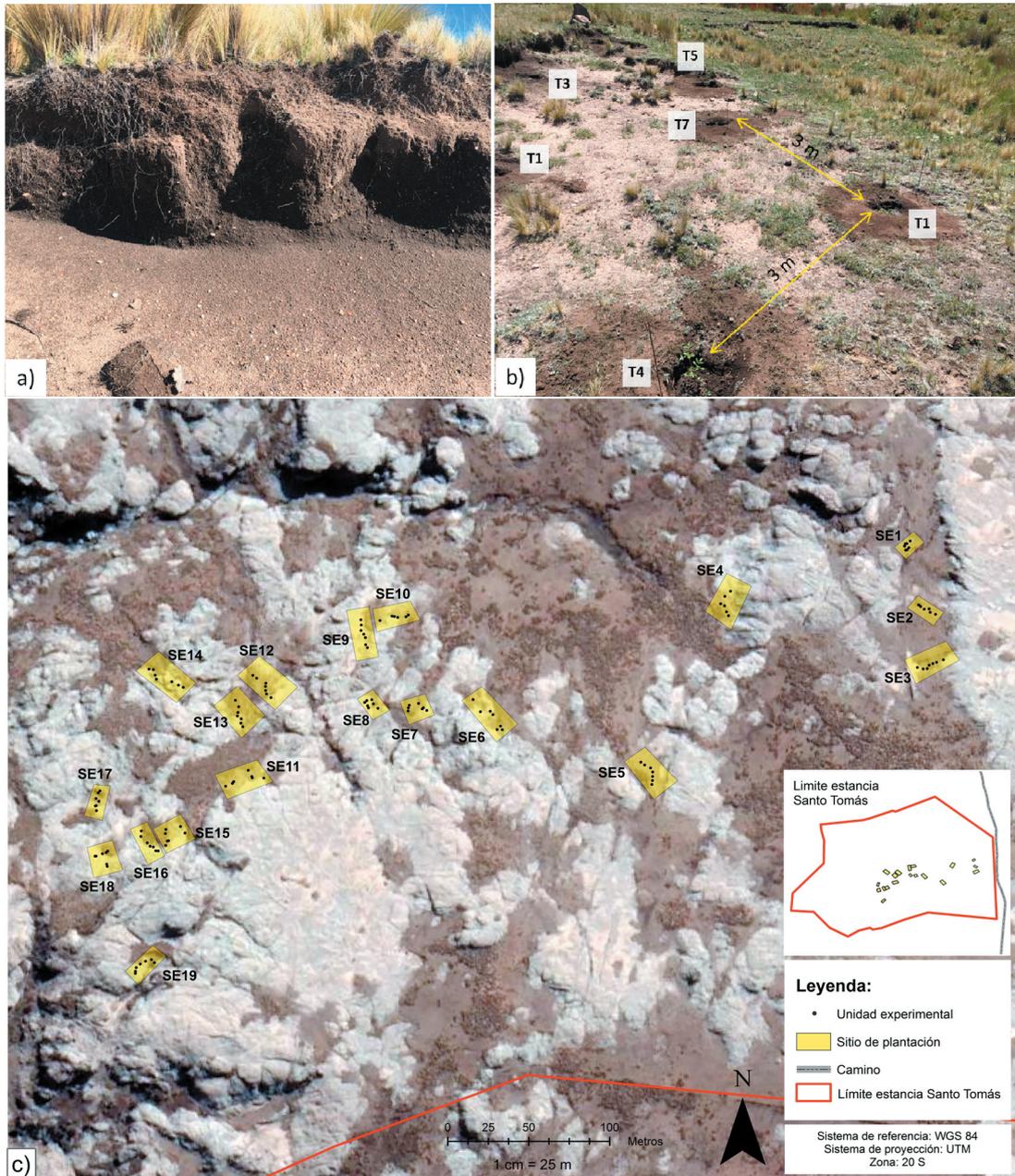


Figura 1. a) Erosión de suelos en el sitio de experimentación. b) Plantines con diferentes tratamientos de fertilización distribuidos en el sitio de experimentación. c) Distribución de los 19 sitios de plantación dentro del área de estudio.

Figure 1. a) Soil erosion at the experimental site. b) Saplings with different fertilization treatments distributed at the experimental site. c) Distribution of the 19 planting sites within the study area.

En cada sitio se realizaron 7 hoyos de plantación de 50 cm de profundidad y 20 cm de ancho. El fertilizante fue colocado en el fondo del hoyo (Figura 2a) y cubierto con tierra del mismo lugar antes de introducir el plantín para evitar el contacto directo con las raíces (Figura 2b). Para prevenir la expansión de fertilizante entre hoyos, se mantuvo una distancia aproximada de 3 m (Figura 1b).

Finalizada la plantación, cada individuo fue regado con 5 L de agua (Figura 2c).

Como parte del monitoreo se evaluó la altura del plantín por predecir bien el crecimiento (Wilson and Jacobs 2006). Esta fue medida el día de la plantación y a los 14 meses, teniendo en cuenta la base del plantín hasta la yema de crecimiento más alta (Figura 2d). No se



Figura 2. a) Hoyo de plantación con fertilizante granulado. b) Plantines a raíz desnuda. c) Individuo plantado y regado. d) Medición de la altura del plantín.

Figure 2. a) Planting hole with granulated fertilizer. b) Bare root saplings. c) Transplanted and watered sapling. d) Sapling height measurement.

midió el diámetro basal del fuste por ser muy pequeño y blando, lo que hace difícil medirlo con calibre.

Análisis de datos

Para analizar la supervivencia y el crecimiento se aplicaron modelos lineales generalizados mixtos (MLGM), incluyendo como factor aleatorio al sitio de plantación. Para un primer modelo, se consideró como variable de respuesta la supervivencia, con una distribución binomial (0=muertos; 1=vivos) y como variable predictora categórica, el tratamiento de fertilización (siete niveles correspondientes a las tres dosis de NPK, tres dosis de urea y un control sin fertilizante). En un segundo modelo se empleó como variable respuesta el crecimiento, asumiendo una distribución normal, considerando la altura de los plantines vivos alcanzada hasta el mes 14 menos la altura en el momento de la plantación, y como variable predictora categórica, el tratamiento de fertilización. Para las comparaciones múltiples se realizó una prueba de Duncan. En todas las pruebas estadísticas, el nivel de significancia fue 0.05 y reportamos los valores medios con su error estándar. Los análisis fueron realizados en el programa RStudio (versión 1.4.1717).

RESULTADOS

La supervivencia de los plantines a los 14 meses fue de 80% (106 de 133 plantines), sin diferencias significativas entre tratamientos de fertilización ($P=0.575$) (Tabla 3, Figura 3a). Sin embargo, hubo una ligera tendencia de mayor supervivencia en los plantines fertilizados con NPK en comparación con los fertilizados con urea y el control sin fertilizante (86, 75 y 74%, respectivamente). En cuanto al crecimiento, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de fertilización ($P<0.001$) (Tabla 3), debidas sobre todo a diferencias entre los tipos de fertilizantes, pero no así entre las distintas dosis de cada tipo de fertilizante (Figura 3b) (Material Suplementario-Tabla S1). Considerando el promedio del crecimiento de los plantines fertilizados con NPK, más allá de la dosis, estos crecieron cinco veces más que los plantines no fertilizados (17.13 y 2.69 cm, respectivamente) y un poco más del doble que los tratados con urea (6.93 cm). En relación con los plantines fertilizados con 10, 20 y 30 g de urea, a pesar de que no crecieron de manera significativamente diferente respecto de aquellos sin fertilizante (6.93 y 2.69 cm, respectivamente) (Figura 3b), se pudo apreciar una tendencia de mayor crecimiento en los tratamientos con urea en comparación a los

Tabla 3. Resultados de los modelos lineales generalizados mixtos (MLGM) para el crecimiento y la supervivencia de los plantines de *P. australis*.

Table 3. Results of the generalized linear mixed models (GLMM) for growth and survival of *P. australis* saplings.

Variable de respuesta	Variable predictora	Chi-cuadrado	Grados de libertad	P-valor
Crecimiento	Tratamiento de Fertilización	46.923	6	1.939 e-8
Supervivencia	Tratamiento de Fertilización	4.759	6	0.575

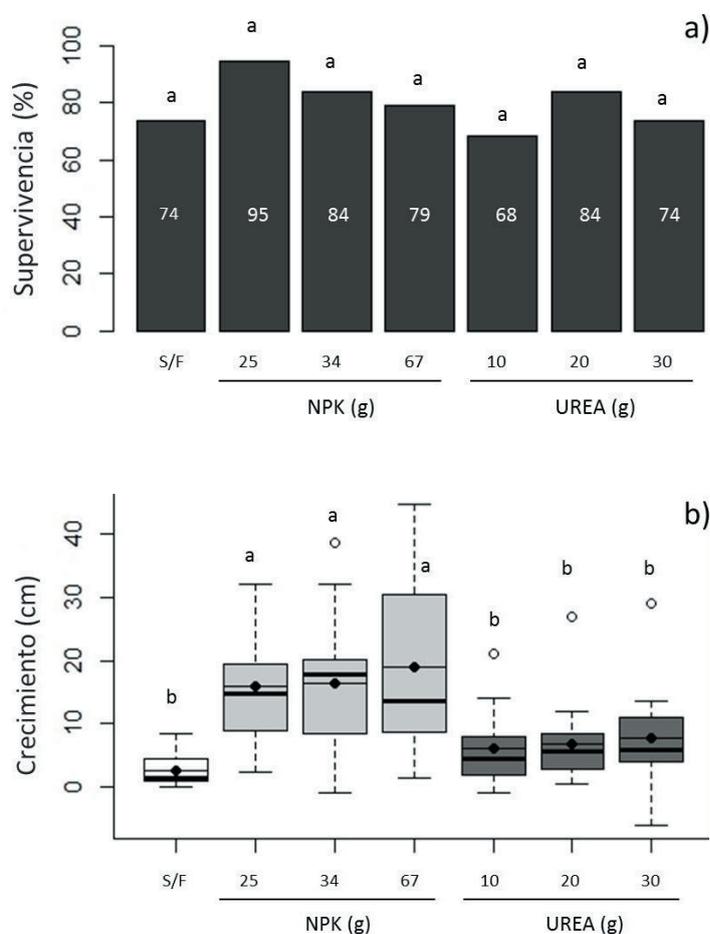


Figura 3. a) Porcentaje de plantines de *P. australis* vivos y b) crecimiento de los plantines 14 meses después de su plantación, en función de las tres dosis de NPK, tres dosis de urea y el control sin fertilizante. Letras distintas indican diferencias significativas ($P < 0.05$). El símbolo \bullet indica los valores medios del crecimiento final de los plantines. **Figure 3.** a) *P. australis* saplings survival percentage and b) saplings growth after 14 months of planting, in relation to three doses of NPK applied, three doses of urea applied and the control without fertilizer. Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$). Mean values for saplings final growth are indicated with the symbol \bullet .

no fertilizados, ya que estos crecieron casi el triple que los no fertilizados.

DISCUSIÓN

El presente trabajo apoya de forma parcial la hipótesis de que en suelos montanos degradados, la adición temprana (durante la plantación) de fertilizantes mejora la supervivencia y el crecimiento de los plantines en los primeros meses de la plantación. En este trabajo, la incorporación de NPK mejoró el crecimiento, pero no la supervivencia de *P. australis*.

Si bien la baja precipitación registrada en el año que se inició el experimento (643 mm) pudo haber afectado el establecimiento de los plantines de *P. australis*, el porcentaje de supervivencia logrado con o sin fertilizante al año de plantación fue alto (80%). Supervivencias muy similares fueron reportadas en la misma especie en suelos con y sin degradación (81%) (Renison et al. 2005); este comportamiento podría ser explicado por

las características morfológicas y fisiológicas típicas del género *Polylepis*, que le permiten sobrevivir ante condiciones extremas y, por lo cual, muchas de las especies de este género se pueden considerar pioneras (Rada et al. 2009).

La supervivencia similar entre los distintos tratamientos indicaría que no hubo toxicidad por alguno de los fertilizantes. Se sabe que una dosis excesiva podría causar un daño directo en la zona radicular, ya sea ocasionando un retraso en el crecimiento o la muerte de la planta (Jacobs and Landis 2009), como en plantines de *Nothofagus dombeyi* (especie forestal nativa de Chile), que presentaron menor supervivencia (73%) con una dosis de 150 g de NPK/planta que aquellos fertilizados con dosis menores y el control (97 y 81.6%, respectivamente) (Donoso et al. 2009).

Se observó que algunos plantines de *P. australis* de reducido tamaño (entre 1 y 2.5 cm de altura) no sobrevivieron al crecimiento abundante de la vegetación circundante,

posiblemente por efecto del fertilizante (Imo and Timmer 1999), que pudo haber generado una competencia fuerte (Tumushime et al. 2019). En el presente estudio, no se evaluó la competencia porque la mayoría de los sitios de plantación presentaban poca cobertura vegetal (<50%). En términos generales, podríamos decir que en sitios degradados con escasa vegetación, la adición temprana de fertilizante no afecta negativamente la supervivencia de los plantines de *P. australis* a través de un aumento de la competencia con la vegetación circundante, contrario a lo encontrado en sitios bien conservados, donde la adición de fertilizante disminuyó la supervivencia de plantines de *P. australis* (Renison et al. 2022). Otro efecto contraproducente conocido respecto al uso de fertilizantes, además de la generación de una fuerte competencia entre plantas adyacentes, sería un incremento de la palatabilidad de las plantas, haciéndolas más vulnerables a la herbivoría (Coq et al. 2018). Aunque no fue una variable analizada en nuestro estudio no se observaron indicios de herbivoría en las plantaciones.

El crecimiento de *P. australis* tuvo una respuesta muy baja en cuanto a la fertilización con urea, algo parecida al control. En coincidencia con Báez et al. (2015), quienes reportaron la misma tendencia del crecimiento en plantines de fresno (*Fraxinus uhdei*) en suelos severamente erosionados, con o sin fertilización nitrogenada (18.5 cm a las 20 semanas). Si bien la urea es un fertilizante muy usado por su alto contenido de N y por su capacidad para estimular el crecimiento, la fertilización nitrogenada suele ir acompañada por otros nutrientes como P, K y Mg debido a las particulares interacciones sinérgicas que existen entre ellos, lo que permite un buen crecimiento y desarrollo de las plantas. Una interrelación adecuada entre nutrientes permitirá su disponibilidad para las plantas, reflejando un estado saludable de la fertilidad química del suelo (Xie et al. 2021). El estudio realizado por Lupi et al. (2005) reportó un crecimiento significativamente mayor en plantines de *Pinus radiata* con una fertilización combinada de N y P₂O₅ (22.5 y 80 g/planta, respectivamente), y no así en los fertilizados únicamente con urea, cuyo comportamiento fue similar al testigo. Estos resultados apoyan nuestra investigación con relación al uso del fertilizante NPK, que logró una mejora en el crecimiento de plantines de *P. australis* en sitios degradados, en comparación con aquellos tratados con urea y los no fertilizados.

Al parecer, en los suelos del área de estudio, el N no fue el único nutriente deficiente, o al menos en su forma asimilable. Frente a la respuesta positiva de los plantines a las tres dosis de NPK se podría afirmar que también hubo una deficiencia de P y K. Cuando existen niveles óptimos de N asimilable y el contenido de K es bajo, la producción de nuevas raíces y el crecimiento inicial pueden verse afectados debido a que el K interviene de manera directa con la asimilación de nitratos (NO₃⁻), elementales para la formación de proteínas involucradas en el crecimiento y el desarrollo de los tejidos vegetales (Cakmak 2005). Asimismo, con una deficiencia de P, el efecto del K puede alterarse y, por lo tanto, la acción del N se interrumpe por el sinergismo entre ambos nutrientes, lo que deteriora el crecimiento y el desarrollo de la planta (Fageria and Oliveira 2014). Posiblemente, en *P. australis*, la deficiencia de P o K pudo causar el bajo crecimiento con la adición única de N en forma de urea y en los no fertilizados. Gotore et al. (2014) reportaron que la aplicación individual de N, P o K o la doble combinación (N-P, N-K, P-K) en plantaciones de *Eucalyptus grandis* no influyó en el crecimiento. Sin embargo, la adición en conjunto (N-P-K), tuvo una respuesta positiva.

Si bien se debe tener en cuenta el sinergismo y el antagonismo entre nutrientes al momento de fertilizar, la dosis a usar es crucial para lograr buenos resultados. Un exceso de N podría provocar un crecimiento exagerado y generar tallos menos lignificados y más partes blandas. Bustos et al. (2008) reportaron que plantines de *Nothofagus nervosa* fertilizados con 5 kg/m³ de osmocote (18N-6P-12K) presentaron una proporción 5:1 biomasa aérea:radicular, situación que los hizo muy vulnerables a las variaciones de la humedad y la temperatura, afectando su supervivencia. En nuestro estudio, el mayor crecimiento en los plantines dosificados con NPK no sería causado por exceso de N ya que fue similar entre distintas dosis. Además, durante los meses de monitoreo no se observó decrecimiento por ruptura de yemas, lo que indica un adecuado suministro de K, que brinda consistencia y dureza a los tejidos y un adecuado desarrollo del sistema radicular (Andrades and Martínez 2014). En el momento de la plantación, la relación aparente entre biomasa aérea y radicular de los plantines fue ~0.25 (5/20). Según Oliet (2000), una relación menor a 2.5 indica una mayor capacidad de enfrentar condiciones de baja pluviometría por

favorecer la absorción de agua. Sin embargo, este balance entre la superficie transpirante y absorbente de la planta, no solo dependerá de las condiciones del entorno, sino también de las características autoecológicas de la especie que le permitan adaptarse a situaciones adversas como una baja disponibilidad de agua y nutrientes (Fontana et al. 2018).

La respuesta positiva de los plantines al NPK indicaría una escasa disponibilidad de estos tres elementos en los suelos degradados. El hecho de que muchas veces los nutrientes no estén a disposición de las plantas se puede deber a la compactación del suelo; no obstante, en nuestro caso, se hizo una corrección de la estructura del suelo al cavar los hoyos de plantación, lo cual permitió de cierta manera una mayor disponibilidad de los nutrientes presentes (Badalíková 2010), más allá del tratamiento.

Factibilidad de la fertilización en la restauración ecológica

El problema del uso de fertilizantes radica en la aplicación de cantidades excesivas, que cuando no son consumidas por las plantas, se lixivian en forma de nitratos (NO₃) y nitritos (NO₂) hacia la napa freática o cursos de agua, ocasionando la contaminación de aguas subterráneas y superficiales (Bouwman et al. 2002). Las dosis aplicadas en este estudio fueron mucho menores que las que se utilizan en plantaciones productivas a gran escala (e.g., 100 g N y 50 g K/plantín de *Pinus radiata*), las que, además, involucran más de una fertilización al año, con un riesgo mayor de contaminación ambiental (i.e., agua, aire y suelo) (McMahon et al. 2006). Haciendo una relación con respecto a la cantidad de N que se aplica a un plantín de *P. australis* con 34 g de NPK (5 g N) y la utilizada para un plantín de *P. radiata* (100 g N), a este último se le aplicaría 20 veces más N que a *P. australis*. Entonces, con una baja concentración y una única dosis de NPK es probable que el plantín de *P. australis* logre consumir la mayor parte de los nutrientes durante los primeros 12 meses, lo que implicaría un menor riesgo de lixiviación. La decisión de utilizar fertilizantes y de qué tipo dependerá no solo del aumento en la producción de biomasa, sino también de factores ambientales y económicos que aseguren la sostenibilidad de las plantaciones forestales (León et al. 2016).

En el caso de *P. australis*, asumiendo 1 dólar americano (USD) como el costo de producir y plantar un individuo de 5 cm de altura (EA

2022; ecosistemasarg.org.ar/proyectos), si se incluyese el valor de 67 g NPK (0.07 USD), ello implicaría un costo por plantín fertilizado de 1.07 USD para obtener un individuo de 20 cm de altura en el primer año; en otras palabras, 0.05 USD por cm de altura producido por el plantín. Mientras tanto, para producir 1 cm de altura en un plantín sin fertilizar, el costo sería de 0.14 USD, considerando un crecimiento anual de 2.3 cm en un plantín con una altura inicial de 5 cm. En este sentido, si tenemos en cuenta la unidad de altura producida al año de plantado, la adición de fertilizante termina siendo 2.6 veces más económica que no adicionar fertilizante. Además, si esta diferencia en el crecimiento se mantiene en el tiempo, se esperaría que en los subsiguientes años, el costo de producción entre plantines fertilizados y no fertilizados difiera aun más, puesto que a mayor crecimiento, mayor reciclaje de nutrientes en el suelo por la materia orgánica que proviene del mismo individuo. Por lo tanto, el abastecimiento de nutrientes podría mejorar en el tiempo si las condiciones ambientales lo permitieran (Kozovits et al. 2007).

CONCLUSIONES

Conocer los requerimientos nutricionales de *P. australis* con respecto al N, P y K en suelos degradados da lugar a continuar investigando alternativas para mejorar la fertilidad del suelo más eficientes y ecológicas en la restauración de ecosistemas de montaña. La fertilización temprana con NPK mejora el crecimiento de los plantines de *P. australis* de 8 meses de edad al compensar la baja disponibilidad de estos nutrientes en suelos montanos degradados, permitiendo un crecimiento promedio de 14.1 cm en el primer año sin afectar negativamente su supervivencia.

Un mayor crecimiento de los plantines durante los primeros 14 meses implicaría mayor generación de biomasa aérea que podría garantizar una más alta reincorporación de nutrientes al suelo y, por lo tanto, una recuperación más pronta de los suelos montanos degradados. Incluso, si la diferencia entre el crecimiento de individuos fertilizados y no fertilizados se hiciera menor con los años, se esperaría que los que generaron mayor biomasa desde un inicio logren un reciclaje de nutrientes más rápido. Esto justificaría el gasto extra que implica fertilizar. Para tener mayor certeza sobre lo mencionado, se requieren estudios que impliquen evaluaciones por períodos más extensos.

AGRADECIMIENTOS. A numerosos voluntarios por ayudar en las plantaciones. A el Olvido SA y Parques Nacionales por los permisos para realizar el estudio. A Guido Raggio por alojarnos en campo y asegurar el predio para el experimento. A CONICET y Acción Serrana - Acción Andina por el financiamiento parcial de producción y plantación de plantines. A

Ronaldo H. Renison por la ayuda en la producción de los plantines y elaboración de las estacas demarcatorias. A Ana Cingolani por los datos climáticos (2020-2021) del área de estudio (años 2020-2021). A la "Organization for Women in Science for the Developing World (OWSD)" por la beca doctoral otorgada a PAR.

REFERENCIAS

- Andrades, M., and M. E. Martínez. 2014. Fertilidad del suelo y parámetros que la dividen. Tercera edición. Logroño: Universidad de La Rioja, Servicio de Publicaciones. La Rioja, Argentina.
- Báez, A. L., M. Gómez, J. Villegas, E. De La Barrera, L. Carreto, et al. 2015. Inoculación con hongos micorrícicos y fertilización con urea de plantas de *Fraxinus uhdei* en acrisoles provenientes de sitios degradados. *Botanical Sciences* 93(3):501-508. <https://doi.org/10.17129/botsci.207>.
- Badalíková, B. 2010. Influence of soil tillage on soil compaction. Pp. 19-30 en A. Dedousis and T. Bartzanas (eds.). *Soil Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03681-1_2.
- Bustos, F., M. E. Gonzales, P. Donoso, V. Gerding, C. Donoso, et al. 2008. Efectos de distintas dosis de fertilizante de liberación controlada (Osmocote®) en el desarrollo de plantas de coigüe, raulí y ulmo. *Bosque* 29(2):155-161. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002008000200008>.
- Bouwman, A., L. Boumans, and N. Batjes. 2002. Modelling global annual N₂O and NO emissions from fertilized fields. *Global Biogeochemical Cycles* 16:1-9. <https://doi.org/10.1029/2001GB001812>.
- Cabido, M. R., R. Breimer, and G. Vega. 1987. Plant communities and associated soil types in a high plateau of the Córdoba Mountains, central Argentina. *Mountain Research and Development* 7:25-42. <https://doi.org/10.2307/3673322>.
- Cakmak, I. 2005. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic in plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168:521-530. <https://doi.org/10.1002/jpln.200420485>.
- Cingolani, A. M., M. R. Cabido, D. Renison, and V. G. Solís. 2003. Combined effects of environment and grazing on vegetation structure in Argentine granite grasslands. *Journal of Vegetation Science* 14:223-232. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2003.tb02147.x>.
- Cingolani, A. M., D. Renison, M. R. Zak, and M. R. Cabido. 2004. Mapping vegetation in a heterogeneous mountain rangeland using Landsat data: an alternative method to define and classify land-cover units. *Remote Sensing of Environment* 92:84-97.
- Cingolani, A. M., M. V. Vaieretti, M. A. Giorgis, N. La Torre, and D. Renison. 2013. Can livestock and fires convert the sub-tropical mountain rangelands of central Argentina into a rocky desert? *The Rangeland Journal* 35:285-297. <https://doi.org/10.1071/RJ12095>.
- Coq, S., J. Nahmani, R. Resmond, J. Segrestin, D. Jean-François, et al. 2018. Intraspecific variation in litter palatability to macroarthropods in response to grazing and soil fertility. *Functional Ecology* 32:2615-2624. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13205>.
- Colladon, L. 2004. Estadísticas meteorológicas temperaturas medias mensuales 1994-2003. Cuenca del Río San Antonio. Sistema del Río Suquia - Provincia de Córdoba. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA) 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 Suquia - Provincia de Córdoba. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA) y Centro de Investigaciones de la Región Semiárida (CIRSA). Córdoba, Argentina.
- Donoso, P. J., D. P. Soto, J. E. Schlatter, and C. A. Büchner. 2009. Effects of early fertilization on the performance of planted *Nothofagus dombeyi* in coastal Range of south-central Chile. *Ciencia e Investigación Agraria* 36(3):459-469. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202009000300014>.
- Donoso, P., C. Navarro, D. Soto, V. Gerding, O. Thiers, et al. 2015. Manual de plantaciones de raulí (*Nothofagus alpina*) y coihue (*Nothofagus dombeyi*) en Chile. Universidad Austral de Chile - Universidad Católica de Temuco. Temuco, Chile.
- EA. 2022. Ecosistemas Argentinos, asociación civil. URL: ecosistemasarg.org.ar/proyectos.
- Ettinger, A., and J. Hillerislambers. 2017. Competition and facilitation may lead to asymmetric range shift dynamics with climate change. *Global Change Biology* 23:1-13. <https://doi.org/10.1111/gcb.13649>.
- Fageria, N. K., and J. P. Oliveira. 2014. Nitrogen, phosphorus and potassium interactions in upland rice. *Journal of Plant Nutrition* 37(10):1586-600. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.920362>.
- Fontana, M., V. Pérez, and C. Luna. 2018. Efecto del origen geográfico en la calidad morfológica de plantas de *Prosopis alba* (Fabaceae). *Biología Tropical* 66(2):593-604.
- Fox, T. R., H. L. Allen, T. J. Albaugh, R. Rubilar, and C. A. Carlson. 2006. Forest fertilization in southern pine plantations. *Better Crops* 90:12-15.
- Gómez, P. 2012. Comparación de fertilización exponencial y constante en plántulas de cinco especies forestales nativas

- de bosques andinos de Colombia. Tesis de maestría. Facultad de ciencias, Universidad nacional de Colombia sede Medellín. Pp. 80.
- Gotore, T., R. Murepa, and W. J. Gapare. 2014. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the early growth of *Pinus patula* and *Eucalyptus grandis*. *Journal of Tropical Forest Science* 26(1):22-31.
- Imo, M., and V. R. Timmer. 1999. Vector competition analysis of black spruce seedling responses to nutrient loading and vegetation control, *Canadian Journal of Forest Research* 29(4):474-486. <https://doi.org/10.1139/x99-020>.
- Jacobs, D. F., and T. D. Landis. 2009. Fertilization. Pp. 201-215 en R. Dumroese, T. Luna and T. Landis (eds.). *Nursery manual for native plants: A guide for tribal nurseries*. Forest Service, Washington, D.C., U.S.
- Kozovits, A. R., M. M. Bustamante, C. R. Garofalo, S. Bucci, A. C. Franco, et al. 2007. Nutrient resorption and patterns of litter production and decomposition in a Neotropical Savanna. *Functional Ecology* 21:1034-1043. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01325.x>.
- León, M. A., J. L. Reyes, G. Herrero, and V. E. Pérez. 2016. Efecto de la fertilización sobre el crecimiento en diámetro y altura de *Pinus caribaea* en plantaciones del occidente de Cuba. *Madera y Bosques* 22(3):87-101. <https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231115>.
- Liu, H., J. Fan, B. Liu, L. Wang, and Q. Qiao. 2021. Practical exploration of ecological restoration and management of the mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands system in the Irtysh River Basin in Altay, Xinjiang. *Journal of Resources and Ecology* 12(6):766-776. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2021.06.005>.
- Loranger, H., G. Zotz, and M. Y. Bader. 2017. Competitor or facilitator? The ambiguous role of alpine grassland for the early establishment of tree seedlings at treeline. *Oikos* 126:1625-1636. <https://doi.org/10.1111/oik.04377>.
- Lupi, A. M., P. Pathauer, S. Robbiani, P. Ferrere, G. Lólez, et al. 2005. Fertilización inicial en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don. en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Yvyraretá* 13:52-58.
- Massone, D. S., C. G. Bartoli, and M. J. Pastorino. 2018. Efecto de la fertilización con distintas concentraciones de nitrógeno y potasio en el crecimiento de plantines de ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*) en vivero. *Bosque* 39(3):375-384. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002018000300375>.
- McMahon, P., K. Dennehy, B. Bruce, J. Böhlke, R. Michel, et al. 2006. Storage and transit time of chemicals in thick unsaturated zones under rangeland and irrigated cropland, High Plains, United States. *Water Resources Research* 42:1-18. <https://doi.org/10.1029/2005WR004417>.
- Nilsson, U., and G. Örlander. 2003. Response of newly planted Norway spruce seedlings to fertilization, irrigation and herbicide treatments. *Annals of Forest Science* 60:637-643.
- Oliet, J. 2000. La calidad de la postura forestal en vivero. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes de Córdoba, España.
- Pereira, D., M. C. Navroski, M. De Oliveira, G. Borsoi, B. Nascimento, et al. 2020. Liming and fertilization on the growth of *Eucalyptus benthamii* and *Eucalyptus dunnii* in Brazil. *International Journal of Forestry Research* 1-8. <https://doi.org/10.1155/2020/8850641>.
- Pröll, G., A. Darabant, G. Gratzler, and K. Katzensteiner. 2015. Unfavourable microsites, competing vegetation and browsing restrict post-disturbance tree regeneration on extreme sites in the Northern Calcareous Alps. *Eur J Forest Res* 134:293-308. <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0851-1>.
- Rada, F., C. García, and S. Rangel. 2009. Low temperature resistance in saplings and ramets of *Polylepis sericea* in the Venezuelan Andes. *Acta Oecologica* 35:610-613. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2009.05.009>.
- Renison, D., A. M. Cingolani, R. Suárez, E. Menoyo, C. Coutsiere, et al. 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* 13:129-137. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2005.00015.x>.
- Renison, D., I. Hensen, R. R. Suárez, A. M. Cingolani, P. I. Marcora, et al. 2010. Soil conservation in *Polylepis* mountain forests of Central Argentina: Is livestock reducing our natural capital? *Austral Ecology* 35:435-443. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2009.02055.x>.
- Renison, D., I. Hensen, and R. Suárez. 2011. Landscape structural complexity of high-mountain *Polylepis australis* forests: A new aspect of restoration goals. *Restoration Ecology* 19(3):390-398. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2009.00555.x>.
- Renison, D., E. Cuyckens, S. Pacheco, G. F. Guzmán, H. R. Grau, et al. 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., G. Jaaks, J. Pollice, and M. L. Herrero. 2022. Forest restoration under leaf-cutting ant pressure: distance from ant nests and plastic tree shelters improve sapling survival. *Restoration Ecology* e13723. <https://doi.org/10.1111/rec.13723>.
- Soteras, M. F., D. Renison, and A. G. Becerra. 2014. Restoration of high altitude forests in an area affected by a wildfire: *Polylepis australis* Bitt. seedlings performance after soil inoculation. *Trees* 28:173-182. <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0940-7>.
- Trazzi, P. A., J. A. Santos, M. V. Caldeira, D. F. Roters, D. Carvalho, et al. 2019. Initial growth of *Pinus taeda* by fertilization response at planting. *Floresta e Ambiente* 26:1-9. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.037018>.
- Tumushime, I., J. G. Vogel, M. N. Minor, and E. J. Jokela. 2019. Effects of fertilization and competition control on tree growth and C, N, and P dynamics in a loblolly pine plantation in North Central Florida. *Soil Science Society of America Journal* 83:242. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.08.0289>.
- Wilson, B. C., and D. F. Jacobs. 2006. Quality assessment of temperate zone deciduous hardwood seedlings. *New*

Forests 31:417-433. <https://doi.org/10.1007/s11056-005-0878-8>.

Xie, K. I. Cakmak, S. Wang, F. Zhang, and S. Guo. 2021. Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. *The Crop Journal* 9:249-256. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.10.005>.

Zweifel, L., K. Meusburgerb, and C. Alewell. 2019. Spatio-temporal pattern of soil degradation in a Swiss Alpine grassland catchment. *Remote Sensing of Environment* 235:1-11. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111441>.