



APORTES A LA MITIGACIÓN Y ADAPTABILIDAD DE LAS FORESTACIONES EN LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS DE LA REGIÓN PAMPEANA

Javier GYENGE¹, María Elena FERNÁNDEZ¹

RESUMEN

El cambio climático impone el desarrollo de nuevas normas de manejo de los sistemas productivos que contemplen los servicios de mitigación (secuestro de gases de efecto invernadero) y su adaptabilidad (mantenimiento de su capacidad productiva ante la fluctuación del clima). Para la región pampeana se prevé un aumento de la fluctuación climática, con una mayor frecuencia y duración de olas de calor. Siendo la agricultura y ganadería las principales actividades productivas de esta región, la introducción de árboles permitiría aumentar el secuestro de Carbono y disminuir el efecto nocivo de olas de calor tanto sobre los cultivos como el ganado. Sin embargo, la información actual sobre la prestación de estos servicios es escasa y parcial, siendo necesario un mayor número de estudios que permitan establecer normas de manejo acordes con la prestación de estos servicios ambientales.

Palabras clave: *Cambio climático, sistemas climáticamente inteligentes, sistemas agroforestales.*

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático (CC) impone nuevos desafíos a los sistemas productivos por la fluctuación climática y/o por aumento de la presión social sobre la forma tradicional en que se llevan adelante que le exige nuevas responsabilidades y estrategias. En este marco, la **mitigación** es la acción que se genera para ocuparse del aumento de gases de efecto invernadero (GEI) responsable del CC mientras que la **adaptación** son todos aquellos cambios que se llevan adelante en las prácticas habituales de manejo realizadas con el objetivo de disminuir la vulnerabilidad del sistema a la fluctuación climática (Libert-Amico et al., 2024). Los principales GEI, dado su potencial de calentamiento global, son el dióxido de Carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). Dado el incremento en la concentración de GEI en la atmósfera, la comunidad política y la científica se centraron en generar mecanismos que disminuyan la emisión y que potencien la mitigación, destacándose los sistemas leñosos como herramientas positivas por su manifiesta capacidad de generar diversos servicios ecosistémicos. En este marco, Argentina se ha propuesto potenciar los mecanismos que tiendan a preservar y/o aumentar la superficie de bosques y plantaciones forestales (SAyDS, 2015). Por otro lado, la gestión forestal sostenible lleva implícito la incorporación del CC en su planificación y, por lo tanto, debe contener prácticas de manejo que faciliten la adaptación del sistema a los cambios en la disponibilidad de recursos claves. Las formaciones de árboles, tanto en bosques como los ubicados en sistemas agrícolas o urbanos, son un recurso natural que aporta a la adaptación y mitigación del CC (Libert-Amico et al., 2024). Por este motivo, el principal objetivo del manejo de sistemas forestales destinados a brindar servicios de mitigación también debería estar orientado a mantener la adaptabilidad de estos, de manera tal de sostener la prestación de servicios ecosistémicos.

En este trabajo nos centraremos en la ecorregión pampeana, conformada principalmente por los pastizales situados en la provincia de Buenos Aires, sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba, haciendo hincapié en los servicios ambientales que los sistemas forestales pueden brindar en la región. Estos pastizales naturales han sido reemplazados en mayor proporción por la agricultura en los sitios con menores condicionamientos (suelos profundos o zonas de mayor precipitación media anual) mientras que han sido sometidos a la ganadería, o se han introducido forestaciones, en los que presenten algún grado de limitación (Baeza et al., 2022). Estos autores mostraron que el área sometida a la agricultura

¹ IPADS Balcarce (INTA CONICET), Grupo Ecología Forestal Tandil. gyenge.javier@inta.gob.ar; fernandez.maria@inta.gob.ar



triplica a la de los pastizales, aunque los pastizales aumentaron en 0,3 Mha desde el 2001 al 2018. Las cuencas forestales del centro del país (provincias de Santa Fe, Córdoba y Buenos Aires) totalizan actualmente 82.994 ha (79.747 y 3.247 ha como macizos y cortinas, respectivamente), donde en el 48 % de la superficie se cultivan distintas especies de *Eucalyptus* y el 25 % con especies de *Pinus*². Sin embargo, es posible aumentar esta superficie forestal teniendo en cuenta los sitios con suelos ganaderos y agrícolas-ganaderos, integrándose a los sistemas productivos tradicionales como se indica en el informe del Consejo Federal de Inversiones (2018). Tal como menciona dicho informe, no se incluyó en dicho cálculo las superficies de tierra con aptitud agrícola de alta productividad (índices >70).

Los modelos climáticos estiman un aumento en la frecuencia de olas de calor y de la aparición de precipitaciones intensas y/o aumento en la distribución temporal de las mismas en algunas regiones, como la pampeana (SAyDS, 2015). En esta región, existe un gradiente suave de descenso de la temperatura promedio en el sentido NE al SO, y de manera similar, la precipitación media anual (PMA) actual también sigue un gradiente con promedios de 1000 mm año⁻¹ al NE y menos de 800 mm año⁻¹ al SO (Barros et al., 2013). A la vez, las precipitaciones se distribuyen de manera más homogénea en el año al NE ocurriendo con mayor frecuencia en la parte cálida del año en el SO de la provincia de Buenos Aires (Barros et al., 2013). Los modelos también indican una alta probabilidad de que la isoterma de 26 °C (durante el mes más cálido) se desplace hacia el este en su límite superior y hacia el SO en su porción media e inferior de la región (Rolla et al., 2019). Esto significa que la isoterma podría desplazarse en el futuro, desde el centro de las provincias de Santa Fe y Entre Ríos hasta el sur de dichas provincias o incluso hasta el centro de la provincia de Buenos Aires, dependiendo el escenario climático y la proyección temporal. Esto es importante ya que indicaría un aumento del estrés calórico para el ganado vacuno de origen europeo, restringiendo el territorio actual de su distribución. De esta manera, el escenario climático previsto a futuro indicaría la aparición de eventos cortos pero fuertes, momento en el cual se debería contar con normas y herramientas que permitan adaptar los sistemas a estas fuentes de estrés que aparecerían de manera más o menos recurrente.

Finalmente, la expansión agropecuaria en el ecosistema pampeano generó cambios ambientales de distinta índole. Más allá de las pérdidas de biodiversidad propia de los pastizales naturales, diversos autores ponen de manifiesto la disminución de nutrientes y de Carbono orgánico del suelo (COS), que alcanzarían hasta un 36 % de pérdida según el área (Wyngaard et al., 2022). Estos autores mencionan que las mayores pérdidas se observaron en los sitios más ricos en COS y sometidos a una mayor frecuencia de ciclos de cultivo de soja. En cuanto a los pastizales naturales sometidos a pastoreo, no se detectaron diferencias significativas de COS transcurridos 12 años de uso (del año 2007 al 2019; Álvarez et al., 2021). Por el contrario, la introducción de especies forestales generó un aumento significativo del COS, siendo superior a los encontrados en pastizales (Berhongaray et al., 2013). Así, los árboles en estos sistemas tradicionales podrían servir para incrementar su capacidad de mitigación.

En este marco, el objetivo del trabajo es el de discutir la capacidad de las plantaciones forestales introducidas en el pastizal de la ecorregión pampeana de brindar servicios ecosistémicos ligados con la mitigación y el aumento de la adaptabilidad al cambio climático de los sistemas productivos agropecuarios tradicionales de la región.

1.1. Árboles y forestaciones y la capacidad de mitigar GEI

1.1.1 Biomasa: Los sistemas forestales almacenan gran cantidad de C en biomasa. Por ejemplo, plantaciones de 21 años de *P. radiata* alcanzaron 227 Mg ha⁻¹ de biomasa total, contabilizándose en el fuste unos 148 Mg ha⁻¹ (Ferrere y Lupi, 2023). Esto representa una tasa de fijación anual de CO₂equivalente de 20 y 13 Mg CO₂eq año⁻¹ ha⁻¹, comparable con las estimaciones realizadas para esta especie a partir de las estadísticas promedio para la provincia de Buenos Aires (de 17,6 a 26,4 Mg CO₂eq año⁻¹ ha⁻¹; Gyenge et al., 2022 b). A partir de ecuaciones de biomasa de Ferrere et al. (2014), se estimó que es posible cosechar un total de entre 440 a 625 Mg ha⁻¹ (entre 27 y 38 Mg CO₂eq año⁻¹ ha⁻¹ en turnos de 30 años) en las sucesivas intervenciones (raleos) a lo largo de un ciclo de plantación de *E. viminalis* (Gyenge et al., 2019). Estos valores son similares a la biomasa en pie estimada para

² <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/desarrollo-foresto-industrial/inventarios/tablero.php>



rodiales de la misma especie de 10 y 14 años (Ferrere et al., 2008). Usando estas estadísticas es posible estimar tasas de acumulación en fuste de entre 26 y 50 Mg CO₂eq año⁻¹ ha⁻¹ para distintas especies de *Eucalyptus* spp. y de entre 13 y 18,4 Mg CO₂eq año⁻¹ ha⁻¹ para *Populus* (Gyenge et al., 2022 b). Estas tasas pueden sobreestimar la capacidad de acumulación de C visto que son mayores a las estimadas para bosques y forestaciones situadas en otras regiones del país. Por este motivo, es necesario incrementar las investigaciones en la región para estimar tasas de crecimiento de las forestaciones según las condiciones de sitio.

1.1.2 Carbono orgánico del suelo: El COS fue mayor en suelos forestales que en otros usos en todas las profundidades de suelo considerada (Berhongaray et al., 2013), estimándose valores promedios para los primeros 30 cm de suelo de 198, 345 y 128 Mg CO₂eq ha⁻¹ para plantaciones de *Eucalyptus*, *Pinus* y *Populus*, respectivamente (Gyenge et al., 2022a). En el caso de las especies de *Eucalyptus*, si bien el COS aumenta con la edad de las forestaciones, el impacto negativo sobre el mismo en la etapa de plantación es mayor en zonas más húmedas que secas (Berthrong et al., 2012). En las zonas más húmedas, generalmente con suelos más ricos en COS, la productividad forestal es mayor permitiendo una tasa anual de acumulación más alta que en los sitios más secos, lo que permitiría una recuperación e incluso aumento del COS original (al menos en la cantidad sin considerar la distribución de tamaños de partículas de COS). Sin embargo, más allá de esto, es importante resaltar que estos trabajos hacen hincapié sobre la necesidad de generar forestaciones de al menos 40 años en los sitios con más de 1500 mm de PMA para poder reestablecer valores positivos de COS en relación con la línea de base (Berthrong et al., 2012). Esto, además de exceder los turnos de corta esperados, podría acarrear otros problemas relacionados con la redistribución de sales en el suelo (Milione et al., 2020). En el caso de las plantaciones con *Pinus* spp., distintos estudios ponen en evidencia que su introducción en pastizales puede incrementar el COS (Gyenge et al., 2022a). En el caso de las dunas, se detalla además un mayor efecto en la zona media que en la cresta o en su base, lo que habla del efecto de variables ambientales sobre la magnitud que puede alcanzar este servicio ecosistémico (Amiotti et al., 2014). Con respecto a las plantaciones de *Pinus* en las sierras de Tandil, Ferrere y Lupi (2023) encontraron que el 63 % del C de la forestación estaba en los suelos, observando una disminución del COS con la edad de las forestaciones, sobre todo en el perfil de suelo por debajo de los 25 cm. En estos casos, el desarrollo de forestaciones ralas, como las necesarias para llevar adelante sistemas silvopastoriles, generarían condiciones ambientales que favorecen la descomposición de la materia orgánica, como fue observado en España (Ferreiro-Domínguez et al., 2022). Así, la introducción de árboles en pastizales muestra aspectos interesantes para ser usados como herramientas de mitigación por su capacidad de fijar C atmosférico, quedando abierta la posibilidad de plantear manejos específicos que permitan maximizar este servicio ambiental (por ej., selección de género a plantar y manejo durante la plantación y durante el crecimiento activo de los árboles).

1.1.3 Metano (CH₄): Este GEI se genera naturalmente en ambientes anóxicos del suelo, siendo la mayor fuente antrópica para la región pampeana las emisiones realizadas por los rumiantes (SAyDS, 2015). Si bien el principal sumidero del CH₄ es la estratósfera, una parte significativa se produce en bacterias metanótrofas presentes en los suelos aireados. Los escasos estudios llevados adelante en esta región demuestran que los suelos forestales poseen una mayor capacidad de oxidar CH₄ que los suelos sometidos a otros usos. Así, en promedio, la tasa de mitigación de CH₄ de los suelos de plantaciones de *Eucalyptus*, pastizales y cultivos fueron de 87, 70 y 36 kgCO₂eq ha⁻¹año⁻¹ respectivamente (de Bernardi et al., 2022), mientras que las de *Pinus*, pastizales y cultivos fueron de 157, 90 y 57 kgCO₂eq ha⁻¹año⁻¹, respectivamente (de Bernardi et al., 2024). Así, todos los suelos han demostrado ser sumideros de CH₄. En cuanto al manejo forestal, un metaanálisis mundial indicó que, en promedio, los suelos forestales oxidan más CH₄ que los pastizales y que la magnitud del servicio depende de diversas variables ambientales, encontrando un efecto significativo de la edad (positivo) y la densidad de plantación (negativo cuando >1500 planta ha⁻¹; Gatica et al., 2022). Este aumento en la capacidad de mitigar CH₄ se asoció fuertemente con el contenido de agua en el suelo, cuya disminución en suelos forestales favorece la difusión de los gases (de Bernardi et al., 2022; Gatica et al., 2022).

1.1.1 Óxido Nitroso (N₂O): Su importancia como GEI radica en que posee una actividad 264 veces



mayor que el CO₂. Su emisión aumenta cuando los poros del suelo están vacíos de agua ya que depende del balance entre los procesos de nitrificación. Solamente encontramos un estudio realizado en Entre Ríos en donde se midió la emisión de cuatro forestaciones con *E. grandis* y un bosque nativo, evidenciando la baja tasa de emisión de todas ellas (Álvarez et al., 2020). Las emisiones acumuladas durante el año en las plantaciones situadas en suelos de textura más gruesa fueron significativamente más bajas que en las ubicadas en suelos finos, alcanzando valores promedios de 8,4 y 51 kgCO₂eq ha⁻¹año⁻¹ contra 158 registrado en el bosque nativo. Para tener un horizonte de comparación, en suelos semiáridos pampeanos se midió una emisión durante barbecho y el ciclo de cultivo de 125 y 1278 kgCO₂eq ha⁻¹año⁻¹ (Alvarez et al., 2012). Esto pone de manifiesto que los sistemas forestales emiten menos N₂O, por lo que su introducción, al menos, no significaría un aumento de la emisión.

1.2. Árboles y forestaciones y la capacidad de mejorar la adaptabilidad de los sistemas

Las cortinas forestales generan impactos de distinta magnitud y sentido dependiendo de varios factores ambientales (dirección preponderante del viento, desplazamiento de las sombras, entre otros), pero en general, se observa competencia con los cultivos por agua, nutrientes y radiación solar en sitios cercanos (distancias de una a tres veces la altura de la cortina) y, facilitación por disminución del viento que aumenta la eficiencia en el uso de la radiación a mayores distancias (de tres a veinte veces su altura; Masters et al., 2023). Prácticamente no hay registros publicados sobre el uso de barreras rompevientos en la región pampeana. A nivel regional, es posible citar que en La Pampa, tanto el rendimiento del grano con el índice de cosecha del trigo fue distinto con protección que sin ellos, observándose aumentos y disminuciones dependiendo de la ubicación geográfica y tipo de protección (Boldes et al., 2002). De todas maneras, existen publicaciones sobre cultivos tradicionales para la región llevados adelante en otras partes del mundo. Así, en Australia, se observó un efecto positivo significativo e interactivo de la distancia y la orientación de la cortina sobre la tasa de emergencia de plántulas y los días hasta anthesis y maduración en trigo, con un efecto marcado sobre la cantidad de espigas, que determinó cambios en la producción e índices de cosecha (Sudmeyer y Speijers, 2007). Es importante resaltar que el efecto de la cortina sobre el viento también afectó la incidencia de enfermedades por hongos en los cultivos (Sudmeyer y Speijers, 2007). Finalmente, una revisión sobre el uso de las cortinas forestales en EE.UU. indica que el uso de estas permitió incrementar el rendimiento en distintos cultivos de interés con magnitudes de un 6 % en avena, 12 % en maíz, 16 % en soja, 20 % en forraje, 22 % en trigo, 25 % en cebada, entre otros (Smith et al., 2021).

La disminución del viento también tiene efectos positivos sobre el ganado, sobre todo en momentos de extremos climáticos (olas de calor o frío). Así, la cantidad de energía que necesitan los animales para mantener su temperatura aumenta con la velocidad del viento, siendo este factor cada vez más importante a medida que disminuye la temperatura del aire (Masters et al., 2023). Más allá del efecto sobre la ganancia de peso o la mortalidad, las altas temperaturas también afectan negativamente el desarrollo embrionario, el ciclo estral, la fertilización, la movilidad espermática, entre otros factores reproductivos (Masters et al., 2023). En la región pampeana es conocido el efecto del calor sobre el desempeño animal, sugiriendo la incorporación de sombra y el acceso al agua como herramientas de manejo que permiten disminuir sus efectos. Finalmente, la magnitud del aporte de los árboles dependerá de la composición específica de la cortina o monte (altura y densidad de la copa), así como la densidad de plantas y su distribución en el espacio, siempre considerando la interacción con las variables ambientales de interés (dirección de vientos predominantes, principal pico de estrés en invierno o verano, latitud, entre otros factores; Masters et al., 2023).

2. CONCLUSIONES

La introducción de sistemas forestales en la región pampeana permitiría incrementar tanto la mitigación como la adaptabilidad al CC de los sistemas de producción primaria. Sin embargo, existe una escasa información local que permita estimar la magnitud en que los mismos permiten disminuir el impacto de los principales factores de estrés para la producción agropecuaria de la región (olas de calor o sequía).

3. LITERATURA CITADA



- ALVAREZ, C.; COSTANTINI, A.; ALVAREZ, C.R.; et al. 2012. Soil nitrous oxide emissions under different management practices in the semiarid region of the Argentinian Pampas. *Nutrient Cycl Agroecos* 94, 209–220.
- ALVAREZ, C.R.; RIMSKI-KORSAKOVA, H.; LUPI, A.M.; et al. 2020. Soil nitrous oxide emissions from *Eucalyptus* plantation in Argentina. *Forest Ecol and Manage* 473: 118301.
- BAEZA, S.; VÉLEZ-MARTIN, E.; DE ABELLEIRA, D.; et al. 2022. Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: The MapBiomass Pampa initiative. *Remote Sens Appl: Soc Environ* 28: 100934.
- BARROS, V.; VERA, C.; AGOSTA, E.; et al. 2013. Cambio climático en Argentina; tendencias y proyecciones. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. Vol. 2 y 5.
- BERHONGARAY, G., ÁLVAREZ, R., DE PAEPE, J., CARIDE, C., CANTET, R. 2013. Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. *Geoderma* 192: 97–110.
- BERTHRONG, S.T.; PIÑEIRO, G.; JOBBÁGY, E.G.; JACKSON, R.B. 2012. Soil C and N changes with afforestation of grasslands across gradients of precipitation and plantation age. *Ecological Applications* 22:76–86.
- BOLDES, U.; GOLBERG, A.; MARAÑÓN DI LEO, J.; et al. 2002. Canopy flow and aspects of the response of plants protected by herbaceous shelterbelts and wood fences. *J Wind Engin and Ind Aerod* 90: 1253-1270.
- DE BERNARDI, M.; PRIANO, M.E.; FERNÁNDEZ, M.E.; et al. 2022. Impact of land use change on soil methane fluxes and diffusivity in Pampean plains, Argentina. *Agric Ecosys Environ* 309: 107866.
- DE BERNARDI, M.; PRIANO, M.E.; FERNÁNDEZ, M.E.; et al. 2024. Natural grassland conversion to agriculture or pine plantations: Effects on soil methane uptake. *Soil Use Manage* 40:e13017.
- FERREIRO-DOMÍNGUEZ, N.; RODRÍGUEZ-RIGUEIRO, F.J.; RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A.; GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, M.P.; MOSQUERA-LOSADA, M.R. 2022. Climate Change and Silvopasture: The Potential of the Tree and Weather to Modify Soil Carbon Balance. *Sustainability* 14, 4270.
- FERRERE, P.; LUPI, A.M. 2023. How much carbon do Argentine Pampas *Pinus radiata* plantations store? *Forest Systems* 32: e005. doi.org/10.5424/fs/2023321-19703.
- FERRERE, P.; LUPI, A.M.; BOCA, R. 2014. Estimación de la biomasa aérea en árboles y rodales de *Eucalyptus viminalis* Labill. *Quebracho* 22: 100-113.
- FERRERE, P.; LUPI, A.M.; BOCA, R.; NAKAMA, V.; ALFIERI, A. 2008. Biomasa en plantaciones de *Eucalyptus viminalis* Labill. De la provincia de Buenos Aires. *Ciência Florestal* 18: 291-305.
- GATICA, G.; FERNÁNDEZ, M.E.; JULIARENA, M.P.; et al. 2022. Does forest management affect the magnitude and direction of the afforestation effect on soil methane fluxes? A meta-analysis. *For Ecol Manage* 507: 120009
- GYENGE, J.; GATICA, M.G.; SANDOVAL, M.; et al. 2022a. Estimación de las reservas de carbono orgánico del suelo con plantaciones forestales y otros usos de la tierra, en distintas regiones de Argentina. 97pp.
- GYENGE, J.; LUPI, A.; JULIARENA, M.P.; FERNÁNDEZ, M.E. 2022b. Contribución de la forestación en pastizales pampeanos en el marco del Cambio Climático. 1- Secuestro de C. 45° Congreso Argentino de Producción Animal, 16 al 18 de noviembre, virtual, *Revista de Producción Animal* 42 sup. 1: 347.
- GYENGE, J.; LUPI, A.; FERRERE, P.; et al. 2019. Stand density management diagrams of *Eucalyptus viminalis*: predicting stem volume, biomass and canopy cover for different production purposes. *CERNE* 25: 463-472.
- LIBERT-AMICO, A.; DUCHELLE, A.E.; COBB, A.; PECCOUD, V.; DJOUDI, H. 2024. Adaptación basada en los bosques: adaptación transformadora a través de los bosques y los árboles. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc2886es>.
- MASTERS, D.G.; BLACHE, D.; LOCKWOOD, A.M.; MALONEY, S.K.; NORMAN, H.C.; REFSHAUGE, G.; HANCOCK, S.N. 2023. Shelter and shade for grazing sheep: implications for animal welfare and production and for landscape health. *Animal Production Series* 63: 623-644. Doi: 10.1071/ANS22225.
- MILIONE, G.M.; MUJICA, C.R.; DAGUER, D.D.; BEA, S.A.; et al. 2020. Influence of soil texture, climate and vegetation cover on secondary soil salinization in Pampas plains, South America. *CERNE* 26: 212-221.
- ROLLA A.L., NÚÑEZ M.N., RAMAYÓN J.J., RAMAYÓN M.E. 2019. Impacts of climate change on bovine livestock production in Argentina. *Climatic Change* 153: 439-455.
- SAYDS. 2015. 3° Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. <https://unfccc.int/documents/67499>
- SUDMEYER, R.A.; SPEIJERS, J. 2007. Influence of windbreak orientation, shade and rainfall interception on wheat and lupin growth in the absence of below-ground competition. *Agroforestry Systems* 71: 201-214.
- WYNGAARD, N., CRESPO, C., ANGELINI, H., EYHERABIDE, M., LARREA, G., REUSSI CALVO, N., CARCIOCHI, W., SAINZ ROZAS, H. 2022. The effect of agriculture on topsoil carbon stocks is controlled by land use, climate, and soil properties in the Argentinean Pampas. *Catena* 212: 106126.