



BOSQUES Y PLANTACIONES FRENTE A SEQUÍAS Y OLAS DE CALOR: LOS DESAFÍOS DE UNA SILVICULTURA “CLIMÁTICAMENTE INTELIGENTE” PARA ADAPTAR LOS SISTEMAS PRODUCTIVOS AL CAMBIO CLIMÁTICO

María Elena FERNÁNDEZ¹

RESUMEN

El cambio climático global, caracterizado por el aumento en la temperatura media y por la mayor frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos extremos, posee impactos de diversa índole en los sistemas naturales y productivos. Si bien el aumento de temperatura media puede resultar en incrementos de la productividad primaria en regiones limitadas por bajas temperaturas, en las últimas décadas se han observado eventos de mortalidad masiva de árboles producto de fenómenos climáticos extremos, en su mayoría con combinación de sequía y altas temperaturas, en todo tipo de bosques a nivel global. Si bien son poco frecuentes los reportes de mortalidad masiva en bosques cultivados, debido a las condiciones de manejo que favorecen su desempeño, recientemente se han registrado eventos de este tipo en nuestro país, con un importante impacto económico. En esta charla se propone orientar la silvicultura al aumento de la adaptabilidad climática, basándose en conocimiento ecofisiológico de las especies, mediante una mirada integral que contemple la variabilidad de los genotipos, la selección del sitio y el manejo adaptativo. Se presentan ejemplos con especies de interés para la región mesopotámica argentina y se discuten las incertidumbres y desafíos para lograr sistemas forestales “climáticamente inteligentes”.

Palabras clave: *Ecofisiología de plantaciones, adaptabilidad climática, mortalidad por estrés abiótico.*

1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno de cambio climático (CC) se caracteriza por un aumento (de distinta magnitud de acuerdo a la región) en la temperatura media y en la frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos extremos (IPCC, 2023), que se viene observando en el último siglo en concordancia con el aumento de la concentración de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, producto mayormente de las actividades antrópicas. Si bien en nuestro planeta han ocurrido cambios climáticos a escala temporal geológica, y los sistemas biológicos han evolucionado adaptándose a dichos cambios (o perecido), la velocidad de cambio actual no tiene precedentes y esto conlleva a que diversos sistemas biológicos no sean capaces de migrar y/o adaptarse a las nuevas condiciones dentro de los plazos requeridos. Los bosques son sistemas especialmente vulnerables en este sentido debido a la larga duración de la vida media de los individuos, que son sometidos a condiciones muy variables durante su ontogenia. Para poder adaptarse a estos cambios rápidos, las especies arbóreas deberán migrar (espontáneamente o de manera asistida por los humanos) o bien aclimatarse mediante plasticidad fenotípica. La vulnerabilidad de los bosques se vio evidenciada en la primera revisión que se realizó a nivel global sobre eventos de mortalidad masiva de árboles que se publicó en 2010 (Allen et al, 2010) y que fue actualizada por Hartmann et al (2018). En estos trabajos se concluyó que la mortalidad -rápida y simultánea- de árboles adultos se ha observado en todos los biomas boscosos y en todos los tipos funcionales de árboles, es decir, no son fenómenos aislados o circunscriptos a alguna región en particular. Si bien en varios eventos la muerte de los árboles se produce por la combinación de síntomas de estrés abiótico con ataque de plagas -que se ven favorecidas por las altas temperaturas-, en un alto porcentaje de casos (aprox. 70%) la mortalidad se produce por la combinación de sequía (escasez de agua en suelo, sequedad en la atmósfera) y olas de calor (una secuencia de

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



días con temperaturas máximas más altas de lo normal), fenómeno denominado en inglés como “hotter-drought” (Hammond et al, 2022). Esta combinación de fenómenos climáticos lleva a sobrepasar umbrales de tolerancia fisiológica en las especies, conduciéndolas a un punto de “no-retorno” (e.g. Preisler et al 2020), aún en aquellas descritas como de alta tolerancia a sequía (e.g. Kannenberg et al, 2021).

Estos fenómenos han sido mayormente observados en árboles adultos creciendo en bosques naturales. Comúnmente se postula que las plantaciones forestales, intensivamente manejadas, están exentas de estos riesgos debido a las condiciones favorables de disponibilidad de recursos (por sitio y/o manejo) que maximizan la productividad. Sin embargo, la realidad demuestra que estos supuestos no siempre se cumplen, con reportes de mortalidad por “hotter-droughts” en plantaciones comerciales forestales en algunos lugares del mundo (Carnegie et al, 2022; Pascual et al 2022), incluyendo el evento de gran magnitud producido en la Pcia. de Corrientes, Argentina, que tuvo su pico en el año 2022 (ver más abajo). Consecuentemente, el tema de la mortalidad de árboles frente a los fenómenos climáticos extremos deja de ser solo una preocupación ligada a los bosques nativos -y los servicios ambientales que prestan- para trasladarse también al sector de bosques cultivados. Así, frente a la “leche derramada” (o a las miles de hectáreas de árboles muertos) surgen las preguntas: ¿Qué y dónde debemos plantar? ¿Cómo debemos manejar las plantaciones frente a estos nuevos escenarios climáticos?

2. LA NECESIDAD DE UNA “NUEVA” SILVICULTURA

Esta ponencia no trae respuestas acabadas, más bien pretende abrir interrogantes, presentar evidencia fragmentaria y proponer una mirada frente a la cuestión, abierta al debate.

Frente a los desafíos que impone el CC, es útil el concepto de “Agricultura Climáticamente Inteligente” (FAO, 2019), referido al enfoque que propone desarrollar sistemas productivos que cumplen con los siguientes tres objetivos de manera simultánea: 1) el aumento sostenible de la productividad y los ingresos agrícolas; 2) la adaptación y la creación de resiliencia ante el cambio climático; y 3) la reducción y/o absorción de GEI. Este concepto, desarrollado como propuesta para los sistemas agrícola-ganaderos, bien puede extrapolarse a la producción forestal. Sin embargo, aquí proponemos que, garantizando la adaptabilidad de los sistemas forestales, es decir, operando principalmente a nivel del segundo componente del concepto, es posible contribuir a los otros dos como consecuencia directa (Fig. 1). En este sentido, la absorción de GEI en biomasa o suelos forestales (tanto secuestro de carbono como oxidación de metano) es un servicio ambiental intrínsecamente ligado a los sistemas forestales. Y a su vez, la sostenibilidad de la actividad va a depender tanto de la producción sostenida (es decir, resistente o al menos resiliente a la variabilidad climática) de los bienes directos tradicionales como la madera, como también de mercados y preferencias de consumo asociados a otros servicios ecosistémicos, como la mitigación de GEI. Por lo tanto, en contraposición con una silvicultura que históricamente ha priorizado la productividad y en menor medida, la calidad de los productos de acuerdo a los fines industriales se plantea como estratégica la visión de una silvicultura orientada a aumentar la adaptabilidad de los sistemas forestales frente a la variabilidad climática (Fig. 1).

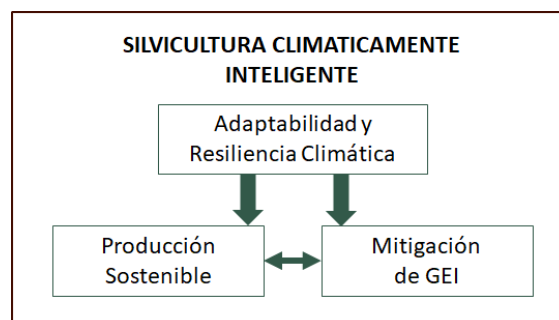


Figura 1. Los tres componentes que debe perseguir una Silvicultura Climáticamente Inteligente, basados en la propuesta de la FAO para la Agricultura. En esta propuesta, se plantea que haciendo foco en el componente de adaptabilidad y resiliencia es posible generar una retroalimentación positiva hacia los otros dos.



Una pregunta importante en este contexto es cuáles son los compromisos entre productividad/calidad de los productos y resistencia o resiliencia frente al estrés ambiental. Este compromiso puede darse - en mayor o menor medida- debido a que la madera de los árboles, es decir, el tejido xilemático, se encuentra en el punto de convergencia de los tres procesos: la productividad (mediado por la eficiencia de conducción de agua desde el suelo a las hojas); la calidad industrial de los productos derivados de la madera, principal producto del bosque -aunque no el único-; y la resistencia al estrés abiótico, especialmente a estrés hídrico y heladas (mediado por la seguridad del xilema en términos de vulnerabilidad a la cavitación por tensión y por frío). Los tres procesos dependen de la anatomía, arreglo tridimensional y ultraestructura de las células que componen el xilema, y sus conexiones con el resto de la planta. La madera es la que permite también el secuestro de C a largo plazo por parte de los bosques. Ahora bien, a nivel de grandes grupos taxonómicos, en general existe un compromiso entre eficiencia y seguridad del sistema conductivo (Gleason et al, 2016), y por ende, entre productividad y tolerancia a estrés. Pero, ¿qué sucede a nivel intraespecífico? ¿Es posible sortear estos compromisos dentro de especies de interés? Si no lo es, ¿cuál es el punto de optimización a perseguir y con qué herramientas podemos alcanzarlo?

Para responder a estos interrogantes y aproximarnos al desarrollo de una silvicultura climáticamente inteligente, el conocimiento científico y la gestión forestal deberían poseer una visión integral que considere tres aspectos: el sitio o ambiente de plantación; la genética y el manejo adaptativo (Fig. 2). Podrá argumentarse que estos tres elementos siempre se han considerado, de alguna u otra forma, en el desarrollo forestal, y es verdad. Pero, al mismo tiempo, también es cierto que no se los ha analizado desde la adaptabilidad climática y al menos a nivel de desarrollo del conocimiento, rara vez estos tres grandes aspectos se trabajan juntos, posiblemente debido a la complejidad que conlleva el trabajo interdisciplinario en una era en la que la ultra-especialización ha levantado muros invisibles y la cantidad de conocimiento disponible lo hace prácticamente inabarcable. Los problemas complejos requieren soluciones complejas, y éstas solo pueden ser pensadas mediante el aporte conjunto y transversal de todas las miradas posibles (Fig. 2). A este esquema que remite básicamente a los aspectos biológicos que hacen a la producción forestal, como primer cuello de botella de la misma, luego deben sumársele consideraciones económicas, financieras, de legislación, sociales, etc., que exceden los objetivos de esta presentación.

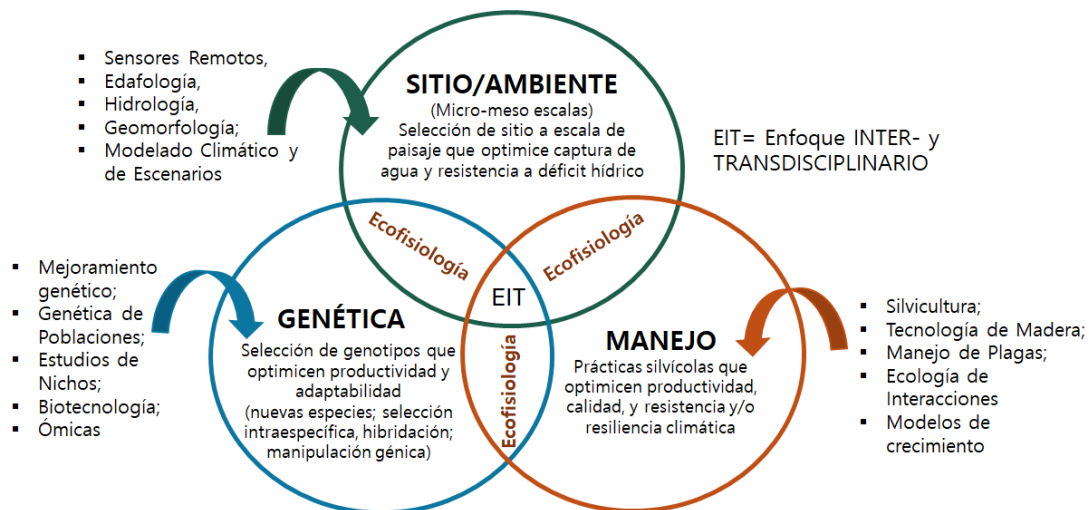


Figura 2. Enfoque integral para poder llegar a una Silvicultura Climáticamente Inteligente: debe contemplar las características de sitio y micrositio (en escenarios climáticos presentes y futuros); la variabilidad genética actual a nivel específico e intraespecífico, y la que puede ser seleccionada y diseñada mediante hibridaciones u otras herramientas biotecnológicas; y el manejo adaptativo que incremente la resistencia y resiliencia climática y ante estreses bióticos. Para cada objetivo, hay aportes disciplinarios diversos. En la intersección de cada par de componentes está la Ecofisiología, como disciplina que estudia a las plantas en interacción con el ambiente. En la intersección de los tres



componentes se encuentra el trabajo inter- y transdisciplinario, capaz de aportar soluciones a problemáticas complejas. Este enfoque debería aplicarse para la generación de conocimiento y para la gestión forestal (aunque en este último caso, otras consideraciones socio-económicas entran en juego).

3. ALGUNOS EJEMPLOS RELEVANTES PARA LA MESOPOTAMIA ARGENTINA

En este apartado, analizaremos brevemente ejemplos para cada uno de los tres componentes explicitados en la Fig. 2 desarrollados en taxones de interés para la Mesopotamia argentina. Estos ejemplos se han seleccionado debido al enfoque en la adaptabilidad a estrés abiótico, aspecto que se propone como central para garantizar una producción sostenible y que mitigue el CC (Fig. 1).

3.1. Importancia del sitio de plantación en la determinación de los patrones de mortalidad de pinos en la Pcia. de Corrientes

Como consecuencia de un fenómeno climático de sequía prolongada por 3 años, coincidente con años Niña a nivel de temperaturas del océano Pacífico, y sumado a una ola de calor sin precedentes (i.e. una situación de “hotter-drought”), en el año 2022 se produjo un fenómeno de magnitud regional en la Pcia. de Corrientes, que afectó -al menos hasta ese año- 25.000 ha. de plantaciones comerciales adultas, con aprox. 10.500 ha. con mortalidad de más del 90% de los individuos (SAGPYA y otros, 2022). Este evento, de gran impacto económico, puso en alerta al sector forestal regional y se movilizaron vinculaciones entre distintas instituciones y actores. Aquí nos centraremos en los aspectos ambientales que describen el fenómeno, tratando de comprender cómo fue la dinámica temporal del evento, y qué especies y condiciones de sitio fueron las más afectadas para tratar de brindar recomendaciones para aumentar la adaptabilidad de futuras plantaciones. Los resultados detallados que se resumen aquí pueden ser consultados en Gatica et al (2023) y Gatica et al (2024).

El seguimiento, mediante análisis con sensores remotos -previamente validados a campo- del fenómeno durante un año completo desde que comenzaron a visualizarse signos de mortalidad de árboles, permitió concluir que la especie más afectada a nivel regional y local fue *Pinus taeda*, y que la mortalidad tuvo una dinámica temporal y una máxima magnitud final (tomando como fecha final un año luego del inicio del evento, aunque luego el fenómeno continuó) fuertemente asociadas a las condiciones de sitio donde las plantaciones estaban instaladas. La alta mortalidad en *P. taeda* en particular, si bien no puede separarse de las condiciones de sitio donde se implanta la especie, podría entenderse a la luz de la alta vulnerabilidad a la cavitación del xilema observada en progenies cultivadas en la región mesopotámica (Bulfe et al, 2016), que sugieren que la selección por productividad en esta especie ha ido en detrimento de su tolerancia a estrés. Considerando la dinámica de mortalidad durante el evento de sequía extrema, se observaron diferencias estadísticas en los parámetros que describen esta dinámica (fecha de inicio de fase exponencial, tasa inicial de mortalidad y máxima magnitud) entre las distintas calidades de sitio, descritas *a priori* por la compañía forestal donde se realizó el relevamiento (Fig. 3). La mayor mortalidad, en fecha anticipada de inicio, tasa inicial y magnitud final, se observó en los llamados sitios Rc, que son áreas de relativamente baja productividad forestal (en términos comparativos a la máxima productividad potencial de la zona). Estos sitios se caracterizan por su posición relativamente alta en el paisaje y sus suelos someros (aprox. 50 cm) desarrollados sobre un impedimento rocoso. La máxima exploración de raíces en el mismo coincide con este impedimento. La menor mortalidad, que fue casi nula, también coincidió con sitios de baja productividad forestal (sitios P15 y Ba), pero en este caso asociada a una posición baja en el paisaje, coincidente con áreas de inundación prolongada en periodos húmedos. Resulta especialmente interesante discernir las características de sitio que determinaron niveles intermedios de mortalidad final y con una dinámica temporal variable entre ellos (Fig. 3). Los sitios P21, donde se observó la menor mortalidad dentro de los valores intermedios, son zonas -al igual que los P18 y P25- de moderada a buena productividad para pinos, caracterizados por poseer suelos profundos, con un horizonte B textural a profundidad variable que puede ser de más de 100 cm. En un sitio P21 relevado a campo en agosto de 2022, se observó que las raíces de los árboles llegaban a gran profundidad, por debajo del metro, y presentaban en ese momento signos de baja a nula afectación. En contraposición, los sitios E35 son sitios de alta productividad (adecuados incluso para eucaliptos), que también poseen una profundidad de suelo

similar, aunque se ubican más arriba en el paisaje. La diferencia en estos suelos, donde se observó una alta proporción de árboles muertos, es la presencia de signos de anoxia a profundidades variables, indicando la presencia -en periodos climáticos normales- de una napa superficial. En acuerdo con estas observaciones, el relevamiento de la profundidad de raíces de los pinos indicó que allí desarrollan sistemas radicales someros, de 30 cm aprox., por más que no haya un impedimento físico como en el caso de los sitios Rc.

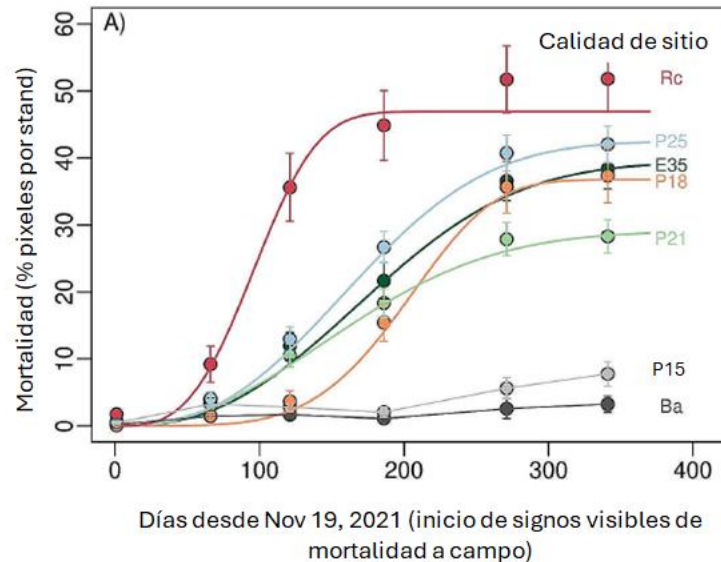


Figura 3: Figura modificada a partir de la Fig. 2 de Gatica et al (2024). Se muestra la dinámica temporal de afectación de plantaciones dentro de un total de 20.000 hectáreas forestadas, tomando como variable de respuesta el porcentaje de píxeles (mediante procesamiento de imágenes de Sentinel-2) que mostraban una mortalidad de árboles mayor a 90%. El análisis estadístico de los datos (con modelos mixtos que consideraron especie, edad, tamaño de rodales, calidad de sitio, tiempo, entre otros) mostraron que la dinámica temporal de la mortalidad se asoció fuertemente, y de manera no lineal, a la calidad de sitio, definida previamente por la compañía forestal en términos de productividad. Ver el texto para la descripción de las distintas calidades de sitio.

Los análisis de anillos de crecimiento de los 10 años previos al evento de mortalidad realizados en individuos vivos y muertos de *P. taeda* de sectores Rc, P21 y E35 muestran que, si bien existe una tendencia a que los árboles que sobrevivieron dentro y entre sectores, presenten un mayor crecimiento medio, las diferencias estadísticas no fueron significativas. Tampoco mostraron diferencias significativas en la estructura de su madera, analizada a través del porcentaje de leño temprano y tardío de los anillos. Esto sugiere que en los años previos al periodo considerado, las diferencias ambientales -resultantes en crecimiento diamétrico de los árboles- en los distintos sectores no permitían anticipar una mortalidad diferencial. Sin embargo, la diferenciación de largo plazo a nivel de calidad de sitio sí permite predecir un comportamiento diferente frente a un fenómeno climático de "hotter-drought". En este sentido, la mayor y la menor mortalidad se asociaron a sitios de baja productividad en términos forestales, ambos sitios con estrés hídrico, pero en un caso por defecto (por suelos someros) y en el otro por exceso de agua en periodos climáticos normales para la región. Considerando las zonas con mortalidad intermedia (al menos en el primer año), los sitios de alta productividad inducida por el aporte de agua de una napa superficial que inhibe el desarrollo de raíces en profundidad, fueron los más afectados. En contraste, los sectores donde los árboles pudieron explorar con sus raíces horizontes profundos de suelo, debido a que en condiciones normales la napa se encuentra a mayor profundidad, pudieron resistir mejor las condiciones extraordinarias de sequía. En este sentido, podemos concluir que una medida que aporta a la adaptabilidad climática -y a la vez es consistente con una productividad forestal adecuada y ambientalmente sustentable en términos de preservar zonas bajas de humedales- sería la de priorizar la plantación en zonas donde los árboles pueden desarrollar un sistema radical extenso y profundo. Por supuesto, las otras zonas son factibles de seguir siendo forestadas, pero se



deberá considerar que poseen un riesgo aumentado de mortalidad, de moderada a alta magnitud de acuerdo a la permanencia de agua en el sistema y a los mecanismos de aclimatación a déficit hídrico que las plantas tienen de acuerdo a las condiciones de crecimiento previas al evento.

3.2. Variación inter- e intraespecífica en caracteres de resistencia a la sequía en eucaliptos

La exploración de la variación entre especies y dentro de ellas, entre familias y genotipos, de caracteres de resistencia a la sequía en *Eucalyptus* spp tiene una vasta trayectoria, debido a la importancia comercial del género en diversos países. Históricamente, se ha explorado extensamente el rol de la capacidad de ajuste osmótico como importante mecanismo de resistencia a estrés hídrico y por heladas en estas especies. Sin embargo, a diferencia de los muchos estudios en especies coníferas o en angiospermas de otros géneros, los estudios de la anatomía funcional de la madera de estas especies son mucho más reducidos. Los eucaliptos tienen una anatomía de xilema compleja, formada por diversos tipos celulares. La relación particular entre estos tipos celulares y la ultraestructura de los mismos desafían varios de los conceptos y teorías fuertemente arraigados en la hidráulica de las especies leñosas, al menos al considerar especies de eucaliptos de alta productividad y/o con selección genética. En este sentido, estudios de eucaliptos en bosques nativos en Australia, en especies que no son cultivadas comercialmente, parecen estar en línea con teorías generales que indican un compromiso entre seguridad y eficiencia del sistema conductivo (dado por una mayor vulnerabilidad a cavitación (VC) en especies de vasos más grandes) y una relación negativa entre densidad de madera y VC (i.e. mayor densidad asociada a menor VC) (Peters et al, 2021). Sin embargo, estudios llevados a cabo en Argentina (revisados en Fernández et al, 2019) muestran que en los genotipos introducidos y seleccionados en este país, existe una relación inversa entre tamaño de los elementos de conducción del xilema (vasos) y resistencia a la cavitación, siendo las especies de vasos más grandes en promedio, y por ende, con mayor conductividad hidráulica, las de menor VC (Fig. 4). Asimismo, se describió que una mayor amplitud de tamaño de vasos se asocia con una mayor seguridad hidráulica, y que una mayor cantidad de traqueidas vasicéntricas y fibrotraqueidas rodeando a los vasos solitarios resultan en un aumento tanto de la eficiencia de conducción de agua como de la seguridad del sistema conductivo (Barotto et al, 2016).

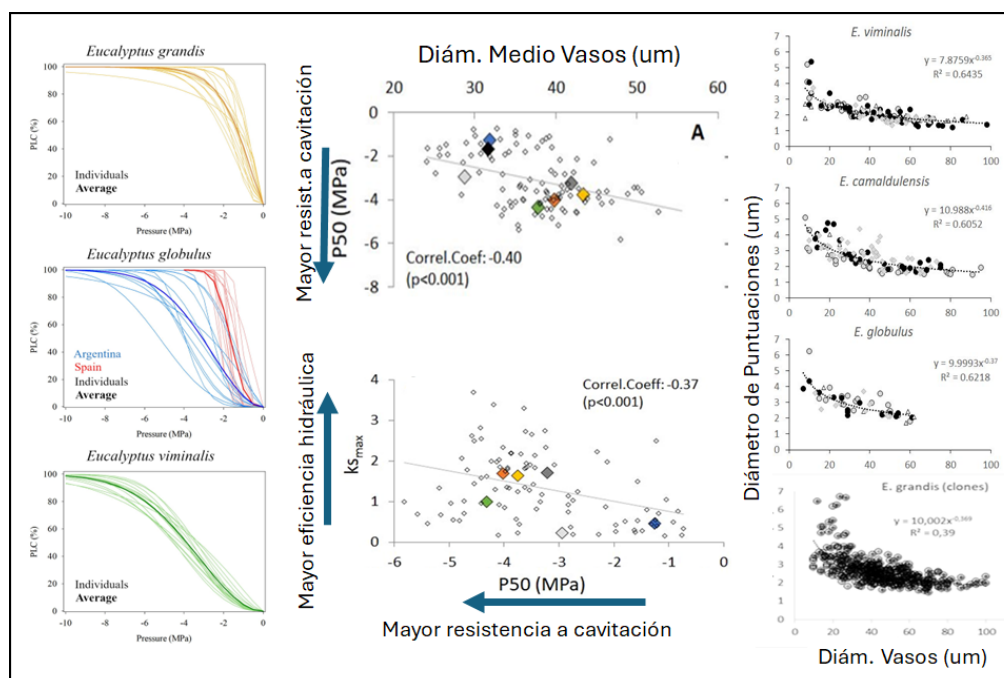


Figura 4: A la izquierda se muestran curvas de vulnerabilidad a la cavitación en tres especies de *Eucalyptus*, que demuestran la variabilidad entre especies y dentro de ellas, especialmente en *E. globulus*. En el centro de la figura, panel superior, se observa la relación entre el tamaño medio de los vasos de las ramas de distintas especies (cada color es el promedio de una especie, los puntos individuales son individuos) y la vulnerabilidad a la cavitación (estimada por el parámetro P50); y en el



panel de abajo, la relación entre la conductividad hidráulica máxima y la vulnerabilidad a la cavitación. A la derecha de la figura se muestran los valores del tamaño de las puntuaciones intervasculares -por donde puede penetrar el aire que cavita los vasos- y el diámetro de los vasos en 4 especies. Se aprecia que los vasos más pequeños del xilema son los que poseen puntuaciones más grandes, pudiendo por ello ser más vulnerables a la cavitación.

Ahora bien, ¿cómo es posible sortear el compromiso entre eficiencia y seguridad hidráulica? Analizando el tamaño de las puntuaciones que conectan los vasos entre sí y con otras células, se encontró que los vasos más pequeños del xilema poseen puntuaciones de mayor diámetro que los vasos más grandes (Fig. 4), posiblemente aumentando su eficiencia para el pasaje de agua, pero a la vez, la probabilidad de que penetre aire y cavite el conducto. En acuerdo con esta observación anatómica en el xilema de *E. grandis*, *E. globulus*, *E. viminalis* y *E. camaldulensis*, un experimento en esta última especie demostró que los vasos más pequeños del xilema son efectivamente los primeros en cavitar durante un periodo de sequía (i.e. poseen una mayor probabilidad de cavitación que la esperada por azar en función de su proporción en el xilema) (Barigah et al, 2021). Por otro lado, también de manera contraria a lo descripto usualmente, se encontró que las maderas más densas eran las menos resistentes a la cavitación en estas especies de eucaliptos. Sin embargo, las especies con mayor densidad de madera a nivel de ramas fueron aquellas con menor densidad a nivel de fustes, por lo que se observó una correlación significativa mostrando que las especies con menor densidad de madera de fustes (ej. clones de alta productividad de *E. grandis*) fueron las más vulnerables a la cavitación en sus ramas.

Así, integrando este conocimiento con el de comportamiento fisiológico de las especies a nivel foliar, se concluyó que los eucaliptos estudiados poseen una gradación de comportamientos que va de especies con características evitadoras de la sequía, como *E. grandis*, hasta especies con caracteres de tolerancia, como *E. camaldulensis*. La primera posee alta vulnerabilidad a la cavitación en sus ramas terminales, que son de alta densidad y baja conductividad, pero una baja densidad de madera y alta conductancia potencial en sus fustes. Esto hace que sea capaz de movilizar agua eficientemente cuando el recurso no es limitante, a la vez que la alta vulnerabilidad a la cavitación de sus ramas le confiere susceptibilidad ante la sequía, aunque a la vez, le permitiría actuar como fusibles para perder superficie transpiratoria y proteger el fuste principal ante momentos de déficit hídrico, un mecanismo que contribuye a la resiliencia. En consonancia con su alta VC, esta especie posee alta sensibilidad estomática, comparativamente con otros *Eucalyptus* puros y con híbridos interespecíficos con eucaliptos colorados (*E. camaldulensis* y *E. tereticornis*), y esta sensibilidad incluso aumenta en condiciones de estrés. Cabe destacarse que se encontró variación en vulnerabilidad a la cavitación de distintos clones de *E. grandis*, pero siempre dentro de un rango acotado propio de una especie vulnerable y evitadora de la desecación. En contraste, *E. camaldulensis* posee una estrategia tolerante, caracterizada por una alta resistencia a la cavitación y un marcado anisohidrismo producto de mantener sus estomas abiertos -y por ende, la transpiración y fijación de C- a medida que el suelo se va desecando. Estas mismas características se observaron en híbridos entre *E. grandis* y *E. camaldulensis* (clones GC), que presentaron un mejor desempeño en crecimiento ante estrés hídrico que clones de *E. grandis* puros (ej. Gándara et al, en revisión). Resulta interesante ver que si bien el cruzamiento de *E. grandis* con *E. tereticornis* presenta algunas similitudes fisiológicas con los clones GC en respuesta a la sequía, su desempeño en crecimiento no sería igualmente óptimo (Gándara et al, en revisión). En este sentido, se está trabajando fuertemente en distintos grupos de investigación en la exploración del desempeño de clones híbridos como estrategia para aumentar la resistencia al estrés abiótico en eucaliptos.

Por otro lado, la exploración de la variabilidad intraespecífica en otras especies de *Eucalyptus*, apropiadas para climas más templados y fríos que los de la Mesopotamia argentina, muestra que en el caso de *E. globulus* existe una importante variabilidad en caracteres hidráulicos, que van de la mano con la anatomía y densidad de su madera (Barotto et al, 2018). En primer lugar, puede decirse que existe una relativamente alta variación entre progenies introducidas en Argentina, que en conjunto poseen una relativamente alta resistencia a la cavitación, de la mano de valores altos de densidad de madera de fustes. Estas progenies se diferencian grandemente de clones cultivados en Galicia,



España, los que poseen características de funcionalidad y anatomía de la madera más cercanos a los materiales de *E. grandis* en Argentina (Fernández et al, 2019). Esto sugiere que dentro de esta especie en particular, existe una amplia diversidad genética para explorar en cuanto a resistencia a estrés hídrico (Fig. 4), aunque los potenciales compromisos con la productividad están aún en análisis. Por el contrario, si bien en *E. viminalis*, especie de gran resistencia a heladas y sequía, se observó variabilidad en densidad de la madera (Alarcón et al, 2021), no se encontró variación en la vulnerabilidad a la cavitación de distintas progenies.

En conjunto estos resultados sugieren que existen ciertas tendencias claras -y a veces contrarias a las observadas en otros géneros- entre anatomía, densidad de madera y funcionalidad hidráulica a nivel interespecífico, pero las relaciones a nivel intraespecífico dependen de la especie. Asimismo, la hibridación de especies con distintas estrategias de uso de agua y resistencia a la sequía es un mecanismo promisorio para aumentar la adaptabilidad del género sin perder productividad, aunque las respuestas de las distintas combinaciones deben estudiarse detalladamente.

3.3. Efecto de la intensidad y frecuencia de raleo en la sensibilidad al clima en *E. grandis*.

Tal vez el mayor campo para la exploración en torno a la adaptabilidad resida en el manejo forestal. Existen relativamente pocos estudios al respecto, y los mismos muestran resultados contradictorios entre especies y una alta dependencia de las condiciones de sitio (Castagneri et al, 2022). En dicho meta-análisis se observó que en la mayoría de los estudios (49%) se encontró una mayor sensibilidad al déficit hídrico en situaciones de mayor competencia intraespecífica de los árboles. Sin embargo, hubo un 15% de casos en los que la relación fue significativamente inversa (i.e. mayor sensibilidad a menor competencia), y en los casos restantes, no hubo un efecto de la competencia sobre la sensibilidad al clima. Por lo tanto, no es posible recomendar el raleo como una práctica tendiente a aumentar la adaptabilidad de los árboles sin analizar la respuesta en la especie de interés y bajo las condiciones particulares de sitio y clima.

Un ejemplo de análisis de este tipo se realizó en plantaciones de *E. grandis* desarrolladas en tres sitios de las provincias de Corrientes y Entre Ríos, Argentina. Los detalles del estudio pueden encontrarse en Giana et al (2023). Sobre ensayos de raleo de distinta intensidad y momento de aplicación, se evaluó la sensibilidad del crecimiento a la disponibilidad hídrica de los árboles individuales, y la respuesta a un evento de sequía extrema. La sensibilidad, estimada como la pendiente de la relación entre crecimiento y balance hídrico, se analizó en promedio para rodales de distinta densidad post-raleo, como en función de la competencia intraespecífica de cada individuo en particular de manera de poder explorar mejor las causas de las respuestas a nivel individual, y extrapolar los resultados a situaciones de competencia promedio no evaluadas. A nivel de sitio y promediando todos los tratamientos, no se observó una relación entre la productividad media del sitio y la sensibilidad al clima de los árboles, es decir, los dos sitios con mayor productividad media fueron los de menor y mayor sensibilidad. Por otro lado, se observó que -como era de esperarse- el crecimiento medio de los árboles fue mayor cuanto menor fue la densidad de plantación (panel superior Fig. 5) y el grado de competencia del individuo (más allá de la densidad del rodal, datos no mostrados), mostrando relaciones lineales. Más aún, la sensibilidad al clima describió un patrón opuesto (panel inferior Fig. 5), presentando los árboles de mayor crecimiento la menor sensibilidad al clima. Interesantemente, el doble raleo -es decir, aquel que llevó el rodal a una misma densidad final en dos etapas- disminuyó la sensibilidad al clima comparativamente con la misma densidad alcanzada en una única operación, y más aún, aumentó marcadamente la resistencia y la resiliencia del crecimiento de los árboles frente a un evento de sequía extrema ocurrido en el año 2008 en la región (Figura 6). La mortalidad de los individuos en general no se asoció con el tratamiento de raleo, aunque sí se observó una menor mortalidad en el tratamiento de mayor intensidad alcanzada con doble raleo en uno de los sitios (Giana et al, 2023).

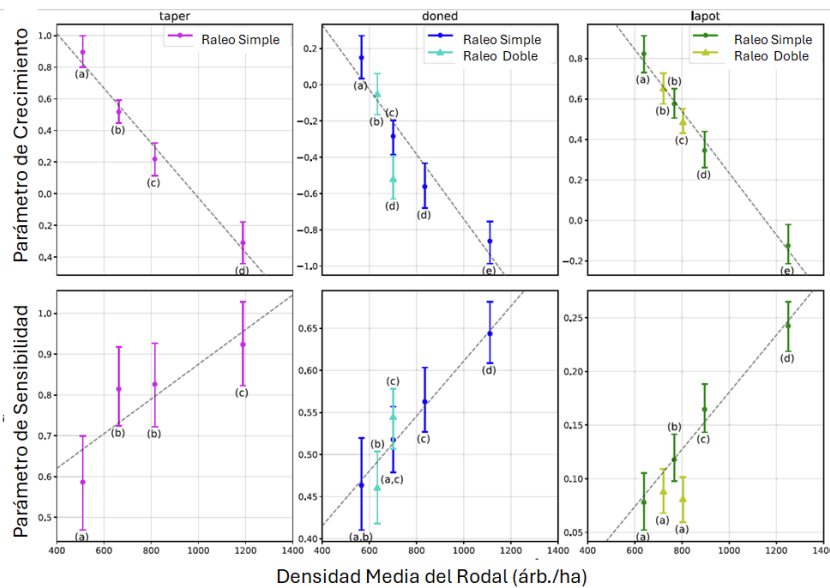


Figura 5. Modificada a partir de la Fig. 4 de Giana et al (2023). En el panel superior se muestra un parámetro del análisis Bayesiano que se relaciona directamente con el crecimiento medio de los árboles individuales. En el panel inferior, el parámetro que describe la sensibilidad media al balance hídrico. Cada punto es el promedio con su desvío estándar de todos los individuos creciendo en rodales con 500 a 1200 individuos. De izquierda a derecha se muestran los tres sitios de estudio. En dos de los sitios, las densidades finales se alcanzaron en uno solo o mediante dos raleos sucesivos. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos.

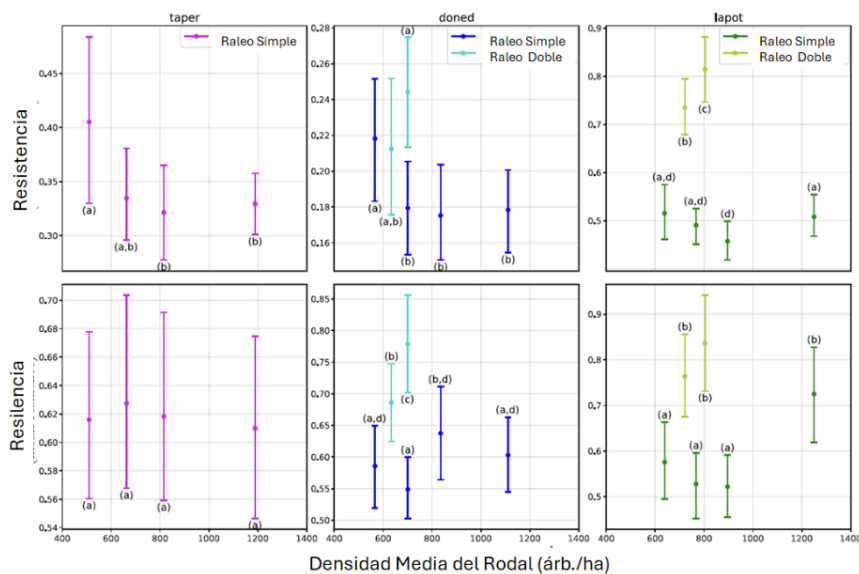


Figura 6. Modificada a partir de la Fig. 6 de Giana et al (2023). En el panel superior se muestra un parámetro del análisis Bayesiano que se relaciona directamente con la Resistencia ante un evento climático extremo (crec. ese año/ crec. en años anteriores). En el panel inferior, el parámetro que describe la Resiliencia (crec. post evento / crec. antes del evento). Se presentan los valores promedios y sus desvíos estándar de todos los árboles en función del tratamiento de intensidad y momento de raleo. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos.

Estos resultados sugieren que en el caso de *E. grandis*, la disminución de la competencia aumenta la adaptabilidad de los sistemas al aumentar tanto el crecimiento individual como la resistencia al déficit hídrico moderado (i.e. baja la sensibilidad al balance hídrico) y severo, especialmente cuando se lo practica de manera gradual (en dos etapas en lugar de en un solo raleo inicial). Se desconocen aun los



mecanismos morfo-fisiológicos por los cuales se observan estas respuestas diferenciales entre el raleo simple y doble.

4. CONSIDERACIONES FINALES

En los apartados anteriores se planteó como estrategia para abordar la problemática de los efectos del cambio climático sobre la producción forestal el desarrollo de una “nueva” Silvicultura, fuertemente anclada en la adaptabilidad. Asimismo, se planteó la necesidad de una integración de miradas y saberes tanto para la generación de nuevo conocimiento como para la aplicación del mismo en terreno. Se mostraron ejemplos de avances en el conocimiento en especies y situaciones de ambiente y manejo de interés para la región mesopotámica argentina, principal región forestal de bosques cultivados a nivel nacional. Ahora bien, cada una de las piezas mostradas corresponde a un rompecabezas más grande, en el cual son muchas más las piezas faltantes que las existentes. Cabe preguntarnos si lograremos trabajar de manera mancomunada entre disciplinas, grupos de trabajo, instituciones, actores y subsectores del sector forestal para llegar a buen puerto. En otras palabras, si seremos capaces de enfrentar los desafíos de nuestro tiempo con una visión de conjunto, que, respetando y celebrando la diversidad de saberes y miradas, permita el desarrollo del sector y de su gente en armonía con la Naturaleza.

5. LITERATURA CITADA

- ALARCÓN P, ME FERNÁNDEZ, GPJ OBERSCHELP, P PATHAUER, A MARTÍNEZ-MEIER. 2021. Sources of phenotypic variation of wood density and relationships with mean growth in two Eucalyptus species in Argentina. *Forest Systems* 30(3), e013. <https://doi.org/10.5424/fs/2021303-17208>.
- ALLEN, C.D., MACALADY, A.K., CHENCHOUNI, H., BACHELET, D., MCDOWELL, N., VENNETIER, M., KITZBERGER, T., RIGLING, A., BRESHEARS, D.D., HOGG, E.H.(T.), GONZALEZ, P., FENSHAM, R., ZHANG, Z., CASTRO, J., DEMIDOVA, N., LIM, J.-H., ALLARD, G., RUNNING, S.W., SEMERCI, A., COBB, N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259 (4): 660-684. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.001
- BARIGAH TS; GYENGE J; BARRETO FM; ROZENBERG P; FERNÁNDEZ ME. 2021. Narrow vessels cavitate first during a simulated drought in Eucalyptus camaldulensis. *Physiologia Plantarum*, 1-10, doi.org/10.1111/ppl.13556
- BAROTTO AJ, FERNÁNDEZ ME, GYENGE JE, MARTÍNEZ MEIER A, MEYRA A, MONTEOLIVA S. 2016. First insights into the functional role of vasicentric tracheids and parenchyma in Eucalyptus species with solitary vessels: Do they contribute to xylem efficiency or safety? *Tree Physiology* 36 (12): 1485 – 1497.
- BAROTTO, AJ, MONTEOLIVA S., GYENGE J, MARTÍNEZ MEIER A, FERNÁNDEZ ME. 2018. Functional relationships between wood structure and vulnerability to xylem cavitation in races of Eucalyptus globulus differing in wood density. *Tree Physiol*, 38: 243-251. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx138>.
- BULFE N, FERNÁNDEZ ME. 2016. Morpho-physiological response to drought of progenies of Pinus taeda L. contrasting in mean growth rate, *New Forests* 47: 431-451 (DOI: 10.1007/s11056-016-9524-x)
- CARNEGIE AJ, KATHURIA A, NAGEL M et al. 2022. Current and future risks of drought-induced mortality in Pinus radiata plantations in New South Wales, Australia. *Aust for* 85:161–177. <https://doi.org/10.1080/00049158.2022.2145722>
- CASTAGNERI, D., VACCHIANO, G., HACKET-PAIN, A., DEROSE, R., KLEIN, T., BOTTERO, A. 2022. Meta-analysis reveals different competition effects on tree growth resistance and resilience to drought. *Ecosystems* 25, 30–43.
- FAO. 2019. Climate-smart agriculture and the Sustainable Development Goals. Mapping interlinkages, synergies and trade-offs and guidelines for integrated implementation. Rome. 144 pp. www.fao.org/3/ca6043en/CA6043EN.pdf.
- FERNÁNDEZ ME, BAROTTO AJ, MARTÍNEZ MEIER A, GYENGE JE, TESÓN N, QUIÑONES MARTORELLO AS, MERLO E, DALLA SALDA G, ROZENBERG P AND MONTEOLIVA S. 2019. New insights into wood anatomy and function relationships: how Eucalyptus challenges what we already know. *Forest Ecology and Management*, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117638>.
- GATICA G, GYENGE J, FERNÁNDEZ ME. 2023. Detección De Niveles De mortalidad en plantaciones forestales



- del NE argentino usando una combinación de índices espectrales satelitales. In: Peri et al (eds) Actas Del VIII Congreso Forestal Latinoamericano Y V Congreso Forestal Argentino. CONFLAT, Mendoza, pp 27–30
- GATICA MG; GYENGE J; BULFE NMK; PAHR N; DALLA TEA F; FERNÁNDEZ ME. 2024. Unprecedented mortality induced by extreme hot-drought in mature planted *Pinus* spp stands is locally modulated by soil characteristics. *New Forests*, <https://doi.org/10.1007/s11056-024-10037-x>
- GIANA FE, A MARTÍNEZ-MEIER, CA MASTRANDREA, MA GARCÍA, FJ CANIZA, SE MONTEOLIVA, JE GYENGE, ME FERNÁNDEZ. 2023. Intensity and number of thinning operations affect the response of *Eucalyptus grandis* to water availability and extreme drought events. *For Ecol Manage*, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120635>.
- GLEASON, S.M., WESTOBY, M., JANSEN, S., CHOAT, B., HACKE, U.G., et al. 2016. Weak trade-off between xylem safety and xylem-specific hydraulic efficiency across the world's woody plant species. *New Phytol.* 209, 123–136.
- HAMMOND WM, WILLIAMS AP, ABATZOGLOU JT et al. 2022. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nat Commun* 13:1761. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2>
- Hartmann, H. et al. Research frontiers for improving our understanding of drought-induced tree and forest mortality. *N. Phytol.* 218, 15–28 (2018).
- IPCC, 2023: Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- GÁNDARA J., M. NIÓN, J. GONZÁLEZ-TÁLICE, S. ROSS, J. VILLAR, M.E. FERNÁNDEZ. Similar but unique: variable relationships between physiological response to drought and growth across pure and interspecific hybrids of *Eucalyptus*. Trabajo en revisión en una revista científica; expuesto en el congreso IUFRO, Uruguay 2014.
- KANNENBERG SA, DRISCOLL AW, MALESKY D, ANDEREGG WRL. 2021. Rapid and surprising dieback of Utah juniper in the southwestern USA due to acute drought stress. *For Ecol Manag* 480:118639. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118639>
- PASCUAL A, TUPINAMBÁ-SIMÕES F, GUERRA-HERNÁNDEZ J, BRAVO F. 2022. High-resolution planet satellite imagery and multi-temporal surveys to predict risk of tree mortality in tropical eucalypt forestry. *J Environ Manage* 310:114804. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114804>
- PETERS J.M.R., R. LÓPEZ, M. NOLF, L.B. HUTLEY, T. WARDLAW, L.A. CERNUSAK, B. CHOAT. 2021. Living on the edge: A continental-scale assessment of forest vulnerability to drought. *Glob Change Biol.* 27:3620–3641, DOI: 10.1111/gcb.15641
- PREISLER, Y., TATARINOV, F., GRÜNZWEIG, J. M., & YAKIR, D. 2020. Seeking the “point of no return” in the sequence of events leading to mortality of mature trees. *Plant, Cell & Environment*. <https://doi.org/10.1111/pce.13942>
- SAGyP y otros. 2022. Análisis climático y productivo en relación a la mortalidad de *Pinus taeda* en la provincia de corrientes. Informe Técnico elaborado por miembros de la Secretaría De Agricultura, Ganadería Y Pesca (Ministerio De Economía De Argentina), INTA-CONICET y Secretaría de Desarrollo Foresto-industria de la provincia de Corrientes, Corrientes, Argentina, 51 pp.