

CUADRO 4

Modelado de distribuciones futuras del *Nothofagus pumilio* en un contexto de cambio climático

Carolina Soliani; Paula Marchelli.

Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias Bariloche (IFAB), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

(fig. 12.11) se desprende claramente que las condiciones para el crecimiento de la especie serán desfavorables en el futuro para toda la región estudiada. En particular, se observa que la mayor influencia negativa del clima se manifiesta en un gradiente de sur-oeste a noreste, con la excepción de sitios elevados, en donde aún se conservaran mejores condiciones de crecimiento. El ciprés de la cordillera tiene cierta tolerancia a la falta de precipitaciones, por lo cual compite exitosamente en los sitios cercanos a la estepa, de manera que es posible se adapte a las condiciones futuras de precipitación. En cambio, es probable que el incremento de la temperatura lo afecte en mayor medida, probablemente relacionada con el incremento de la evapotranspiración, en particular en los lugares donde la profundidad y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo sean bajos.

La utilización conjunta de los umbrales de crecimiento y el mapa de aridez comprende una valiosa herramienta para definir sitios prioritarios y/o favorables para la instalación de futuras forestaciones de ciprés de la cordillera, a fin de optimizar su crecimiento en relación a los cambios futuros del clima y las diferentes áreas donde la especie se distribuye naturalmente. Asimismo, esta información podrá ser utilizada para evaluar y priorizar forestaciones con fines de restauración o restitución de la especie en ambientes degradados o recientemente incendiados. Si bien los mapas elaborados ayudaran en la gestión forestal de esta especie, también podrán servir como guía para otras especies que se utilicen en forestaciones del norte de la Patagonia.

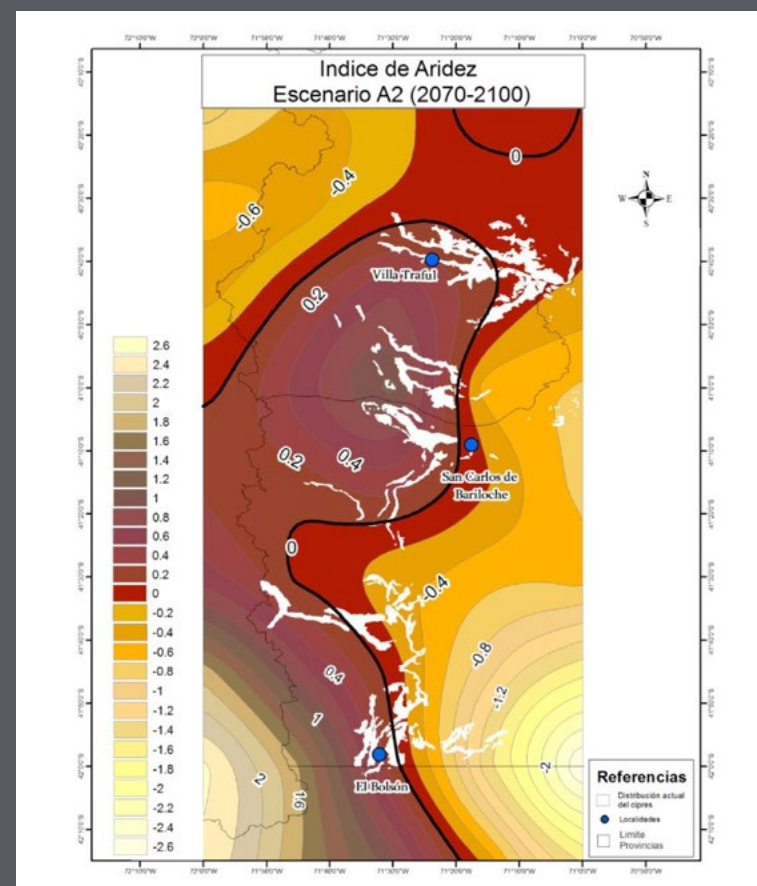


Figura 12.11. Mapa del índice de aridez anual pronosticado en base a las simulaciones provenientes de la regionalización del modelo PRECIS para el escenario A2 y el período 2070-2100. La línea negra en el mapa de la línea base marca el índice de 0 por debajo del cual las condiciones de aridez resultan en una disminución del crecimiento del ciprés de la cordillera.

A nivel global, las predicciones asociadas a los cambios climáticos previstos para el futuro consideran que la distribución natural de las especies forestales y la estructura de los bosques se verán afectadas (p. ej. Allen *et al.*, 2010). En la Patagonia, los registros climáticos del último siglo indicaron un aumento en la temperatura media anual (Villalba *et al.*, 2005), una disminución en la precipitación media anual, así como la recesión de los glaciares (Masiokas *et al.*, 2008). Las proyecciones a futuro son consistentes con estos patrones, lo que podría conducir a una mayor aridización de la región, así como una mayor frecuencia de eventos climáticos extremos que afectarían de modo generalizado la actual distribución y crecimiento de las plantas (p. ej. Villalba *et al.*, 2012). Para evaluar el posible impacto del cambio climático sobre la distribución de cuatro especies de *Nothofagus* sudamericanos se realizó una modelización de la distribución a futuro en función del nicho ecológico específico (Marchelli *et al.*, 2017). Las proyecciones de idoneidad de las especies bajo condiciones futuras permiten identificar áreas vulnerables en la distribución actual, o sea con probabilidad de pérdida de la especie, como áreas que actualmente no son idóneas pero que en el futuro podrían serlo. Se consideraron 31 modelos de clima a futuro para el período 2040-2069 desarrollados según el escenario RPC4.5 (Representative Concentration Pathways) obtenidos del CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) (Ramírez Villegas y Jarvis, 2010). La utilización de mapas de vegetación para expresar gráficamente las

predicciones asociadas al cambio, permite visualizar detalladamente la adecuación biológica de las especies al clima futuro. Por otra parte, combinar esta información con la distribución de la diversidad genética actual hace posible la definición de una estrategia de conservación de las poblaciones más diversas, o con características genéticas únicas. Asimismo, la caracterización genética permitiría delinear otras estrategias (p. ej. enriquecimiento) para asistir a aquellas poblaciones que presenten algún grado de vulnerabilidad, pero respetando las zonas genéticas definidas (Azpilicueta *et al.*, 2016; Soliani *et al.*, 2017). En este apartado presentamos el mapa de idoneidad futura y los valores de diversidad genética poblacional para la especie *Nothofagus pumilio* (Poepp. y Endl.) Krasser (lenga). En la tabla 12.2 se presentan las poblaciones evaluadas con marcadores moleculares, que representan la distribución de la especie en Argentina. Se consideró como medida de diversidad genética a la riqueza alélica, aplicando el método de rarefacción en base al menor tamaño muestral para su cálculo, el cual evita el sesgo generado por distintos tamaños muestrales (El Mousadik y Petit, 1996; Petit *et al.*, 1998). Para incorporar la variación de marcadores de ADN de cloroplastos y de microsátelites nucleares en la ecuación, se utilizó la riqueza alélica estandarizada poblacional o DGE (Marchelli *et al.*, 2017).

$$R_{gstj} = (R_{gSSRj} / \bar{R}_{gSSR}) + 2 * (R_{gcpj} / \bar{R}_{gcpj})$$

donde SSR representa la riqueza alélica para microsátelites nucleares y cp representa la riqueza de haplotipos del cloroplasto.

El ensamblado final donde se proyecta la idoneidad de la especie a futuro se estimó en base a 11 algoritmos de modelado diferentes, por ejemplo, maximum entropy (MAXENT), boosted regression trees (BRT), random forests (RF), entre otros. En el mapa (fig. 12.12) se muestran las áreas predichas idóneas (tonos verdes) según, por lo menos la mitad (15 o más) de los 31 modelos utilizados, y en cada área se indica el número de modelos que predicen su idoneidad. Las áreas que se prevé a futuro perderán idoneidad, según más de la mitad de los modelos, se muestran en rojo. No se encontraron áreas, correspondientes a la actual distribución, donde la totalidad de los modelos predigan idoneidad (máximo de 30 en la especie estudiada). Los resultados sugieren un desplazamiento de la idoneidad hacia el extremo altitudinal superior y hacia el extremo latitudinal más austral de la distribución actual de la lenga. Las áreas donde se espera una mayor pérdida de idoneidad se encuentran hacia el borde árido de la distribución actual, coincidentemente con la estepa patagónica, y hacia el norte de Neuquén. La diversidad genética expresada como DGE resultó más alta en Quilánlahue (40°08' S, 71°29' O) y Tierra del Fuego (54°22' S, 67°16' O) respecto del resto de las poblaciones analizadas. Los niveles de diversidad se muestran asociados a una gama de colores (tabla 12.1), donde la tonalidad oscura corresponde al valor más alto y la clara al valor más bajo, con una tendencia de disminución de la diversidad de norte a sur. Cabe considerar que aquí se incorporó la información de divisibilidad de los bosques en zonas genéticas, propuesta para la especie en Argentina (Soliani *et al.*, 2017).

Zonificación genética propuesta en base a los marcadores moleculares empleados, considerando la topografía y la distribución de las

masas boscosas para la especie (modificado de Soliani *et al.*, 2017).

Por los múltiples bienes y servicios que brindan los bosques, resulta imprescindible la conservación de su biodiversidad, tanto la diversidad de especies como la diversidad genética. Esta es la base sobre la cual operarán presiones selectivas generadas por cambios en el clima (a futuro), interacciones con otros organismos del ecosistema, o presiones antrópicas. Conservar esta diversidad es una forma de asegurar la potencialidad de las poblaciones de responder positivamente a disturbios externos, algunos de los cuales pueden resultar de extrema peligrosidad. En algunas especies de los Bosques Andino Patagónicos contamos con una herramienta operativa muy útil para resguardar la diversidad y estructura genética original de los bosques, como es la definición de zonas genéticas. Dentro de ellas la transferencia de semillas prevé un riesgo mínimo de contaminación genética (McKay *et al.*, 2005). Además, la generación de modelos de idoneidad futura complementa esta información y permite definir acciones concretas en el marco de programas de restauración o reforestación, por ejemplo priorizando la conservación in situ en áreas estables y la conservación ex situ para áreas vulnerables. Por último, es necesario precisar que se deben tomar ciertos recaudos en la interpretación de la distribución predicha en el marco de los modelos de nicho ecológico, ya que éstos poseen algunas limitaciones; por ejemplo, la clave para comprender el aumento/disminución en el rango de distribución (en referencia a escenarios futuros), podría residir en la tasa de cambio de los hábitats disponibles para una especie y no en su configuración espacial. Por otra parte, dado que los modelos se centran en el componente espacial

de los cambios de distribución y no consideran los cambios demográficos asociados, se correría el riesgo de sobre o subestimar la potencialidad biológica real de la especie (Alvarado Serrano y Knowles, 2013). De todos modos, estos modelos

constituyen una herramienta válida para realizar predicciones y complementar otras fuentes de información para, en conjunto, proponer estrategias de conservación y manejo de los recursos.

Tabla 12. 2. Diversidad genética estandarizada (DGE) para marcadores microsatélites nucleares y de ADN de cloroplasto a nivel poblacional en *Nothofagus pumilio*.

Zona Genética	Rango latitudinal	Población	DGE
NORTE	36°41' - 38°53'	Lag. Epulauquen	3,2
		Caviahue	3,3
		Tromen	3,5
CENTRAL	38°54' - 42°26'	Quilánlahue	5,6
		Valle del Challhuaco	3,3
		Huemules	2,9
ESQUEL	42°28' - 43°09'	La Hoya	2,7
		C° Nahuelpan	3,1
		Trevelín	2,8
VINTTER	43°10' - 44°13'	Lago Guacho	2,9
		José San Martín	3,1
		Lago Fontana	2,8
ALTO RIO SENGUER	44°15' - 45°51'	Río Unión	3,2
		Arroyo Perdido	2,0
SUR	51°06' - 51°59'	Cancha Carrera	3,3
		Mina I	0,9
		Norte	1,0
TIERRA DEL FUEGO	54°01' - 54°50'	Centro	5,1
		Este	2,7

CUADRO 5

Cambio climático pasado y escenarios futuros en las Yungas

Gonzalo Torres¹; Liliána Lupo¹; Pamela Fierro¹; Elizabeth Pereira¹; Flavio Speranza²; Silvia Pacheco³; Lucio Malizia³; Natalia Politi¹.

¹Instituto de Ecorregiones Andinas, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Jujuy, Argentina. ²Estación Experimental de Cultivos Tropicales Yuto, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina. ³Fundación ProYungas, Argentina.

La variabilidad climática puede afectar dramáticamente las características de la estructura y dinámica de los bosques y producir una expansión o retracción del área de distribución de distintas especies de las comunidades de los bosques. Comprender la dinámica de la vegetación en el pasado en función de los cambios climáticos ayuda a entender el presente y elaborar estrategias de manejo para el futuro. Las reconstrucciones paleoclimáticas en las Yungas han permitido establecer que en tiempos pasados la vegetación ha respondido sensiblemente a la variabilidad climática. Estas reconstrucciones paleoclimáticas se realizaron sobre archivos sedimentarios de lagunas, turberas y perfiles aluviales que contienen polen fósil (figura 12.13 d) del Cuaternario Tardío en los Andes del noroeste argentino, la mayoría de ellos ubicados en sectores a más de 3200 m s.n.m. Las secuencias más antiguas abarcan los periodos preúltimo máximo glacial (hace 29.000 años atrás) en las serranías de Aparzo, provincia de Jujuy y el tardiglacial (hace 18.000 años atrás) en la serranía de Santa Victoria, provincia de Salta. En estas secuencias, se observaron elevados contenidos de polen de *Juglans australis*, *Alnus acuminata* y *Podocarpus parlatorei*, transportados por el viento (Torres *et al.*, 2016). En el registro fósil del Holoceno (en los últimos 10.000 años) de la cuenca del río Yavi en la provincia de Jujuy (Lupo *et al.*, 2016), en Abra del Infiernillo y Tafí del Valle en la provincia de Tucumán (Lupo, 1990; Garralla, 2003, Grill *et al.*, 2013), y en el valle el Bolsón en la provincia de Catamarca (Kulemeyer *et al.*, 2013), se documentaron secuencias con

aumento de polen arbóreo asociado a episodios húmedos como respuesta a la intensificación de vientos del este. En contraste, en la cuenca del río Perico, los aumentos o disminuciones de polen arbóreo se vincularon a condiciones de inviernos secos o húmedos (con mayor frecuencia de neblina), respectivamente (Torres 2017). Para el Antropoceno (a partir del siglo XX), en las Lagunas de Yala, provincia de Jujuy (fig. 12.13a), existen registros que señalan aumentos de lluvias y polución con plomo (Pb) a partir de 1960 (Lupo *et al.*, 2006). En la Laguna Seca (cerca a la localidad de Tartagal), provincia de Salta (fig. 12.13b), se observa después del año 1984 una intensificación de procesos de remoción en masa por aumentos de lluvias (Fierro *et al.*, 2016).

Las evidencias de los datos climáticos históricos y dendrocronológicos (Villalba, 1995; Villalba *et al.*, 1998) muestran que las Yungas responden sensiblemente a la variabilidad climática. Modelos climáticos para el último máximo glacial (hace aproximadamente 21.000 años atrás) indican cambios importantes en la distribución de *Podocarpus parlatorei*, una especie de árbol del bosque montano, con una distribución mucho más extensa y continua durante este período de enfriamiento ambiental (Quiroga *et al.*, 2012). Luego, frente a los escenarios de calentamiento posteriores al último máximo glacial, la distribución se contrajo en áreas relativamente estables pero cada vez más fragmentadas (Quiroga *et al.*, 2012).

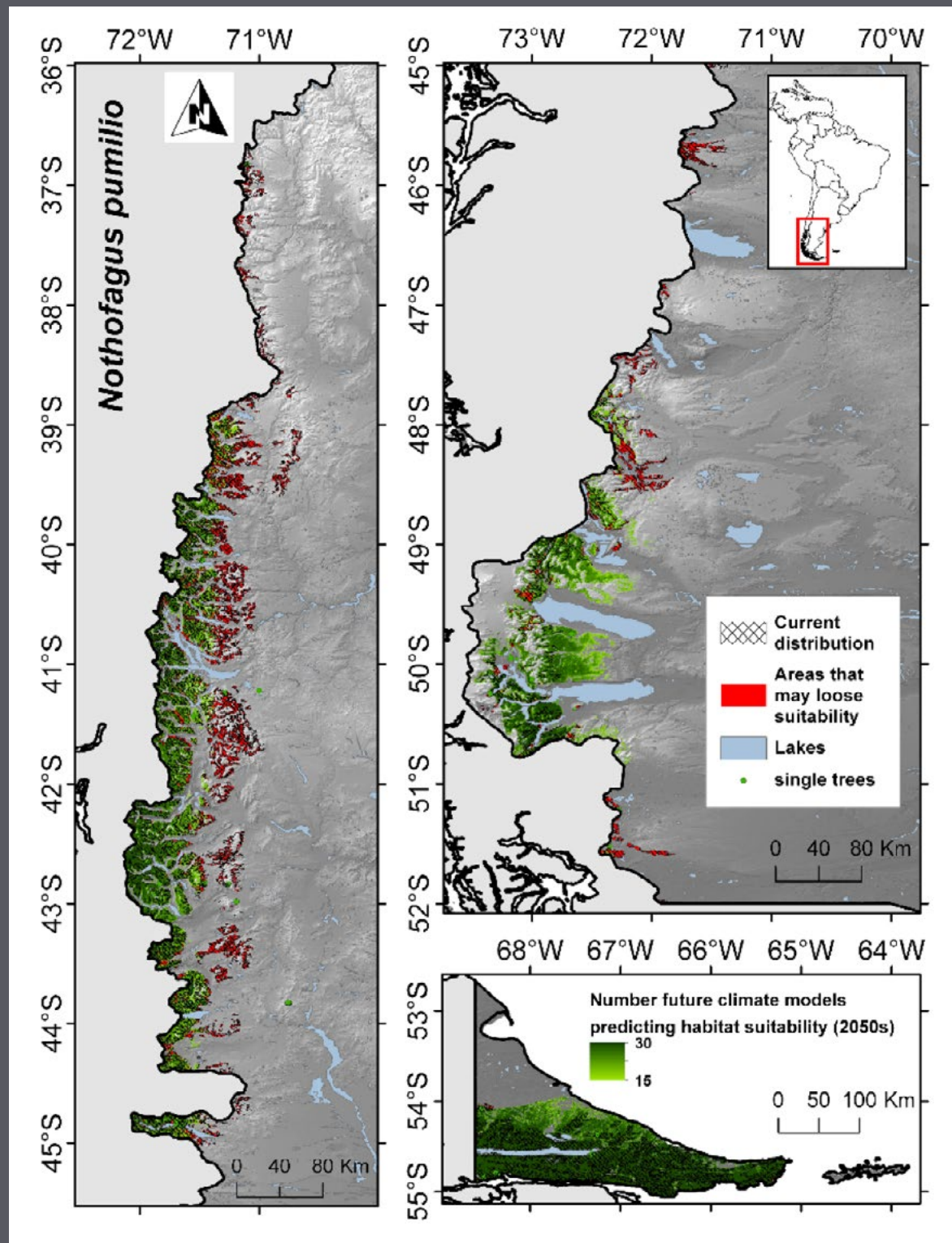


Figura 12.12. Mapas de modelado de nicho ecológico en un escenario de cambio climático predicho para el período 2040-2069 para la lenga (modificado de Soliani *et al.*, 2017).