

Corredores biológicos en el cono sur bajo el contexto de cambio climático utilizando modelación basada en agentes

Derek Corcoran

2016-08-03

Formulación de la Propuesta

Introducción

Uno de los principales objetivos de la ecología es el entender la distribución de los organismos (Elton 1927) lo que se define como los límites geográficos de su presencia, y donde es generalmente reconocido que la extensión del rango de una especie es proporcional a la amplitud de su nicho (Gaston 2003; Peterson et al. 2011).

Las variables que determinan y limitan de la distribución de una especie pueden ser tanto bióticos (incapacidad de reproducirse o sobrevivir en ciertas condiciones) o bióticos (influenciado por depredadores, parásitos y/o mutualistas) (Gaston 2009). A pesar de ser una característica básica de los organismos es extremadamente complejo de estudiar, en parte por ser un concepto dinámico ya que el rango de una especie puede cambiar por alteraciones en los factores que limitan el rango o debido a cambios evolutivos de la especie que modifican estos límites (Holt 2003; MacArthur 1972; MacArthur 1968). Dentro de los factores que más han modificado el rango de dispersión de especies se encuentran la sobreexplotación de los recursos naturales, el cambio climático global (Parmesan et al. 2013; Parmesan et al. 1999, Lenoir et al. (2008)), la fragmentación de hábitat (Bright 1993) y la introducción de especies (Mooney and Cleland 2001). Es por esto que se le atribuye al ser humano la responsabilidad de ser uno de los principales moduladores del rango de las especies (Vitousek 1994).

Una herramienta ampliamente utilizada para el estudio de los rangos geográficos de las especies es la modelación de distribución de especies (Hirzel and Le Lay 2008; Peterson et al. 2011; Soberón 2007). Esta metodología que fue desarrollada en 1984 (Gillison 1984), además de ser utilizada para generar distribuciones actuales, se ha ocupado para predecir las distribuciones potenciales de las especies producto del cambio climático bajo distintos escenarios propuestos para el futuro [Baker et al. (2000); maiorano_building_2013].

Bajo esta línea de estudio, el cambio climático y la fragmentación del hábitat se combinan formando una nueva problemática. Por efecto del cambio climático se predice que las especies cambien su área de distribución (Chen et al. 2011, Lenoir et al. (2008)), sin embargo es necesario que se dispersen hacia esta nueva área de distribución potencial que ha de ser modelada. Para evitar problemas de conservación de especies debido a que estas no puedan dispersarse a áreas óptimas futuras, se requiere de corredores biológicos (Nuñez et al. 2013; Rosenberg, Noon, and Meslow 1997). Debido a la presencia de hábitats fragmentados producto del proceso de urbanización, industrialización o cambios de uso de suelo, las especies no siempre podrán llegar a esta nueva área óptima. Esto podría incluso ser verse incrementado, ya que algunas actividades económicas tales como la agricultura, también deberán modificar su área de acción para acomodarse a estas nuevas condiciones climáticas y con esto utilizar nuevas áreas de distribución o corredores de estas especies (Hannah et al. 2013). Estos corredores conectarían áreas de distribución actual con áreas de distribución potencial futura, así como también permitirán el flujo genético entre poblaciones distantes, lo cual también debe ser modelado para considerar las necesidades de hábitat la especie, las variables que una especie puede soportar, la capacidad y tasa de dispersión, entre otros factores. La planificación y creación de estos corredores biológicos corresponden a medidas adaptativas frente a las variaciones ambientales ya que son acciones que reducen los impactos al cambio climático global (Hannah 2010).

Herramientas actuales de conservación: las áreas protegidas

El concepto de “área protegida” se define en Chile como un área definida geográficamente que ha sido designada o regulada y administrada con la finalidad de alcanzar objetivos específicos de conservación (Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile 1995). El Sistema Nacional de áreas Protegidas del Estado de Chile o SNASPE contempla 102 unidades de protección abarcando un total de 14.715.570 ha que representan un 19,3% de la superficie nacional (Ministerio Secretaría General de la Presidencia de Chile 1994). Dentro de estas áreas existen tres entidades administradas por el Estado a cargo de la Corporación Nacional Forestal, CONAF: 1) los Parques Nacionales que buscan protección y conservación de ambientes particulares, 2) las Reservas Nacionales que conservan en base a la utilización de recursos y 3) los Monumentos Naturales que intentan conservar objetos específicos o especies definidas en los cuales solo se puede realizar investigación científica o inspecciones gubernamentales (Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile 1967). Los Parques Nacionales abarcan una superficie nacional de 12,1%, las Reservas Nacionales 7,1% y los Monumentos Naturales solo un 0,04% (CONAF 2015).

A pesar de los intentos por conservar en el país, sólo tomando en cuenta condiciones actuales, se ha determinado que aproximadamente un 13% de las especies chilenas no se encuentran consideradas por las áreas protegidas de Chile [P. A. Marquet et al. (2004); *tognelli_how_2008*]. Junto con esto, las soluciones que se toman a nivel nacional pueden ser ineficientes comparativamente con soluciones a nivel regional [Levin et al. (2014); Mazar, Possingham, and Kark (2013); *mazar_large-scale_2014*], donde se ha encontrado ahorros de hasta un 66% en costos económicos para proteger la misma cantidad de recursos naturales si se hace de forma coordinada entre varias naciones que si se hace como nación individual (Mazar, Possingham, and Kark 2013).

Posibles soluciones a esta descoordinación de esfuerzos se han descrito en torno a la creación y mantención de áreas protegidas privadas (Pauchard and Villarroel 2002) y la necesidad de conectividad entre ellas de forma física o funcional para asegurar recursos que puedan sustentar poblaciones viables (Simonetti and Acosta 2002). Estas áreas podrían comprender parques privados de mayores extensiones para conservación, la acción de los dueños de tierras (Kamal and Grodzinska-Jurczak 2014), contemplando campos de cultivos e incluso jardines de casas (Gaston et al., 2005; Thompson et al., 2003), parques y hasta sitios abandonados (J.-P.L. Savard et al. / *Landscape and Urban Planning* 48 (2000) 131-142), (Gibson, 1998; Woodward et al., 2003). Estudios de biodiversidad urbana ya han demostrado que existe cierta conectividad entre estas áreas ya que por ejemplo en Inglaterra no se han observado diferencias en la abundancia y riqueza de especies de visitantes de flores entre ambientes urbanos, campos de cultivo y reservas naturales (Where is the UK's pollinator biodiversity? The importance of urban areas for flower-visiting insects. Katherine C. R. Baldock, Mark A. Goddard, Damien M. Hicks, William E. Kunin, Nadine Mitschunas, Lynne M. Osgathorpe, Simon G. Potts, Kirsty M. Robertson, Anna V. Scott, Graham N. Stone, Ian P. Vaughan, Jane Memmott *Proc. R. Soc. B* 2015 282 20142849; DOI: 10.1098/rspb.2014.2849. Published 11 February 2015).

Una posible planificación para el establecimiento de corredores biológicos debiera abarcar estos factores para solventar poblaciones viables

Existen numerosos ejemplos de estudios en los cuales se estudian los corredores potenciales de una o unas pocas especies (Alagador, Cerdeira, and Araújo 2016; Gregory et al. 2014 ; Cushman, Landguth, and Flather 2013), pero hay pocos casos que han trabajado con varias especies y en estos trabajos se ha realizado a una escala muy local (P Beier, Majka, and Bayless 2007). Recientemente se ha acuñado el término “enlace” para definir el consenso de los corredores biológicos de múltiples especies (Paul Beier, Majka, and Spencer 2008), lo cual permitiría planificar para la conservación de diversidad y no sólo de especies en particular.

Este proyecto propone considerar la modelación de distribución actual de especies, la distribución potencial de especies considerando escenarios de cambio climático (IPCC 2013) y la modelación basada en agentes (Valbuena et al. 2010), para determinar la posibilidad de dispersión de las especies desde la distribución actual y la potencial en el futuro. Se generarán estos modelos para Chile y para todos los países del cono sur, y se generarán consensos para ambos escenarios para determinar si los corredores resultantes son los mismos.

Objetivos

- Desarrollo de una metodología estadística robusta, y el desarrollo de un software libre en R que permita la aplicación de estos análisis en todos los casos necesarios.
- Probar las metodologías para 100 especies presentes en Chile.
- Analizar si dado el uso de suelo actual de Chile, es posible que las especies estudiadas utilicen sus nuevos rangos y si las rutas propuestas son posibles.

Métodos

Se generará una base de datos con la totalidad de especies de Fauna terrestre de Chile (No migratorias) esta base de datos tendrá las siguientes características:

- El área (kms cuadrados) de su rango de acuerdo a IUCN
- El centroe de su distribución
- La categoría de conservación de acuerdo a la IUCN como variable ordinal (En peligro crítico, En peligro (EN), Vulnerable (VU), Casi amenazada (NT), Preocupación menor (LC))
- Phylum de cada especie

Luego de generar esta base de datos se clasificaran las especies en cinco grupos usando agrupación de k-means. Posterior a eso se caracterizará cada grupo y se seleccionarán aleatoriamente X especies por cada grupo para ser modelada.

Se verificará si dado el uso de suelo actual de Chile, es posible que las especies estudiadas utilicen sus nuevos rangos y si las rutas propuestas son posibles.

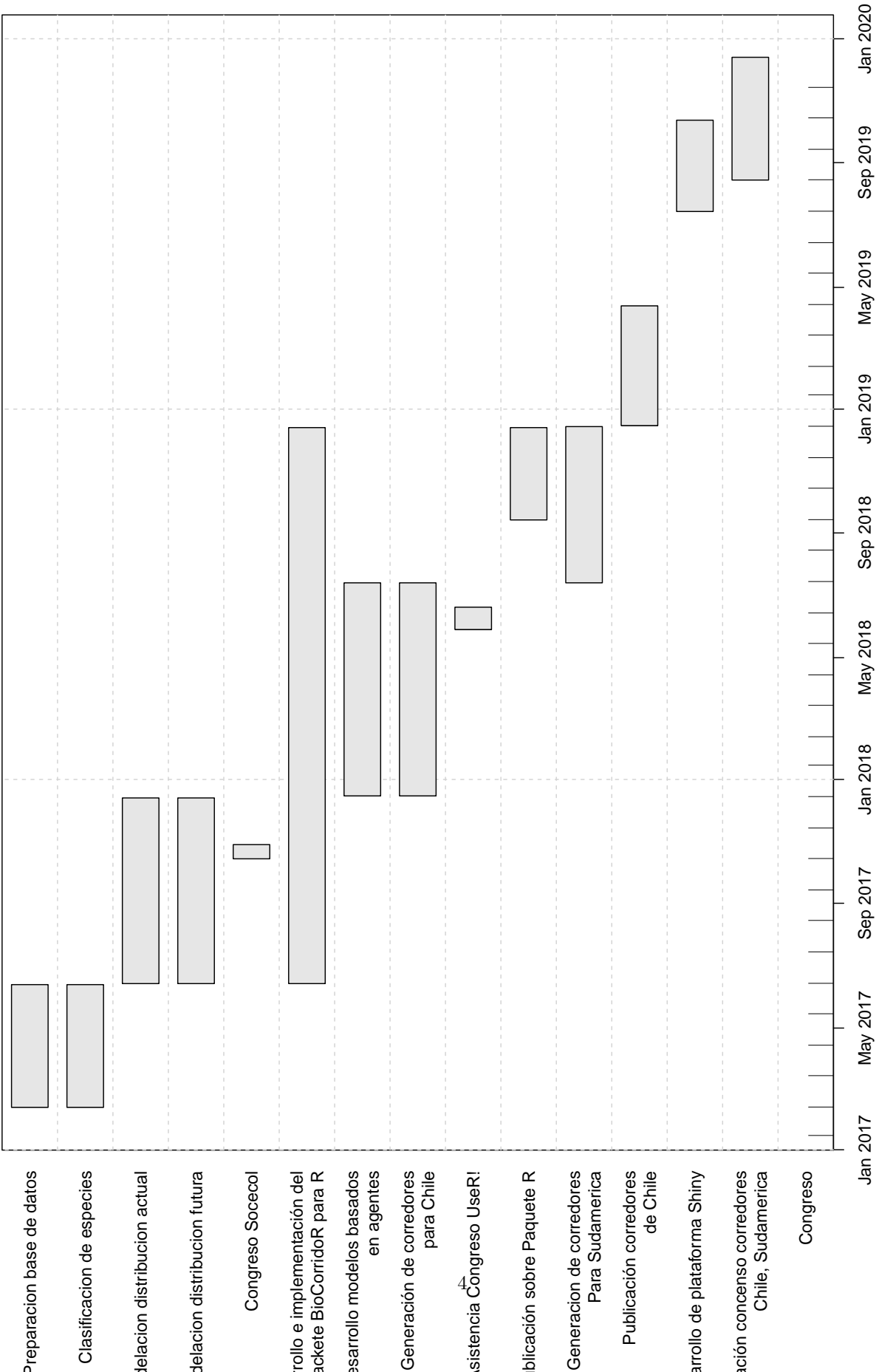
Pasos (Alagador, Cerdeira, and Araújo 2014):

- Crear índices de idoneidad de habitat
- Habilidad de dispersión de las especies
- Metas de representatividad de especies
- Costo y presupuesto
- Optimización

Connectivity Planning to Address Climate Change

In the past, species moved great distances relatively unimpeded in response to climatic change (Parmesan & Yohe 2003; Martinez-Meyer et al. 2004). Given the rate of projected future climate change, it is likely species will need to move farther in the 21st century (Schloss et al. 2012), and they may encounter substantial anthropogenic barriers that were not present in the past (Sanderson et al. 2002). Thus, maintaining connectivity—the degree to which a landscape facilitates the movement of organisms (Tischendorf & Fahrig 2000)—is the most frequently recommended strategy for conserving species diversity in a changing climate (Heller & Zavaleta 2009). However, traditional connectivity models are used to identify areas that facilitate species movements at one point in time between their current habitats and within their current distributions (Crooks & Sanjayan 2006; Hannah 2011). Thus, these models cannot identify areas that would allow species to track climate-driven range shifts of key attributes of their habitats. We focused instead on connectivity that enables species—and their component populations—to move among suitable areas and to newly suitable areas over time as climate changes (Hannah 2011)

Planificacion



Preparación base de datos:

Recolección de características y polígonos de distribución de todas las especies animales terrestres de Chile desde bases de datos digitales y extracción de características tales como área, centroide y estado de conservación entre otras.

Clasificación de especies:

Utilizando la base de datos previamente creada, se clasificará a las especies en cinco clusters para hacer un muestreo representativo de 20 especies dentro de cada uno de ellos, estas especies serán utilizadas para las modelaciones posteriores.

Modelación distribución actual:

Para cada una de las especies seleccionadas se generará un modelo de distribución de especies basado en presencias filtradas de la base de datos del GBIF (Flemons et al. 2007) y en características climáticas extraídas de Worldclim (R. J. Hijmans et al. 2005)

Modelación distribución futura:

Para cada una de las especies se proyectarán los modelos generados a condiciones futuras para determinar su distribución de acuerdo a los modelos de la IPCC

Congreso Socecol:

Se presentarán los resultados de las modelaciones presentes y futuras en el congreso binacional de ecología

Desarrollo modelos basados en agentes:

Utilizando el programa Netlogo (Sklar 2007), se generarán modelos basados en agentes para simular el desplazamiento de las especies desde sus rangos actuales a los predichos por los modelos de distribución de especies

Desarrollo e implementación del Paquete BioCorridoR para R:

Desarrollo de paquete para el entorno de R que tendrá funciones que permitirán generar análisis para cualquier grupo de especies deseado por usuarios para generar los mismos análisis generados por esta investigación.

Generación de corredores para Chile:

Generación de corredores para Chile tomando en cuenta las rutas de desplazamiento más utilizadas por las especies seleccionadas.

Asistencia Congreso UseR!:

Presentación de la primera versión del paquete BioCorridoR en el congreso más importante de la comunidad de desarrolladores de R.

Publicación sobre paquete BioCorridoR:

Se presentará el paquete BioCorridoR en el Journal of Statistical Software.

Generación de corredores para Sudamérica:

Se probará un nuevo escenario donde las especies analizadas podrán utilizar como parte del corredor países vecinos, se evaluará las diferencias de efectividad de planificación nacional contrastada con planificación regional (Sudamérica).

Publicación corredores de Chile:

Publicación de análisis de corredores biológicos concenso planificados para Chile.

Desarrollo de plataforma Shiny

Desarrollo de plataforma de Shiny Apps para ejemplificar e implementar uso interactivo de BioCorridoR

Publicación concenso corredores en Chile y Sudamerica

Publicación de análisis de corredores biológicos concenso para el Cono sur y su comparación con los generados para Chile

Trabajo Adelantado

Se han generado algoritmos para extraer poligonos de presencia de especies desde la pagina web de la IUCN, y a partir de ella extraer la información necesaria para la clasificación de especies, esto a sido testeado para los Mamíferos de Chile, posteriormente en base a esto se generó un nuevo algoritmo para extraer en base a esta tabla los puntos de presencia de estas especies para la GBIF.

Referencias

- Alagador, Diogo, Jorge Orestes Cerdeira, and Miguel Bastos Araújo. 2014. "Shifting Protected Areas: Scheduling Spatial Priorities Under Climate Change." *Journal of Applied Ecology* 51 (3): 703–13. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2664.12230/full>.
- . 2016. "Climate Change, Species Range Shifts and Dispersal Corridors: An Evaluation of Spatial Conservation Models." *Methods in Ecology and Evolution*. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/2041-210X.12524/pdf>.
- Baker, R. H. A., C. E. Sansford, C. H. Jarvis, R. J. C. Cannon, A. MacLeod, and K. F. A. Walters. 2000. "The Role of Climatic Mapping in Predicting the Potential Geographical Distribution of Non-Indigenous Pests Under Current and Future Climates." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 82 (1): 57–71. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880900002164>.
- Beier, P, D Majka, and T Bayless. 2007. "Linkage Designs for Arizona's Missing Linkages." *Arizona Game and Fish Department, Phoenix, Arizona, USA*.
- Beier, Paul, Daniel R Majka, and Wayne D Spencer. 2008. "Forks in the Road: Choices in Procedures for Designing Wildland Linkages." *Conservation Biology* 22 (4). Wiley Online Library: 836–51.

- Bright, P. W. 1993. "Habitat Fragmentation-Problems and Predictions for British Mammals." *Mammal Review* 23 (3-4): 101–11. doi:[10.1111/j.1365-2907.1993.tb00420.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.1993.tb00420.x).
- Chen, I.-Ching, Jane K. Hill, Ralf Ohlemüller, David B. Roy, and Chris D. Thomas. 2011. "Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming." *Science* 333 (6045): 1024–26. <http://science.sciencemag.org/content/333/6045/1024.short>.
- CONAF. 2015. "Gerencia de Areas Silvestres Protegidas Corporacion Nacional Forestal. 2015. Restauracion Ecologica En Areas Silvestres Protegidas Del Estado: Experiencias Y Desafios Que Contribuyen a La Conservacion de La Diversidad Biologica Del Pais."
- Cushman, Samuel A, Erin L Landguth, and Curtis H Flather. 2013. "Evaluating Population Connectivity for Species of Conservation Concern in the American Great Plains." *Biodiversity and Conservation* 22 (11). Springer: 2583–2605.
- Elton, Charles S. 1927. *Animal Ecology*. Chicago: University Of Chicago Press.
- Flemons, Paul, Robert Guralnick, Jonathan Krieger, Ajay Ranipeta, and David Neufeld. 2007. "A Web-Based GIS Tool for Exploring the World's Biodiversity: The Global Biodiversity Information Facility Mapping and Analysis Portal Application (GBIF-MAPA)." *Ecological Informatics* 2 (1). Elsevier: 49–60.
- Gaston, Kevin J. 2003. *The Structure and Dynamics of Geographic Ranges*. Oxford University Press on Demand. <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=zBqpX1ajLFMC&oi=fnd&pg=PA1&ots=zOz7ThfUea&sig=6AT4OdbRB5Fa0vGNNcw-OOvh9Xc>.
- . 2009. "Geographic Range Limits: Achieving Synthesis." *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 276 (1661): 1395–1406. <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/276/1661/1395.short>.
- Gillison, AN. 1984. "Gradient Oriented Sampling for Resource Surveys—the Gradsect Method." *Survey Methods for Nature Conservation* 2: 349–74.
- Gregory, Stephen D, Marc Ancrenaz, Barry W Brook, Benoit Goossens, Raymond Alfred, Laurentius N Ambu, and Damien A Fordham. 2014. "Forecasts of Habitat Suitability Improve Habitat Corridor Efficacy in Rapidly Changing Environments." *Diversity and Distributions* 20 (9). Wiley Online Library: 1044–57.
- Hannah, Lee. 2010. *Climate Change Biology*. 1st ed. Academic Press. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=B7A90DFA057B2E6FB7B2ACE43555CDAD>.
- Hannah, Lee, Patrick R Roehrdanz, Makihiro Ikegami, Anderson V Shepard, M Rebecca Shaw, Gary Tabor, Lu Zhi, Pablo A Marquet, and Robert J Hijmans. 2013. "Climate Change, Wine, and Conservation." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110 (17). National Acad Sciences: 6907–12.
- Hijmans, Robert J., Susan E. Cameron, Juan L. Parra, Peter G. Jones, and Andy Jarvis. 2005. "Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas." *International Journal of Climatology* 25 (15): 1965–78. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1276/full>.
- Hirzel, Alexandre H., and Gwenaëlle Le Lay. 2008. "Habitat Suitability Modelling and Niche Theory." *Journal of Applied Ecology* 45 (5): 1372–81. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2664.2008.01524.x/full>.
- Holt, Robert D. 2003. "On the Evolutionary Ecology of Species' Ranges." *Evolutionary Ecology Research* 5 (2): 159–78. <http://www.evolutionary-ecology.com/abstracts/v05/1143.html>.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Book. Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press. doi:[10.1017/CBO9781107415324](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324).
- Kamal, Sristi, and Malgorzata Grodzinska-Jurczak. 2014. "Should Conservation of Biodiversity Involve Private Land? AQ Methodological Study in Poland to Assess Stakeholders' Attitude." *Biodiversity and Conservation* 23 (11). Springer: 2689–2704.
- Lenoir, Jonathan, Jean-Claude Gégout, PA Marquet, P De Ruffray, and H Brisse. 2008. "A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century." *Science* 320 (5884). American Association for the Advancement of Science: 1768–71.

- Levin, Noam, Marta Coll, Simonetta Fraschetti, Gideon Gal, Sylvaine Giakoumi, Cordula Göke, Johanna Jacomina Heymans, et al. 2014. "Biodiversity Data Requirements for Systematic Conservation Planning in the Mediterranean Sea." *Marine Ecology Progress Series* 508: 261–81. <http://www.int-res.com/abstracts/meps/v508/p261-281>.
- MacArthur, Robert H. 1968. "The Theory of the Niche." *Population Biology and Evolution* 159: 176.
- . 1972. *Geographical Ecology: Patterns in the Distribution of Species*. Princeton University Press. https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=3NAYEKc--WAC&oi=fnd&pg=PR11&dq=geographical+ecology+macarthur&ots=Mr_P2UpIQY&sig=ZaqNVRvfsJ78GaeLRhZsVNzjSBY.
- Marquet, P. A., M. Tognelli, I. Barria, M. Escobar, C. Garin, and P. Soublette. 2004. "How Well Are Mediterranean Ecosystems Protected in Chile? Insights from Gaps in the Conservation of Chilean Vertebrates." In *Proceedings 10th MEDECOS Conference, Rhodes, Greece. Millpress, Rotterdam, the Netherlands*, 1–4. <http://personal.mendoza-conicet.gov.ar/mtognelli/marquetetal04-medecos.pdf>.
- Mazor, Tessa, Hugh P. Possingham, and Salit Kark. 2013. "Collaboration Among Countries in Marine Conservation Can Achieve Substantial Efficiencies." *Diversity and Distributions* 19 (11): 1380–93. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ddi.12095/full>.
- Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile. 1967. "Convención Para La Protección de La Flora, Fauna Y Las Bellezas Escénicas Naturales de América, Firmado En Washington El 12 de Octubre de 1940."
- . 1995. "Promulga Convenio Sobre La Diversidad Biológica, Adoptado El 5 de Junio de 1992 En Río de Janeiro, República Federativa de Brasil."
- Ministerio Secretaria General de la Presidencia de Chile. 1994. "Aprueba Ley Sobre Bases Generales Del Medio Ambiente."
- Mooney, Harold A., and Elsa E. Cleland. 2001. "The Evolutionary Impact of Invasive Species." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98 (10): 5446–51. <http://www.pnas.org/content/98/10/5446.short>.
- Núñez, Tristan A., Joshua J. Lawler, Brad H. Mcrae, DJOHN PIERCE, Meade B. Krosby, Darren M. Kavanagh, Peter H. Singleton, and Joshua J. Tewksbury. 2013. "Connectivity Planning to Address Climate Change." *Conservation Biology* 27 (2): 407–16. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/cobi.12014/full>.
- Parmesan, Camille, Michael T. Burrows, Carlos M. Duarte, Elvira S. Poloczanska, Anthony J. Richardson, David S. Schoeman, and Michael C. Singer. 2013. "Beyond Climate Change Attribution in Conservation and Ecological Research." *Ecology Letters* 16 (s1): 58–71. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ele.12098/full>.
- Parmesan, Camille, Nils Ryrholm, Constantí Stefanescu, Jane K. Hill, Chris D. Thomas, Henri Descimon, Brian Huntley, et al. 1999. "Poleward Shifts in Geographical Ranges of Butterfly Species Associated with Regional Warming." *Nature* 399 (6736): 579–83. doi:10.1038/21181.
- Pauchard, Anibal, and Pable Villarroel. 2002. "Protected Areas in Chile: History, Current Status, and Challenges." *Natural Areas Journal* 22 (4). Natural Areas Association: 318–30.
- Peterson, A. Townsend, Jorge Soberón, Richard G. Pearson, and Robert P. Anderson. 2011. *Ecological Niches and Geographic Distributions*. Princeton, N.J: Princeton University Press.
- Rosenberg, Daniel K., Barry R. Noon, and E. Charles Meslow. 1997. "Biological Corridors: Form, Function, and Efficacy." *BioScience* 47 (10): 677–87. <http://bioscience.oxfordjournals.org/content/47/10/677.full.pdf>.
- Simonetti, Javier, and Gerardo Acosta. 2002. "Conservando Biodiversidad En Tierras Privadas: El Ejemplo de Los Carnívoros." *Ambiente Y Desarrollo* 18 (1): 51–54.
- Sklar, Elizabeth. 2007. "Netlogo, a Multi-Agent Simulation Environment." *Artificial Life* 13 (3). MIT Press: 303–11.
- Soberón, Jorge. 2007. "Grinnellian and Eltonian Niches and Geographic Distributions of Species." *Ecology Letters* 10 (12): 1115–23. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1461-0248.2007.01107.x/full>.

Valbuena, Diego, Peter H. Verburg, Arnold K. Bregt, and Arend Ligtenberg. 2010. "An Agent-Based Approach to Model Land-Use Change at a Regional Scale." *Landscape Ecology* 25 (2): 185–99. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10980-009-9380-6>.

Vitousek, Peter M. 1994. "Beyond Global Warming: Ecology and Global Change." *Ecology* 75 (7): 1861–76.