



MATERIAL COMPLEMENTARIO

FRANKLIN & SWANSON (2010) Revista Chilena de Historia Natural 83: 185-194.

Estudios ecológicos de largo plazo en bosques de Estados Unidos: Lecciones claves para su aplicación en Chile y otras regiones

Long-term ecological research in the forests of the United States: Key lessons for its application in Chile and around the world

JERRY F. FRANKLIN¹ & MARK E. SWANSON^{2, *}¹ Box 352100, College of Forest Resources, University of Washington, Seattle, WA, 98195-2100² Box 646410, Department of Natural Resource Sciences, Washington State University, Pullman, WA 99164-6410

*Autor correspondiente: markswanson@wsu.edu

RESUMEN

La investigación ecológica de largo plazo es capaz de abordar ciertas preguntas de una manera mejor que los proyectos de corto plazo, debido a las escalas temporales en que funcionan muchos procesos ecológicos. En Norteamérica, este tipo de investigación ha brindado conocimiento sobre importantes procesos y organismos claves en muchos tipos forestales, extendiéndose desde los bosques caducifolios de la costa este a los bosques de coníferas en la costa oeste, y en latitudes tropicales hasta boreales. La investigación ecológica de largo plazo en los bosques de Norteamérica ha incluido estudios de cuencas, ensayos silviculturales, establecimiento de parcelas permanentes para investigar demografía forestal, y el estudio de regímenes de perturbación y sistemas predadores/presa. El inicio de investigación de largo plazo en ecosistemas forestales de otras regiones del mundo, especialmente en latitudes correspondientes a ambos lados del ecuador, ayudará a los científicos a comprender los regímenes de perturbaciones naturales y sucesión, así como los efectos de varias estrategias del manejo forestal, y los impactos de cambio climático. Recomendaciones claves basadas en la experiencia de Norteamérica incluyen: 1) la importancia de la investigación multidisciplinaria, 2) la necesidad de invertir recursos en el manejo de bases de datos, 3) la aplicación tanto de tecnología básica como avanzada (por ejemplo, sistemas de detección de 'eddy covariance' para cuantificar el intercambio de carbono entre los bosques y la atmósfera), y 4) colaboración entre regiones, instituciones, y científicos individuales.

Palabras clave: cuencas hidrológicas, demografía, investigación ecológica del largo plazo, multidisciplinario, vida silvestre.

ABSTRACT

Long-term ecological research addresses questions to which short-term research projects cannot effectively respond because of the temporal scales over which many ecosystem processes operate. In North America, this type of research has yielded important information on key processes and organisms in many forest types, from eastern broadleaf forests to the coniferous forests of the west, and from tropical to boreal latitudes. Long-term ecological research (that conducted at the decade scale or longer) in the forests of North America has included watershed studies, silvicultural trials, establishment of permanent plots to assess forest demographics, and the study of disturbance regimes and predator-prey systems. Instituting such research in forest ecosystems of other regions of the world, especially at corresponding latitudes on either side of the equator, will help scientists understand patterns of natural disturbance and succession, the effects of alternative management strategies, and the impacts of climate change. Key recommendations based on North American long-term ecological research include: 1) the importance of multidisciplinary research, 2) the need to invest in data storage and management, 3) the deployment of both basic and advanced technology (e.g., eddy covariance systems), and 4) development of collaboration networks among regions, institutions, and individual researchers.

Key words: demographics, long-term ecological research, multidisciplinary, watersheds, wildlife.

INTRODUCCIÓN

La ecología como ciencia ha experimentado grandes avances en la última mitad del siglo XX. Los viejos

paradigmas ecológicos fueron modificados o desechados y otros nuevos fueron creados con el objetivo de ser más aplicables para la desalentadora tarea de conservar y manejar ecosistemas con múltiples valores.

Un acontecimiento fundamental en la comprensión e investigación de la ecología fue la constatación de que ningún proceso ecológico puede ser plenamente entendido bajo una escala espacial o temporal simple (Levin 1992). Las nuevas tecnologías, como la teledetección, han ayudado a solucionar problemas asociados con estudios ecológicos a grandes escalas espaciales, sin embargo, enfrentar largas escalas temporales continúa siendo un desafío. Algunos procesos, especialmente en ecosistemas forestales de larga vida, solo pueden ser completamente entendidos sobre la base de investigaciones realizadas durante períodos de tiempo de una duración muy superior a la de los típicos períodos de la mayoría de los proyectos de investigación. Los estudios ecológicos a largo plazo llegaron a ocupar un nicho importante en la ecología forestal de América del Norte, dándole respuesta a muchas preguntas y fomentando nuevas líneas de investigación (Franklin 1989, 2005). En este trabajo se presentan ejemplos de estudios ecológicos a largo plazo en ecosistemas forestales de América del Norte (Tabla 1) junto a una breve discusión sobre la importancia de este tipo de investigación y como influye en la comprensión científica y la generación de políticas. Concluimos este trabajo con algunas recomendaciones para el desarrollo y la aplicación de este tipo de estudios en otras regiones del mundo.

EJEMPLOS ESPECÍFICOS DE INVESTIGACIÓN A LARGO PLAZO EN LOS BOSQUES DE ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Parcelas de muestreo permanente

Las parcelas permanentes condujeron a observaciones críticas en los procesos demográficos de las comunidades vegetales, especialmente en aquellas dominadas por árboles de gran longevidad. Muchas observaciones se han generado gracias a “cambiar espacio por tiempo” en la aplicación de métodos de cronosecuencia en ecosistemas forestales, pero existen inconvenientes con este método (Pickett 1989, Bakker et al. 1996). En los inicios del Servicio Forestal de Estados Unidos de América, los científicos reconocieron el valor de establecer parcelas de muestreo permanentes para observar el desarrollo de rodales naturales y manejados (Franklin et al. 1972). Por ejemplo, ya en 1910, científicos del Servicio Forestal como Leo A. Isaac y Thornton T. Munger establecieron parcelas de muestro permanentes en rodales naturales-regenerados de abeto de Douglas, también conocido como pino Oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) en el valle del Río Wind en el estado de Washington (Curtis et al. 2007). Muchas de estas parcelas existen actualmente, generando datos valiosos en el desarrollo de los rodales maduros. Por ejemplo,

Franklin & DeBell (1988) usaron datos de treinta y seis años de observación provenientes de parcelas del bosque experimental del Río Wind para estimar tasas de mortalidad y describir dinámicas sucesionales en bosques maduros de abeto de Douglas y tsuga occidental (*Tsuga heterophylla* [Raf.] Sarg.).

La posibilidad de cambios significativos en la demografía, estructura y composición de los bosques debido al cambio climático o a la introducción de enfermedades exóticas presenta otra convincente aplicación para los datos provenientes de parcelas de muestreo permanentes. La evaluación longitudinal de las parcelas permanentes a lo largo del este de Estados Unidos de América demostró que las tasas de mortalidad han aumentado en la segunda mitad del Siglo XX (van Mantgem et al. 2009). Los datos a largo plazo (1934-actualidad) provenientes de parcelas permanentes pertenecientes al Laboratorio Hidrológico Coweeta en Carolina del Norte permitieron a los investigadores evaluar desde los impactos de la tala y la pérdida del castaño americano (*Castanea dentata* (Marsh.) Borkh.), hasta el efecto de un hongo introducido en la diversidad y distribución de los árboles a escala de cuencas hidrográficas (Elliot & Swank 2008). En el Sitio de Estudios Ecológicos a Largo Plazo Bonanza Creek en Alaska, las investigaciones a largo plazo están documentando cómo el cambio climático podría influir en el desarrollo de los ecosistemas, en las reservas de carbono, y en diversos tipos de hábitats árticos y boreales (Turner et al. 2003, Chapin et al. 2006). Es difícil, sino imposible, lograr análisis en profundidad como estos, sin inversiones para el mantenimiento a largo plazo de las parcelas permanentes.

Ensayos silviculturales

Los efectos de las intervenciones silviculturales en la composición, estructura y función de los bosques incluyen impactos a corto y largo plazo, pero la mayoría de las respuestas recién son medibles luego de largos períodos de tiempo. Las mediciones a largo plazo de los bosques no son una novedad para los profesionales del sector forestal europeo (Puettmann et al. 2009), y han jugado un papel clave en el desarrollo de las prácticas silvícolas en esta región. Con la llegada de las ciencias forestales como profesión y la silvicultura como un método aceptable para el manejo de la tierra en América del Norte, las observaciones a largo plazo de experimentos silviculturales han proporcionado información importante sobre la respuesta de los ecosistemas forestales a las diferentes prácticas. En la primera parte del siglo XX, varios tipos de corta selectiva fueron estudiados en muchas localidades como alternativas a la tala completa o al corte de árboles de alta calificación, prácticas asociadas al corte no reglamentado de madera (Seymour et al. 2006). Un excelente ejemplo es el establecimiento de ensayos silvícolas de una serie de diferentes métodos (incluidos controles) en los bosques de árboles de hoja ancha del norte de la Península de Michigan, en la zona central de

Estados Unidos de América (Eyre & Zillgitt 1993). Estos ensayos proporcionaron algunos de los primeros datos que apoyan el desarrollo de sistemas silviculturales de diferentes edades en América del Norte.

Incluso aquellas respuestas que involucran al sotobosque requieren años de monitoreo para comprenderlas plenamente, tales como la recuperación de las comunidades arbustivas luego de tratamientos para disminuir su densidad (Chan et al. 2006). Busse et al. (1996) encontraron que la respuesta de los rodales a la presencia de sotobosque va variando en el tiempo utilizando datos de un experimento a largo plazo sobre espaciamiento y remoción de sotobosque en pino ponderosa. Esto demuestra la importancia de las observaciones a largo plazo para determinar la evolución de los roles de los componentes funcionales de un bosque durante todo el proceso de sucesión.

Durante la última parte del Siglo XX, que estuvo caracterizada por una creciente preocupación en torno a la salud de los ecosistemas y la conservación de especies en peligro de extinción, los ensayos silviculturales presentaron un enfoque apuntado a la función de los ecosistemas naturales y su biodiversidad. Estos ensayos difieren de los realizados previamente en que en ellos se midieron nuevos conjuntos de variables de respuesta ecológica (como la respuesta de las briófitas o de los hongos micorrízicos), que ponen a prueba nuevos métodos silviculturales generados en respuesta a requerimientos ecológicos específicos (ver Peterson & Maguire 2005). Por ejemplo, el estudio Demostración de Opciones de Gestión de Ecosistemas (DEMO por su sigla en inglés), un ensayo a largo plazo rigurosamente diseñado, fue establecido en los principios de la década de 1990 para probar los efectos de diferentes niveles y patrones de retención variable sobre la biodiversidad y las funciones de los ecosistemas (Aubry et al. 2004).

Incendios prescritos y restauración de los regímenes de perturbación

El reconocimiento de que los seres humanos han alterado los regímenes naturales de perturbación en los ecosistemas forestales ha dado lugar a investigaciones a largo plazo sobre los efectos de restauración de los mismos en muchas partes de América del Norte. Por ejemplo, el personal de investigación de los Parques Nacionales Sequoia-Kings Canyon y Yosemite ha monitoreado el efecto de los incendios prescritos durante casi cuarenta años (Arno & Fiedler 2005, Parsons & van Wagendonk 1996). Este programa, originado en respuesta a un informe especial del Secretario del Interior para el manejo de los Parques Nacionales del oeste (Leopold et al. 1963, citados en Arno & Fiedler 2005), ha sido exitoso en reducir el material combustible que facilita la llegada del fuego hasta el dosel del bosque, restaurando las comunidades vegetales herbáceas/arbustivas del sotobosque, y estimulando la regeneración de la sequoia gigante (*Sequoiadendron giganteum* [Lindl.] Buchholz). Los procedimientos de monitoreo después de eventos

individuales de fuego fueron útiles para supervisar la recuperación de las comunidades vegetales y cuantificar los cambios en las características del material combustible.

El Bosque Experimental de Lubrecht en el oeste de Montana ofrece otro caso de estudio sobre la restauración de la funcionalidad de un sistema cuyos regímenes de perturbación han sido afectados por la actividad humana. Los rodales de este bosque, originalmente dominados por pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Douglas ex Lawson et C. Lawson) ubicados muy espaciados entre sí, se han convertido en sitios más densos debido a la presencia del abeto de Douglas (especie tolerante a la sombra) a raíz de la exclusión a largo plazo de los incendios de baja intensidad. Varios tratamientos silviculturales fueron implementados para reducir la densidad del abeto de Douglas, seguidos de la reintroducción de quemas prescritas a un subconjunto de parcelas tratadas. Veinte años de monitoreo por parte de Stephen F. Arno y colegas han demostrado que la combinación de un tratamiento mecánico inicial seguido por la reanudación de incendios frecuentes es efectiva para aumentar el vigor en todas las clases de edad de pino ponderosa, para reducir drásticamente la densidad de abeto de Douglas, y para disminuir las tasas de mortalidad de los pinos por sequía, incendios de alta intensidad y ataques de insectos (Arno & Fiedler 2005).

Existen muchas otras regiones boscosas de los Estados Unidos de América donde se han realizado estudios a largo plazo sobre la restauración de los regímenes de fuego, incluyendo las sabanas de pino del sur (*Pinus palustris* F. Michaux [Kral 1993]) al sudeste del país (por ejemplo, El Centro de Investigación Ecológicas Jones, localizado en la Plantación Ichauway, en Georgia) y los bosques de pino de Arkansas (*Pinus echinata* Miller 1768) de las montañas Ozark en Missouri (Guldin 2004). En la mayoría de los sitios (si es que no en todos), las evidencias surgidas a partir de investigaciones a largo plazo sugieren que un fuego prescripto y planificado, a menudo combinado con un tratamiento mecánico, pueden restaurar la estructura y composición original de los bosques previa a la supresión de los fuegos.

Estudios de cuencas hidrográficas

Algunos de los primeros esfuerzos de investigación a largo plazo en los Estados Unidos de América fueron desarrollados para entender los procesos que ocurren en las cuencas hidrográficas, especialmente la influencia del corte de madera y otras prácticas de manejo de la tierra en el rendimiento y la calidad del agua. El sitio de Estudios Ecológicos a Largo Plazo (LTER por su sigla en inglés) Hubbard Brook en New Hampshire es uno de los ejemplos más conocidos de estudios a largo plazo de cuencas hidrográficas. Hubbard Brook ha generado numerosas respuestas respecto al impacto de las actividades de manejo forestal en la función del ecosistema incluyendo el papel clave que juega la vegetación sobreviviente al corte de madera, en prevenir significantes pérdidas de nutrientes (Likens

2004). Además, esta investigación ha demostrado que la tasa a la cual la pérdida de nutrientes vuelve a los niveles previos al corte varía con cada nutriente en particular. El Laboratorio de Hidrología Coweeta en Carolina del Norte tiene una larga historia de estudios en cuencas hidrológicas con muchas conclusiones fundamentales. Uno de estos estudios involucró la conversión de cuencas hidrográficas cubiertas con un bosque mixto de árboles frondosos a una plantación de coníferas; como consecuencia de esta conversión se observó una reducción significativa del flujo de los ríos (Swank & Vose 1994).

Las cuencas hidrográficas integran los efectos provenientes de mucho más allá de los límites de las mismas cuencas, por lo tanto para comprender los comportamientos emergentes son necesarios largos períodos de observaciones. La pérdida neta de cationes básicos de una cuenca de agua como impacto de la lluvia ácida, y la recuperación posterior tras la reducción en la acidez de las precipitaciones, fue documentada por Likens et al. (1996) utilizando un conjunto de datos hidrológicos a largo plazo generados en Hubbard Brook.

En el Bosque Experimental H. J. Andrews en la zona central del estado de Oregon se demostraron diferentes impactos de las prácticas de manejo forestal a nivel de cuenca hidrográfica usando varios conjuntos de cuencas apareadas. Los resultados de estos estudios incluyen el descubrimiento de los efectos desproporcionados que tienen los caminos forestales en la hidrología y la estabilidad de la pendiente del terreno. Actualmente, continúan los estudios sobre hidrología, geomorfología y suelos en cuencas hidrológicas forestadas en el Bosque Experimental Andrews (Luoma 1999). Las observaciones realizadas en este sitio por un período de tiempo extenso incluyen eventos de grandes inundaciones, lo que lleva a enfatizar la importancia de las investigaciones a largo plazo para “capturar” eventos poco frecuentes que son una parte importantísima del rango natural de variabilidad.

Manejo de vida silvestre

Las investigaciones a largo plazo son menos comunes en el campo de la biología de fauna silvestre que en el manejo forestal, sin embargo tres ejemplos relevantes merecen ser mencionados debido a su importancia para el patrón espacial y estructura a largo plazo de los bosques. Los lobos (*Canis lupus* L.) y los alces (*Alces alces* L.) han coexistido en la Isla Royale en Michigan desde el invierno de 1948-1949, y sus interacciones y biología han sido estudiadas de manera continua desde 1958 (Wright 1996). Las bases de datos a largo plazo generadas por estos estudios han permitido a los investigadores abordar preguntas sobre la estabilidad de los sistemas depredador-presa, la importancia relativa del control ascendente y descendente en las poblaciones de herbívoros, y muchos otros fenómenos ecológicos. Este programa de investigación también ha atraído a otros investigadores a la Isla Royale, lo que ejemplifica como un programa de investigación a largo plazo puede facilitar esfuerzos de investigación

adicionales. La reintroducción de lobos en el Parque Nacional Yellowstone en los estados de Wyoming y Montana ofrece un segundo ejemplo. Esta investigación permitió a los investigadores documentar los efectos en cascada de la restauración de un depredador clave en un ecosistema intacto (e.g., Ripple & Beschta 2003). Por último, el Bosque Experimental Starkey en Oregon, establecido en la década de 1950, ha proporcionado datos valiosos sobre los efectos de los alces y la ganadería, la caza y las prácticas de manejo de la tierra sobre los recursos forestales y los pastizales (Lugo et al. 2006). Una contribución importante del Bosque Experimental Starkey es la inclusión de muchos estudios sobre necesidades e impactos humanos en relación con el ecosistema; muchos proyectos de investigación a largo plazo no se caracterizan por involucrar estudios directos de impactos sociales, sin embargo este componente social se ha ido incrementando en los proyectos LTER, subsidiados por la Fundación Nacional de Ciencia (NSF por su sigla en inglés) y además son componentes explícitos del Programa Red Nacional de Observación Ecológica (NEON por su sigla en inglés).

Estudios de perturbaciones naturales

Las perturbaciones naturales de gran intensidad son importantes fenómenos ecológicos que hacen que los patrones y tasas de recuperación ecológica sean tópicos de gran interés. El ciclo de erupción del monte Sta. Helena en el estado de Washington que comenzó en mayo de 1980 generó un área de gran tamaño (> 500 km²) afectada por un complejo de varios disturbios. Inicialmente los científicos hipotetizaron que la erupción iba a proveer una oportunidad para estudiar sucesión primaria; de hecho, una gran variedad de organismos sobrevivieron la erupción y contribuyeron a generar muchas vías de recuperación del sistema. El concepto de legado biológico surgió de los primeros estudios sobre la recuperación ecológica del monte Sta. Helena; el legado biológico está constituido por los propágulos y organismos vivos, la materia orgánica muerta (incluyendo grandes estructuras orgánicas como troncos de árboles muertos), y los patrones ecológicos derivados (como las propiedades del suelo) que sobrevivieron del ecosistema previo a una perturbación y participan en el desarrollo del ecosistema posterior a la misma (Franklin et al. 2000). Las parcelas de investigación permanentes en la zona afectada por el volcán han generado respuestas sobre los patrones espacio-temporales de la colonización vegetal (del Moral & Eckert 2005), la importancia de las tasas vegetales pioneras en la recuperación del ecosistema (del Moral & Rozzell 2005), la dinámica de los micromamíferos en los ambientes de sucesión primaria (Crisafulli et al. 2005), y muchos otros fenómenos relacionados con la resiliencia del ecosistema (Dale et al. 2005). Esta investigación también ha generado una mayor apreciación de la importancia de los estados de sucesión previos al bosque que ocurren durante el período entre la

INVESTIGACIÓN ECOLÓGICA DE LARGO PLAZO EN BOSQUES DE USA

TABLA 1

Ejemplos de los Sitios de Estudios a Largo Plazo en America del norte referidos en el texto en orden creciente de latitud.
Examples of long-term forest research sites in North America referred to in the text, in increasing order of latitude.

Sitio de investigación	Latitud/ Longitud	Tipo de bosque	Enfoques	Periodo de tiempo	Referencias
Sitio de Estudios Ecológicos a Largo Plazo Luquillo	18°19' N 65°49' O	Bosque tropical	Parcelas permanentes, estudios de sucesión y biogeoquímica	1890's - actualidad	Brown et al. 1983
Centro de investigación ecológica Joseph W. Jones	31°13' N 84°28' O	Bosque de pino del sur (coníferas subtropicales)	Tratamientos silviculturales experimentales, fuegos prescritos, investigaciones sobre el suelo	1950 - actualidad	Palik et al. 2003
Laboratorio de Hidrología Coweeta	35°03' N 83°25' O	Bosque decido oriental	Estudios hidrológicos, flujo de carbono, dinámicas de los bosques	1930's - actualidad	Elliott & Swank 2008, Swank & Vose 1994
Parque Nacional Sequoia-Kings Canyon	36°30' N 118°45' O	Bosque occidental de coníferas (mixto serrano)	Parcelas permanentes, fuegos prescritos	1970's - actualidad	Parsons & van Wagtendonk 1996
Parque Nacional Yosemite	37°45' N 119°35' O	Bosque occidental de coníferas (mixto serrano)	Parcelas permanentes, fuegos prescritos	1960's - actualidad	Arno & Fiedler 2005
Bosque Experimental Pringle Falls	43°44' N 121°36' O	Bosque occidental de coníferas (pino ponderosa)	Parcelas permanentes, tratamientos silviculturales experimentales, fuegos prescritos	1930's - actualidad	Busse et al. 1996
Bosque Experimental Hubbard Brook	43°56' N 71°45' O	Bosque decido oriental	Parcelas permanentes, estudios hidrológicos	1955 - actualidad	Likens 2004
DEMO	43-47° N 121.5-122.5° O	Bosque occidental de coníferas	Parcelas permanentes, tratamientos silviculturales experimentales	1997 - actualidad	Aubry et al. 2004
Bosque Experimental H.J. Andrews	44°13' N 122° 11' O	Bosque occidental de coníferas	Parcelas permanentes, tratamientos experimentales en cuencas hidrológicas, estudios hidrológicos/geomorfológicos	1940's - actualidad	Luoma 1999
Bosque Experimental Starkey	45°10' N 118°03' O	Estepa arbustiva, Bosque occidental de coníferas	Estudios de telemetría y distribución de fauna silvestre	1950's - actualidad	Stewart et al. 2002
Área Natural de investigación T.T. Munger	45°49' N 122°00' O	Bosque occidental de coníferas	Parcelas permanentes, tratamientos silviculturales experimentales, instalaciones para investigaciones Wind River Canopy Crane	1910 - actualidad	Franklin & Debell 1998, Franklin et al. 1972
Monumento Nacional Volcánico Mt. St. Helens	46°11' N 122°11' O	Bosque occidental de coníferas, subalpino	Parcelas permanentes, estudios de sucesión, estudios de fauna silvestre	1980 - actualidad	Dale et al. 2005
Bosque Experimental Dukes	46°21' N 87°10' O	Bosque decido oriental, cicuta del oeste	Parcelas permanentes, tratamientos silviculturales experimentales	1920's - actualidad	Eyre & Zillgitt 1953
Bosque Experimental Lubrecht	46°53' N 113°27' O	Bosque occidental de coníferas	Parcelas permanentes, tratamientos silviculturales experimentales, fuegos prescritos	1930's - actualidad	Arno & Fiedler 2005
Isla Royale	48°00' N 88°50' O	Bosque boreal de coníferas, bosque boreal de árboles de hojas anchas	Observación de fauna silvestre, dinámicas de poblaciones de mamíferos grandes	1958 - actualidad	Wright 1996
Estudio Ecológico a Largo Plazo Bonanza Creek	64°43' N 148°17' O	Bosque boreal	Parcelas permanentes, estudios de sucesión, disturbios y bioquímica	1960's - actualidad	Chapin et al. 2006

perturbación y el restablecimiento del dosel (es decir, la ocupación del terreno por un nuevo bosque). La flora de plantas vasculares y las comunidades en zonas afectadas por la perturbación pero que se recuperaron a través de procesos naturales, son claramente diferentes de aquellas que se desarrollaron en áreas regeneradas con plantaciones de coníferas previa remoción y utilización de los troncos caídos, práctica que fuera más común en la región (Titus & Householder 2007); los estudios a largo plazo en este campo tendrán consecuencias profundas para las políticas de gestión posteriores a una perturbación, aplicables tanto a perturbaciones naturales como antropogénicas. Por ejemplo, el concepto de legados biológicos ha conducido al desarrollo de sistemas de corte y regeneración con retención variable que salvaguardan muchos elementos de la diversidad biológica durante la tala de los árboles. Al igual que muchos programas de investigación a largo plazo, el trabajo en el monte Sta. Helena contó con buena financiación inicialmente (principalmente debido a la publicidad relacionada con la erupción en sí misma), pero ha ido sufriendo una reducción de recursos en las décadas posteriores al evento.

Otros estudios a largo plazo comparables con el del monte Sta. Helena se han llevado a cabo luego de otros disturbios de gran magnitud como los incendios en Yellowstone en 1988, varios huracanes en el Mar Caribe y grandes tormentas de viento. Consistentemente, los resultados muestran que después de estos eventos los ecosistemas rápidamente recuperan su capacidad funcional (principalmente como resultado de los legados biológicos), y que las actividades humanas, como quitar y utilizar los troncos de los árboles muertos, suelen interferir con el proceso natural de recuperación.

Áreas naturales de investigación

Particularmente en el noroeste del océano Pacífico, aquellos ecosistemas especiales o ejemplos particulares de condiciones sucesionales específicas han sido designados "áreas naturales de investigación" de las cuales se excluyeron otros usos del suelo, principalmente actividades extractivas (Franklin et al. 1972). Las parcelas de investigación a largo plazo en estas áreas han proporcionado datos valiosos sobre diferentes tipos de bosques, incluyendo bosques primarios (e.g., Área Natural de Investigación Cedar Flats en el estado de Washington); sitios de alta biomasa (e.g., los rodales de abeto noble en el Área Natural de Investigación Goat Marsh); y bosques en climax edáfico (e.g., humedales).

IMPACTOS SOBRE LAS POLÍTICAS DE GESTIÓN

Los estudios ecológicos a largo plazo han jugado un rol fundamental en determinar o confirmar políticas ambientales. La investigación en el Bosque Experimental Hubbard Brook ha tenido mucha influencia sobre distintas políticas, incluidas aquellas relacionadas con la lluvia ácida y la tala de árboles; otro

ejemplo es la investigación sobre el ingreso de plomo a través de la precipitación en Hubbard Brook, lo cual demuestra la eficacia de la regulación del contenido de plomo en el combustible (Likens 2004). La gran cantidad de estudios a largo plazo realizados en el Bosque Experimental H. J. Andrews, así como los estudios generados por inversiones a largo plazo en investigación en dicho lugar, jugaron un papel central en los cambios en la política forestal federal en el noroeste del océano pacífico (Lugo et al. 2006). El mayor cambio en los objetivos para el manejo de los bosques nacionales (desde producción de madera hasta la diversidad biológica y los procesos ecosistémicos) fue impulsado por la investigación a largo plazo en ecosistemas boscosos, incluyendo las interacciones bosques-ríos; el Plan Forestal del Noroeste para tierras con bosques federales dentro del rango de distribución del búho moteado norteno (*Strix occidentalis caurina* Merriam) ejemplifica el papel de la ciencia que estudia los ecosistemas en la solución de este cambio de paradigma. Aquellos esfuerzos enfocados en la recuperación y restauración de grandes carnívoros, como los lobos y los osos pardos (*Ursus arctos* L.), representan otro cambio fundamental en las políticas sobre fauna silvestre que surgieron en parte de los estudios a largo plazo sobre el rol ecológico de estos organismos. Las observaciones e investigaciones a largo plazo sobre bosques en el centro oeste de América del Norte han cambiado profundamente la mentalidad de los administradores de las tierras hacia considerar los incendios como procesos ecológicos, dando lugar a una mayor aceptación de los fuegos naturales y prescritos en los regímenes de manejo forestal (Arno & Fiedler 2005, Cissel et al. 1999).

RECOMENDACIONES Y COMENTARIOS GENERALES

La experiencia en investigaciones a largo plazo en América del Norte sugiere que tales iniciativas son fundamentales para resolver definitivamente muchas de las hipótesis de trabajo que constituyen las bases del manejo forestal y de la ecología de perturbaciones naturales. A continuación se detallan algunas sugerencias para nuevos proyectos de investigación ecológica a largo plazo.

Interdisciplinaridad

El establecimiento de investigaciones a largo plazo a menudo sirve como "punto de reunión" para expertos provenientes de múltiples disciplinas. Un ejemplo excelente es el del Bosque Experimental H. J. Andrews Experimental Forest, donde forestales, hidrólogos, geomorfólogos y otros especialistas se reunieron bajo el auspicio del Programa Biológico Internacional (Luoma 1999). La inclusión de especialistas de diversos orígenes constituye una forma de asegurar que no se ignoren variables importantes, que los diseños experimentales tengan un impacto medible, y que los

resultados de la investigación generen una perspectiva holística de la función ecosistémica.

Preguntas centrales o áreas focales de investigación

Los nuevos esfuerzos de investigación a largo plazo deben tener un tema o temas centrales para organizar y motivar a un conjunto diverso de colaboradores, del mismo modo en que la investigación sobre los bosques antiguos se convirtió en un punto de encuentro para los investigadores de H. J. Andrews, o que la función de las cuencas hidrológicas fue un tema central para los investigadores de Hubbard Brook. El cambio climático, la pérdida de la biodiversidad nativa, el ciclo del carbono, la conservación de la productividad de las cuencas hidrológicas, y temas similares son los argumentos generales que pueden establecer pertinencia entre áreas de investigación muy dispares y proveer un piso común para esfuerzos de investigación a largo plazo.

Incluir estadistas desde un inicio

Los diseños de las investigaciones a largo plazo deben ser estadísticamente robustos. Los principios del diseño experimental moderno, incluyendo el uso de réplicas y controles, parcelas de tamaño adecuado y suficiente para varios tipos de investigación, asignación aleatoria de los tratamientos, y mediciones de referencia o previas a los tratamientos en todas las réplicas, aumentan mucho la posibilidad de que las investigaciones a largo plazo generen resultados robustos (Powers & Van Cleve 1991, Ford 2005). La aplicación del principio "k.i.s.s." (del inglés "Keep it simple, stupid"- "Mantenlo simple, estúpido") es también muy recomendable para evitar experimentos saturados (por tratar de incluir un número excesivo de variables de tratamiento) y la potencial pérdida de inferencias significativas (Franklin 2005). Tanto los métodos de observación como los de experimentación serán necesarios para responder muchas preguntas científicas relacionadas con los desafíos socio-culturales. La experiencia del programa LTER de los Estados Unidos de América sugiere que el manejo de los datos ocupará al menos un 25 % del presupuesto operativo (Franklin 2005). La inclusión de suficiente pericia en la creación y el mantenimiento de bases de datos en cualquier estudio de investigación ecológica a largo plazo no deben ser sobredimensionadas.

Utilizar tanto enfoques nuevos como antiguos

Las nuevas tecnologías serán cada vez más importantes, pero no por eso deben ser descartados los métodos de parcelas tradicionales. Una serie de sensores se han desarrollado para medir las funciones importantes de los ecosistemas como el flujo de carbono y la transpiración, que están siendo desplegados en las instalaciones de investigaciones a largo plazo en todo el mundo. Por ejemplo, las mediciones "eddy-covariance"

del flujo de carbono en las instalaciones de investigación Wind River Canopy Crane en el estado de Washington demostraron la existencia de una relación entre la variación climática interanual y el flujo neto de carbono de los bosques antiguos, así como contradicen la idea de que los bosques antiguos son sumideros insignificantes de carbono (Paw U et al. 2004). Sin embargo, los enfoques tradicionales para investigar los ecosistemas forestales, como las parcelas de muestreo permanente de tamaño fijo, deben mantenerse para proveer de datos y contexto de referencia para enfoques de mayor complejidad tecnológica; esto es prioritario, ya que en última instancia, los datos empíricos son requeridos para probar definitivamente las hipótesis y los modelos.

Colaborar

La colaboración con otros investigadores a nivel nacional o internacional es necesaria para lograr que el contexto y síntesis de los resultados locales sean relevantes a nivel mundial. Un ejemplo excelente es el programa de LTER financiado por la NSF. Este programa ha dado lugar a varios esfuerzos que compararon y sintetizaron los resultados provenientes de diferentes sitios (Franklin et al. 1990). Esto sirve para generar avances en la teoría ecológica, además de profundizar en el conocimiento de los ecosistemas individuales. Las colaboraciones a nivel nacional e internacional son especialmente importantes para la evaluación a largo plazo de la respuesta de los ecosistemas al cambio climático global, el cual opera a múltiples escalas, ya sean temporales o espaciales. Los resultados de un sitio pueden ser engañosos si no se interpretan dentro del contexto de los resultados de múltiples sitios a través de gradientes ambientales a escalas regionales y continentales (Levin 1992) y en ambos hemisferios.

Ser flexible

La investigación a largo plazo puede generar respuestas para preguntas predefinidas, pero también puede ser un poderoso catalizador para investigar de manera oportunista aquellos fenómenos que llamen la atención durante el curso del estudio. Eventos como las perturbaciones atípicas e infrecuentes, si bien pueden generar una interrupción de la línea de investigación previa, también pueden ser vistos como enormes oportunidades de obtener nuevos conocimientos ecológicos.

Ser determinado

La financiación de la investigación está controlada en gran medida por intereses políticos a corto plazo (Franklin 1989, Wright 1996). Para mantener una investigación a largo plazo durante años y décadas se requiere de individuos dedicados capaces de ser flexibles en la búsqueda de financiamiento, agresivos para comunicar la importancia de la investigación a los responsables políticos, y hábiles para acomodar los

intereses de los científicos participantes y otros profesionales. Un compromiso institucional es un sello de éxito para los programas de estudios ecológicos a largo plazo (Powers & van Cleve 1991).

En los ecosistemas forestales de América del Norte se realizaron investigaciones ecológicas a largo plazo desde los trópicos hasta el subártico, desde el nivel del mar hasta los ecosistemas subalpinos, en bosques húmedos y secos, en sitios de baja y alta productividad, y también tanto en ambientes remotos como urbanos. Estos diversos esfuerzos han influido sobre el manejo de cuencas hidrológicas, la conservación de hábitat, la supresión y manejo de incendios, las prácticas de aprovechamiento de madera, y una multitud de otras actividades humanas cruciales. Este tipo de investigación ha demostrado ser una inversión importante para los ecosistemas boscosos por razones ecológicas, económicas y de valores sociales. Es alentador que la comunidad científica y las instituciones académicas en Chile estén seriamente comprometidas con el proceso de iniciar investigaciones ecológicas a largo plazo a nivel nacional (Anderson et al. 2008). Los datos generados a partir de estos esfuerzos podrían ser comparados con los provenientes de áreas con clima y latitud similares a las de Chile, como la costa oeste de América del Norte (Lawford et al. 1996), ofreciendo perspectivas de gran alcance en la respuesta de las comunidades bióticas al cambio climático en ambos hemisferios. Esta inversión de tiempo y recursos puede resultar de vital importancia en la generación de conocimiento ecológico y socio-ecológico necesario para lograr la sustentabilidad en un mundo dinámico.

AGRADECIMIENTOS

La traducción del inglés al castellano se hizo gracias al apoyo de Alejandro Valenzuela (Universidad de Buenos Aires y CADIC-CONICET) y fue revisada por Drs. Guillermo Martínez Pastur y Vanessa Lencinas (CADIC-CONICET) y Dr. Martín Carmona (IEB).

LITERATURA CITADA

- ANDERSON CB, R ROZZI, GE LIKENS, JR GUTIÉRREZ, A POOLE & JJ ARMESTO (2008) Using long-term socio-ecological study sites to integrate research with society. *Environmental Ethics* 30: 295-312.
- ARNO SF & CE FIEDLER (2005) Mimicking Nature's fire: Restoring fire-prone forests in the West. Island Press, Washington, DC.
- AUBRY KB, CB HALPERN & DA MAGUIRE (2004) Ecological effects of variable-retention harvests in the northwestern United States: The DEMO study. *Forest Snow and Landscape Research* 78: 119-137.
- BAKKER JP, H OLFF, JH WILLEMS & M ZOBEL (1996) Why do we need permanent plots in the study of long-term vegetation dynamics? *Journal of Vegetation Science* 7: 147-155.
- BROWN S, AE LUGO, S SILANDER & L LIEGEL (1983) Research history and opportunities in the Luquillo Experimental Forest. Gen. Tech. Rep. SO-44. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, New Orleans, LA.
- BUSSE MD, PH COCHRAN & JW BARRETT (1996) Changes in ponderosa pine site productivity following removal of understory vegetation. *Soil Science Society of America Journal* 60: 1614-1621.
- CHAN SS, DJ LARSON, KG MAAS-HEBNER, WH EMMINGHAM, SR JOHNSTON & DA MIKOWSKI (2006) Overstory and understory development in thinned and underplanted Oregon Coast Range Douglas-fir stands. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 2696-2711.
- CHAPIN F S, MW OSWOOD, K VAN CLEVE, LA VIERECK & DL VERBYLA (eds) (2006) Alaska's changing boreal forest. Oxford University Press, New York.
- CISSEL JH, FJ SWANSON & PJ WEISBERG (1999) Landscape management using historical fire regimes: Blue River, Oregon. *Ecological Applications* 9: 1217-1231.
- CRISAFULLI CM, JA MACMAHON & RR PARMENTER (2005) Small-mammal survival and colonization on the Mount St. Helens volcano: 1980-2002. En: Dale VH, FJ Swanson & CM Crisafulli (eds) *Ecological responses to the 1980 eruption of Mount St. Helens*: 199-218. Springer, New York.
- CURTIS RO, DS DEBELL, RE MILLER, M NEWTON, JB ST CLAIR & WI STEIN (2007) Silvicultural research and the evolution of forest practices in the Douglas-fir region. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-696. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon.
- DALE VH, FJ SWANSON, CM CRISAFULLI (eds) (2005) *Ecological responses to the 1980 eruption of Mt. St. Helens*. Springer Verlag, New York.
- DEL MORAL R & AJ ECKERT (2005) Colonization of volcanic deserts from productive patches. *American Journal of Botany* 92: 27-36.
- DEL MORAL R & LR ROZZELL (2005) Long-term effects of *Lupinus lepidus* on vegetation dynamics at Mount St. Helens. *Plant Ecology* 181: 203-215.
- ELLIOTT KJ & WT SWANK (2008) Long-term changes in forest composition and diversity following early logging (1919-1923) and the decline of American chestnut (*Castanea dentata*). *Plant Ecology* 197: 155-172.
- EYRE FH & WM ZILLGITT (1953) Partial cuttings in northern hardwoods of the Lake States: Twenty-year experimental results. Technical bulletin 1076. United States Department of Agriculture, Washington, DC.
- FORD ED (2005) Where can we go from here? En: Peterson CE & DA Maguire (eds) *Balancing ecosystem values: Innovative experiments for sustainable forestry: Proceedings of a conference*: 327-329. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-635. U.S.

- Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon.
- FRANKLIN JF (1989) Importance and justification of long-term studies in ecology. En: Likens GE (ed) Long-term studies in ecology: Approaches and alternatives: 3-19 Springer-Verlag, New York.
- FRANKLIN JF (2005) Long-term studies: the basis for science based resource management. pp. 13-14. En: Peterson CE & DA Maguire (eds), Balancing ecosystem values: Innovative experiments for sustainable forestry: Proceedings of a conference. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-635. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon.
- FRANKLIN JF, FC HALL, CT DYRNESS & C MASER (1972) Federal research natural areas in Oregon and Washington: A guidebook for scientists and educators. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland, OR.
- FRANKLIN JF & DS DEBELL (1988) Thirty-six years of tree population change in an old-growth Pseudotsuga-Tsuga forest. Canadian Journal of Forest Research 18: 633-639.
- FRANKLIN JF, CS BLEDSOE & JT CALLAHAN (1990) Contributions of the Long-Term Ecological Research program. Bioscience 40: 509-523.
- FRANKLIN JF, DB LINDENMAYER, JA MACMAHON, A MCKEE, J MAGNUSON, DA PERRY, R WAIDE & D FOSTER (2000) Threads of continuity: Ecosystem disturbance, recovery, and the theory of biological legacies. Conservation Biology in Practice 1: 8-16.
- GULDIN JM (2004) Overview of ecosystem management research in the Ouachita and Ozark Mountains: Phases I-III. En: Guldin JM (ed) Ouachita and Ozark Mountains symposium: Ecosystem management research. Gen. Tech. Rep. SRS-74. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC.
- LAWFORD RG, ALABACK P & E FUENTES (eds) (1996) High latitude rain forests and associated ecosystems of the west coast of the americas: Climate, hydrology, ecology and conservation. Springer Verlag, New York.
- LEOPOLD AS, SA MCCAIN, CM COTTAM, JM GABRIELSON & TL KIMBALL (1963) Wildlife management in the national parks. Transactions of the North American Wildlife and Natural Resources Conference 28: 28-45.
- LEVIN SA (1992) The problem of pattern and scale in ecology: The Robert H. MacArthur Award Lecture. Ecology 73: 1943-1967.
- LIKENS GE (2004) Some perspectives on long-term biogeochemical research from the Hubbard Brook Ecosystem Study. Ecology 85: 2355-2362.
- LIKENS GE, CT DRISCOLL & DC BUSO (1996) Long-term effects of acid rain: Response and recovery of a forest ecosystem. Science 272: 244-246.
- LUGO AE, FJ SWANSON, O RAMOS-GONZALEZ, MB ADAMS, B PALIK et al. (2006) Long-term research at the USDA Forest Service's Experimental Forests and Ranges. Bioscience 56, 39-48.
- LUOMA JR (1999) The hidden forest: The biography of an ecosystem. Henry Holt and Company, New York.
- PALIK B, RJ MITCHELL, S PECOT, MA BATTAGLIA & M PU (2003) Spatial distribution of overstory retention influences resources and growth of longleaf pine seedlings. Ecological Applications 13: 674-686.
- PARSONS DJ & JW VAN WAGTENDONK (1996) Fire research and management in the Sierra Nevada National Parks. En: Halvorson WL & GE Davis (eds) Science and ecosystem management in the National Parks: 25-48. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- PAW U KT, M FALK, TH SUCHANEK, SL USTIN, J CHEN et al. (2004) Carbon dioxide exchange between an old-growth forest and the atmosphere. Ecosystems 7: 513-524.
- PETERSON CE & DA MAGUIRE (eds) (2005) Balancing ecosystem values: innovative experiments for sustainable forestry: Proceedings of a conference. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-635. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon.
- PICKETT STA (1989) Space-for-time substitution as an alternative to long-term studies. En: Likens GE (ed) Long-term studies in ecology. Approaches and alternatives: 110-135. Springer-Verlag, New York.
- POWERS RF & K VAN CLEVE (1991) Long-term ecological research in temperate and boreal forest ecosystems. Agronomy Journal 83: 11-24.
- PUETTMANN KJ, KD COATES & C MESSIER (2009) A critique of silviculture: Managing for complexity. Island Press, Washington, DC.
- RIPPLE WJ & RL BESCHTA (2003) Wolf reintroduction, predation risk, and cottonwood recovery in Yellowstone National Park. Forest Ecology and Management 184: 299-313.
- SEYMOUR RS, J GULDIN, D MARSHALL & B PALIK (2006) Large-scale, long-term silvicultural experiments in the United States: Historical overview and contemporary examples. Allgemeine Forst und Jagd-Zeitung 177: 104-112.
- SWANK WT & JM VOSE (1994) Long-term hydrologic and stream chemistry responses of southern Appalachian catchments following conversion from mixed hardwoods to white pine. En: Landolt R (ed) Hydrologie kleiner Einzugsgebiete: Gedenkschrift Hans M Keller. Beitrage Zur Hydrologie der Schweiz 35. Bern, Schweizerische: Schweizerische Gesellschaft fur Hydrologie und Limnologie: 164-172.
- TITUS JH & E HOUSEHOLDER (2007) Salvage logging and replanting reduce understory cover and richness compared to unsalvaged-unplanted sites at Mount St. Helens, Washington. Western North American Naturalist 67: 219-231.

TURNER MG, SL COLLINS, AE LUGO, JJ MAGNUSON, TS RUPP & FJ SWANSON (2003) Disturbance dynamics and ecological response: The contribution of long-term ecological research. *Bioscience* 53: 46-56.

VAN MANTGEM PJ, NL STEPHENSON, JC BYRNE, LD DANIELS, JF FRANKLIN et al. (2009) Widespread increase of tree mortality rates in the western United States. *Science* 323: 521-524.

WRIGHT RG (1996) Wolf and moose populations in Isle Royale National Park. En: Halvorson WL & GE Davis (eds) *Science and ecosystem management in the national parks: 74-95*. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona.