

Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar

M.P. Bernal, R. Clemente¹, S. Vazquez², D.J. Walker³

(1) Dpto. Conservación de Suelos y Agua y Manejo de Residuos Orgánicos, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, CSIC, Apartado 164, 30100 Murcia.

(2) Dpto. Química Agrícola. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. 28049 Madrid

(3) Dpto. Recursos Naturales, Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario. Calle Mayor s/n, La Alberca, 30150 Murcia.

Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar. El vertido de lodo pirítico procedente de la mina de Aznalcóllar en 1998 afectó a 4286 ha de suelo de los que el 59,7 % eran suelos agrícolas. Los principales elementos responsables de la contaminación fueron As, Cd, Cu, Pb, y Zn, junto con la acidificación de los suelos causada por la oxidación de los sulfuros metálicos. Este caso dramático de contaminación supuso un extraordinario movimiento de la comunidad científica española y extranjera, que permitió poner en práctica técnicas biológicas de recuperación basadas en el uso de plantas (fitorremediación), que permitiera el desarrollo del plan del Corredor Verde del Guadiamar por la Junta de Andalucía. La dificultad del caso estriba en la contaminación múltiple, la escasa estabilidad química de los contaminantes y su carácter acidificante. Este trabajo muestra brevemente algunos trabajos de fitorremediación realizados *in situ* en parcelas de experimentación. Se ha evaluado la utilidad de diversas técnicas: la fitoextracción mediante mostaza india, una planta agrícola de alta biomasa capaz de acumular los metales en su parte aérea, junto con la mejora de los suelos mediante enmiendas orgánicas y calizas; y la fitoimmobilización mediante el altramuz, que es una leguminosa tolerante a los metales por exclusión en sus raíces y a ciertas condiciones de acidez del suelo.

Palabras clave: metales pesados, lodo pirítico, suelos contaminados, fitoextracción, fitoimmobilización.

The application of phytoremediation technologies to metal-contaminated soils in Aznalcóllar. The spill of pyrite sludge from the Aznalcóllar mine in 1998, affected 4286 ha of land, 59.7 % of which was agricultural. The main contaminants were As, Cd, Cu, Pb and Zn, their effects being exacerbated by the soil acidification caused by the oxidation of metallic sulphides. This dramatic case of soil pollution mobilised the Spanish and international scientific communities, with the aim of applying biological techniques for soil remediation based on the use of plants (phytoremediation). These were fundamental in the development of the "Green Corridor of Guadiamar" land recuperation plan by the Andalusian regional government. Difficulties arose from the multi-element contamination, the chemical instability of the contaminants and the acidic nature of the contamination. This article briefly describes some phytoremediation experiments carried out *in situ* in experimental plots. The feasibility of certain phytoremediation techniques has been evaluated: phytoextraction by Indian mustard, a high-biomass crop able to accumulate metals in its aerial parts, in combination with the improvement of soil properties by the application of organic and calcareous amendments, and phytoimmobilisation using white lupin, a leguminous species tolerant of heavy metals due to their immobilisation in the roots and, to a certain degree, tolerant of soil acidity.

Key words: heavy metals, pyritic sludge, soil contamination, phytoextraction, phytoimmobilisation.

Introducción

Desde hace más de 20 años la noción de biodiversidad y de su papel en el funcionamiento de los ecosistemas ha tomado cada vez mayor importancia a nivel mundial. Desde esa época, los científicos y los periodistas comenzaron a utilizar los términos capital natural y servicios ecosistémicos. Sin embargo, fue a partir de la preocupación sobre el cambio climático y sus efectos devastadores, cuando se reconoció la importancia del vínculo entre la ecología y la economía, fundamento básico para interpretar la actual crisis ecológica, así como la formulación de posibles soluciones.

Dado el crecimiento demográfico rápido y el enorme consumo del capital natural, si no se produce un cambio en las formas de aprovechamiento y manejo de dicho capital, los problemas ambientales serán inminentes, inevitables y sus consecuencias gravísimas. La ciencia y la política de la conservación y de la restauración, así como la ciencia económica, deben asociarse en la búsqueda de nuevas trayectorias para un mundo sobrepoblado en donde el consumo per cápita es muy elevado en los países ricos y dramáticamente bajo en los pobres. Una de las ideas más importantes que emerge de esta colaboración es la posibilidad concreta de que invirtamos como sociedad y comunidad mundial en la restauración del capital natural degradado (RCN).

En términos económicos, el capital natural representa las reservas, ganancias e intereses generados a partir de los bienes naturales, es decir los flujos de bienes y servicios de los cuales dependen las sociedades y economías para su supervivencia.

Hay cuatro tipos de capital natural: 1) renovable (especies vivas, ecosistemas), 2) no renovable (petróleo, carbón, diamantes), 3) recuperable (atmósfera, agua potable, suelos fértiles) y 4) cultivado (áreas y sistemas de producción agropecuaria y silvoculturales). El capital natural incluye todos los ecosistemas perdurables, así como, los paisajes culturales de los cuales obtenemos servicios y productos (bienes) que permiten nuestro sustento y bienestar sin costos directos de producción. Es importante precisar que la totalidad de las reservas de capital natural cultivado y capital de manufactura humana se derivan de las otras formas de capital (natural renovable, no renovable y recuperable).

En este artículo, se presentan definiciones y conceptos básicos, para mostrar cómo la RCN presenta un enfoque más amplio que la restauración ecológica tal como fue definida por la Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica (SER, 2002). Se pretende ofrecer nuevas perspectivas en relación a la tendencia actual de pérdida masiva de bienes y servicios naturales. Por último, damos a conocer estudios de caso, como ejemplos del enfoque de la RCN, y de su impacto sobre el suministro de bienes y servicios ecosistémicos en Argentina, Colombia, México y Chile.

Definiciones y conceptos básicos

¿Qué es la Restauración del Capital Natural?

La Restauración del Capital Natural (RCN) recoge una serie de conceptos y herramientas que pretenden integrar de manera armónica a la sociedad con el ambiente a nivel local, regional, nacional y mundial. La RCN se relaciona directamente con el incremento, la inversión o la recuperación de las reservas de capital natural, con la finalidad de promover el bienestar humano y la conservación de los ecosistemas a largo plazo (Cairns, 1993; Janzen, 2002; Milton *et al.*, 2005; Clewell y Aronson, 2006, 2007; Aronson *et al.*, 2006, 2007; Gómez-Baggethun y De Groot en este monográfico; <http://www.rncalliance.org>).

¿Cuáles son las razones para invertir en la recuperación de las reservas de capital natural? De manera simple, podría decirse que es para procurar y mejorar la generación y el abastecimiento de los bienes y servicios naturales de los cuales dependemos para nuestra propia supervivencia y bienestar (Westman, 1977; Daily, 1997; Ekins *et al.*, 2003; MA, 2005). Las actividades de RCN incluyen acciones de restauración e integración de sistemas de producción y sistemas naturales dentro de un mismo paisaje. Lo anterior implica la restauración de ecosistemas naturales y agroecosistemas dañados, degradados o destruidos. La meta principal es mejorar los aspectos físicos, socio-económicos y culturales relacionados con la calidad de vida; lo cultural tiene una vertiente incluso psicológica -es por esto que el término RCN se refiere también a la restauración de relaciones positivas y evolutivas entre la humanidad y los paisajes que habita. La RCN reconoce explícitamente el capital humano y social, y se centra en la mejora los servicios generados en los ecosistemas y agroecosistemas mediante el reabastecimiento y mantenimiento de su capital natural. A diferencia de lo señalado en la definición oficial sobre restauración ecológica propuesta por la Sociedad Internacional para la Restauración Ecológica (SER, 2002), la RCN tiene una aproximación más global, al incorporar los sistemas naturales, los sistemas de producción y los sistemas urbanos junto con la economía, la ingeniería ambiental y la restauración ecológica.

El diseño de proyectos de RCN implica el buen funcionamiento de los ecosistemas, la conservación de la biodiversidad, los múltiples servicios de los ecosistemas, la sostenibilidad, y los beneficios sociales. Entre los ejemplos de este tipo de proyectos figuran: la restauración de bosques auto-sostenibles para la producción maderera, o la restauración de pastos semi-naturales para la producción ganadera en explotaciones mineras a cielo abierto abandonadas (Tongway y Ludwig, 1996; Mentis, 2006). En igual sentido se consideran la eliminación manual de árboles invasores exóticos, o la reforestación con especies nativas en cuencas para aumentar la provisión de agua en las ciudades, y al mismo tiempo generar empleo y restaurar ecosistemas biodiversos (Van Wilgen *et al.*, 2002; Renison *et al.* 2005; Woodworth, 2006); el uso de árboles para reducir la salinización en cultivos de trigo (Yates y Hobbs, 1997), y la reintroducción de prácticas agrícolas tradicionales ecológicamente compatibles y económicamente factibles (Levy-Tacher y Aguirre, 2005; Ovalle *et al.*, 1999).

La RCN integra la economía y la ecología en una forma que beneficie a la gente y mejore la calidad del ambiente que les sostiene (y de todos los organismos). Los proyectos de RCN apuntan a restaurar los sistemas naturales y a rehabilitar tierras

cultivables y otros sistemas de producción de manera sostenible. Los proyectos apoyan, y pueden inclusive mejorar, la conservación de la biodiversidad local, y al mismo tiempo mejoran la oferta de servicios y bienes a la gente.

Estudios de caso

Consideraremos dos proyectos de RNC cuya finalidad es la restauración del capital natural de los sistemas naturales, y dos en el contexto de los sistemas de producción. En los cuatro casos de estudio los paisajes muestran diferente grado de alteración antrópica, persistiendo remanentes originales de diversa extensión.

a) Ecosistemas naturales I – Sierras Grandes del centro, Argentino

Estas montañas brindan importantísimos servicios y bienes para la población de la región. Allí nacen los ríos que proveen de agua a la agricultura, industrias, y más de dos millones de personas. Existe una importante actividad turística alimentada por sus bellezas paisajísticas, y se encuentra una biodiversidad muy singular con gran número de endemismos (Luti *et al.*, 1979; Heil *et al.*, 2007). Debido a 400 años de uso en la ganadería extensiva y en menor escala agricultura y minería, el capital natural de estas sierras se encuentra altamente empobrecido. Sus bosques nativos de *Polylepis* se redujeron en, por lo menos, una cuarta parte (Cingolani *et al.*, 2004; Renison *et al.*, 2006). Los suelos se están perdiendo en forma acelerada y, en consecuencia, más del 20% de toda la superficie ahora es roca madre expuesta por la erosión (Cingolani *et al.*, 2003, 2004). Varias especies exóticas se escaparon de los jardines y plantaciones forestales e invadieron el paisaje. Como consecuencia, la zona ahora soporta cargas ganaderas y poblaciones humanas muy reducidas con respecto a las encontradas hace 100-200 años. En un esfuerzo que aún continúa, durante la década de 1990 se concretó la creación de un Parque Nacional, una Reserva Hídrica y múltiples proyectos que tuvieron como finalidad restaurar el capital natural que poseían estas sierras, y en consecuencia el flujo de bienes y servicios que proveen a los habitantes del centro Argentino (agua, bellezas paisajísticas, productividad ganadera, biodiversidad incluyendo especies de utilidad medicinal y económica). En el Parque Nacional se expropiaron las tierras y se contrató a los pobladores que las habitaban como empleados del parque. Se redujo la erosión de los suelos y se fomentó la expansión de los bosques, excluyendo o reduciendo las cargas ganaderas. Con el fin de mantener la biodiversidad y los procesos ecosistémicos se están re-introduciendo camélidos nativos y re-forestando sitios degradados (Tavarone, 2004; Renison *et al.*, 2005; García *et al.*, en prensa). En la reserva hídrica, el dominio de las tierras sigue siendo privado, pero numerosas instituciones gubernamentales y no-gubernamentales han sumado sus esfuerzos para trabajar con los productores locales en un desarrollo más sostenible de la zona. Con el objeto de crear áreas demostrativas y aprender técnicas, algunos sitios muy degradados que ya prácticamente no tienen interés para la producción ganadera se están restaurando activamente mediante re-vegetación y reforestación con especies nativas (Fig. 1; Renison *et al.*, 2002, 2005). Se comenzaron estudios tendientes a evaluar y combatir la invasión de especies exóticas. Todas las actividades han estado acompañadas por un fuerte componente de educación ambiental – con el fin de que la población comprenda la necesidad de restaurar el capital natural de la zona – y guiadas por un plan de manejo y de monitoreo (Cabido *et al.*, 2003). Las perspectivas para el futuro son prometedoras, pero es considerable lo que queda por hacer; se requerirá mucho trabajo, constancia e imaginación para continuar con el proceso de RCN iniciado hace una década.





Figura 1. Detalle de la evolución de un sitio muy degradado de las sierras de Córdoba, Argentina, inmediatamente antes (1997, fotografía superior) y después (2006, fotografía inferior) de comenzar su restauración para incrementar la capacidad del sitio y sus suelos para proveer de agua a los ríos, sustentar a la biodiversidad y las actividades ganaderas que causaron su destrucción. Fuente: D. Renison.

b) Ecosistemas naturales II – humedales en una zona periurbana – Bogotá, Colombia

La región de alta montaña en el Norte de los Andes, presenta una de los mayores valores de biodiversidad en el mundo a nivel de especies, comunidades y ecosistemas (Rangel, 2000). Antes de la irrupción de los españoles, los indígenas utilizaron los abrigos rocosos comunes en estos ambientes como medio de protección y de resguardo, e igualmente los lagos y lagunas como sitios inherentes a su cosmología (Rangel, 2006). El consumo de la oferta ambiental era mínimo, pequeños mamíferos como curies y conejos. En algunos casos, como en la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia), la cultura *kogui* tuvo como fuente básica de plantas medicinales a la flora del páramo. En su historia natural, nunca han tenido un valor de uso directo en actividades pecuarias o en insumos para la producción.

En la actualidad, la demanda sobre el capital natural de la alta montaña ha llegado a situaciones alarmantes. Ésta incluye el uso directo de los bosques achaparrados como combustible casero y en cercas (especies de *Polylepis*, *Gynoxys*, *Diplostephium*), y el uso de hierbas y pastos nativos en ganadería, techos de las casas (especialmente *Calamagrostis*) y como ornamentales. Estos usos se están intensificando sin disponer de información básica sobre manejos sostenibles (Hofstede, 1995). La minería a cielo abierto y el urbanismo -con progresión de los límites de las ciudades en páramos de baja altitud (sabana de Bogotá), son factores adicionales de perturbación. A mayor altura, la agricultura de la papa y la desecación de lagos y lagunetas, cuyo contenido de materia orgánica permite la retención de gran cantidad de agua (Parra, 2005) aceleran la pérdida del capital natural. Además, la liberación de altas concentraciones de CO₂ por las razones anteriormente mencionadas, contribuirá al cambio climático global.

Los servicios ecológicos de la alta montaña se relacionan con la regulación hídrica, ya que es el área del sistema montañoso donde mejor opera la economía hídrica. En el caso de Colombia, con una población humana ubicada mayormente en los Andes, el 70% de la misma depende del agua que se encuentra depositada en lagos, lagunas y suelos del páramo. Bogotá, la capital de la república de Colombia, con cerca de 7,000.000 de habitantes, depende para su suministro hídrico de las reservas del páramo de Chingaza (Cundinamarca). Al ritmo del crecimiento de la población, con cerca de 500 a 600.000 inmigrantes anuales, es lógico esperar que en pocos años se necesiten nuevas fuentes de suministro hídrico. Quizás tendrá que ser utilizada entonces la región de páramo más extensa que existe en toda su área geográfica, el páramo de Sumapaz, donde hay numerosas lagunas, charcas y pantanos, y sectores en los cuales la alta pluviosidad (>4.000 mm al año) garantiza un suministro adecuado para el mantenimiento de los niveles de agua en las lagunas. Sin embargo, para asegurar este propósito se requiere ejecutar acciones que permitan la conservación del remanente de capital natural y la restauración de las partes degradadas. En síntesis, es necesario promover interacciones positivas entre capital económico, natural y humano que perpetúen la prestación de bienes y servicios fundamentales en cualquier plan de desarrollo.

c) Sistema de producción I – contexto de agricultura tropical – Chiapas, México

En menos de cinco décadas, la selva lacandona –último reducto de selva alta perennifolia en México y Norteamérica – perdió más del 50% de su superficie boscosa (Mendoza y Dirzo, 1999; Mas *et al.*, 2004). La vegetación original fue sustituida por extensos pastizales y por un mosaico de ambientes modificados por la actividad humana, frecuentemente dominados por helechos y otras especies vegetales invasoras, que impiden su utilización agropecuaria y dificultan su regeneración natural (Levy-Tacher y Aguirre, 2005).

Ante este escenario, resulta indispensable encontrar estrategias que permitan frenar el deterioro ecológico de la región, lo cual puede alcanzarse con la restauración del capital natural (RCN) mediante el uso de técnicas tradicionales de los mayas. En el estado de Chiapas, México, los indios lacandones son uno de los pueblos del grupo maya que posee el conocimiento tradicional más detallado de la flora y la ecología regional, y que por generaciones han manejado la selva sin destruirla (Nations y Night, 1980; Marion, 1991; de Vos, 1988).

Este grupo étnico conserva una técnica ancestral que permite la acelerada recuperación de áreas aprovechadas en la agricultura. Esta técnica se sustenta en la utilización del árbol *chujúm* (*Ochroma pyramidale*), una especie de interés comercial y amplia distribución en América (Longwood, 1962; Ascer, 1975), y rápido crecimiento, que es capaz de enriquecer los suelos agotados por la agricultura y la ganadería, así como de rehabilitar áreas degradadas como consecuencia de las quemadas frecuentes (Levy, 2000; Levy y Duncan, 2004).

Cuando se trasplantaron plántulas de *chujúm* cultivadas en vivero a parcelas con un aprovechamiento agrícola intensivo (*milpa*) y a sitios dominados por *Pteridium aquilinum*, se lograron tasas altas de supervivencia (**Fig. 2; Fig. 3**). La siembra directa igualmente dio buenos resultados (Douterlungne, 2005; Douterlungne *et al.*, 2007). Después de un año, el suelo de las parcelas restauradas se cubrió con una densa capa de hojarasca; se empezó a observar la presencia de aves y murciélagos (fauna dispersora de semillas), y el reclutamiento natural de vegetación leñosa. Levy y Duncan (2004) encontraron que el manejo tradicional de este árbol les permite a los lacandones acelerar la recuperación del ecosistema selvático, al identificarse un aumento de 5% de la materia orgánica del suelo bajo la copa de densas poblaciones de *chujúm*, en comparación con áreas cercanas a otras especies nativas. Los datos obtenidos son muy alentadores y reafirman la posibilidad de que esta técnica permite la RCN y del ecosistema selvático a largo plazo. El uso del *chujúm* es una opción viable para que los campesinos de la región rehabiliten terrenos que tradicionalmente se han considerado perdidos para la agricultura, con una planta que, además, tiene valor económico.

En una época dominada por la modificación genética de especies y la tecnificación agrícola, estrategias sencillas, derivadas de prácticas tradicionales, pueden llegar a tener un impacto importante en las regiones tropicales. La recuperación de suelos degradados permitirá la creación de corredores biológicos para conectar áreas aisladas de vegetación madura, proporcionará fuentes de aprovechamiento forestal persistentes que eliminarán la necesidad de talar la selva, y le darán una oportunidad a las comunidades agrarias para hacer un uso más racional y prolongado de sus terrenos agrícolas y potreros.



Figura 2. *Ochroma pyramidale* con seis meses de crecimiento en la parcela experimental dominada por *Pteridium aquilinum*, en Lacanhá Chansayab, Chiapas, México. Fuente: S. Levy Tacher.



Figura 3. *Ochroma pyramidale* con un año de crecimiento en la parcela experimental dominada por *Pteridium aquilinum*, en Lacanhá Chansayab, Chiapas, México. Fuente: S. Levy Tacher.

d) Sistemas de producción II – contexto agropecuario de la zona de clima mediterráneo de Chile

En la región central de Chile, al igual que en otras áreas con ecosistemas frágiles y semiáridos del mundo, ni los habitantes rurales ni las clases dirigentes han valorado la riqueza que estas zonas guardan, y el valor que poseen como patrimonio natural único, prestadores de servicios ecológicos, como conservación de la biodiversidad, producción limpia, paisajes culturales, funcionamiento de cuencas hidrográficas, y conservación de suelos y aguas. En el pasado imperó la explotación excesiva de los recursos naturales debido a la aplicación del modelo de agricultura europea cerealista, con una intensidad de explotación de los recursos incompatible con la capacidad de carga y productividad biológica de esos ambientes. En los últimos 30 años la región mediterránea de Chile ha presentado un cambio drástico en el uso del suelo, de agrícola/ganadero a forestal (Ovalle *et al.*, 1999; Aronson *et al.*, 2002). Ambos extremos han tenido consecuencias graves en términos de conservación del capital natural. La agricultura provocó una fuerte degradación de los suelos, cuya consecuencia más grave ha sido la erosión intensa. Cuando el suelo y la vegetación se destruyeron, ya no fue posible sostener a la población rural y sobrevino entonces la segunda “ola de transformación”, con la proliferación de plantaciones industriales de pinos y eucaliptos para la producción de madera y pulpa para papel. Con este segundo cambio, si bien la erosión de los suelos se tiende a detener, se pierden paisajes, especies, patrimonio cultural (costumbres y tradiciones, etc.). Además, debido a la gran tasa de evapotranspiración de las plantaciones, disminuyen los niveles freáticos que sustentan a los ríos de la zona y proporcionan agua potable para humanos y animales. Esta tendencia tiene, para el país, consecuencias ecológicas y culturales que aún no han sido correctamente evaluadas. La pregunta que surge es si es posible pensar en una vía alternativa de desarrollo a los modelos actuales ¿Qué ayudas, instrumentos o herramientas de fomento sería necesario para apoyar a los agricultores y ganaderos a permanecer en el campo y a no abandonar y enajenar sus tierras? Variadas alternativas han sido evaluadas en los últimos 30 años y varias de ellas se están aplicando con éxito. La recuperación de suelos degradados es ya una realidad a partir de un programa específico, desarrollado por el Ministerio de Agricultura, tendiente a corregir la acidez edáfica y el agotamiento del nivel de fósforo, lo cual permite el establecimiento de praderas de leguminosas fijadoras de nitrógeno (Fig.

4), produciendo un mejoramiento de la fertilidad de los suelos, elevando el potencial productivo de las praderas, lo que se traduce en un aumento de la productividad y rentabilidad de la producción ganadera de ovino en la región. De manera análoga, la restauración de los espinales chilenos - una formación silvopastoral seminatural, junto con ayudas para evitar y controlar la erosión, tales como la "labranza cero", el manejo de los rastrojos, la construcción de barreras físicas y biológicas para el control de cárcavas, todas medidas para la RCN. Las perspectivas para el futuro son auspiciosas, pero requerirán de toda nuestra imaginación para desarrollar nuevas alternativas para generar recursos económicos, tales como el turismo rural para el desarrollo de una economía con nuevos productos regionales de alto valor (**Fig. 5**).



Figura 4. Parcelas experimentales mostrando el excelente comportamiento de leguminosas forrajeras anuales en suelos degradados del secano interior. Al igual que algunos árboles leguminosos, estas plantas son capaces de fijar altas cantidades de N atmosférico, permitiendo iniciar procesos de restauración de la fertilidad de los suelos. Fuente: C. Ovalle



Figura 5. Espinales degradados con un baja abundancia espino y donde muy pocas especies arbóreas pueden crecer. En el fondo se aprecian arbustos, los de hoja caduca son espinos y los de hoja perenne son matorrales típicos de suelos degradados, en este caso tebos (*Trevoa trinervis*; *Rhamnaceae*) Fuente: C. Ovalle.

Discusión y perspectivas

En todo el mundo, los recursos naturales han sufrido fuertes y continuados procesos de degradación debido al aprovechamiento intensivo y al manejo irracional al que han sido sometidos. Esta tendencia puede revertirse mediante la implementación de programas de restauración de los ecosistemas degradados y protección de los remanentes naturales, bajo la perspectiva integradora de la ecología y la economía. Una acción así, exige un concepto de trabajo a nivel del paisaje, en estrecha colaboración con las poblaciones locales. La presentación y discusión de las experiencias mencionadas en el texto, nos conducen inevitablemente a la necesidad de plantear acciones concretas para conservar y recuperar el capital natural. Estas experiencias también nos muestran la necesidad de extender los beneficios de la RCN a la población humana. Se pretende generar mejores opciones para la comprensión de las nuevas concepciones de la relación 'ser humano/naturaleza', en las cuales el marco teórico del manejo del capital económico puede ser tomado como un modelo que facilite la persistencia del capital natural; éste sería el caso de las Sierras Grandes del centro Argentino y de la alta-montaña del norte de los Andes.

Otra opción igualmente atractiva se relaciona con la recuperación del capital natural agotado o explotado en exceso, ya sea mediante la incorporación de conocimientos ancestrales (Chiapas) o la utilización de conocimientos generados recientemente, en el caso chileno. Los dos procesos apuntan hacia el fundamento de la filosofía de la RCN: recuperar para reintroducir este capital al ciclo de manejo sobre la premisa esencial de conservar los depósitos naturales, consumir las ganancias y extender los beneficios a la mayoría de la población. El compromiso que resulta de las consideraciones anteriores en todos los centros de la alianza RCN puede resumirse en la siguiente frase: *Una Economía en la cual la Naturaleza cuenta y una Ecología donde los Hombres cuentan*. Esta frase queda plasmada en el concepto de RCN mediante la incorporación de la palabra 'capital' al concepto pre-existente de restauración ecológica, lo cual enfatiza la conexión entre economía y ecología.

Agradecimientos

Gracias a Christelle Fontaine por su ayuda con el manuscrito y a Paddy Woodworth por sus comentarios. DR agradece el apoyo financiero de dos Rufford Small Grants y la Agencia Córdoba Ambiente SE a sus proyectos, los cuales permitieron madurar las ideas vertidas en este texto.

Referencias

- Aronson, J., Ovalle, C., Avendaño, J., Longeri, L., y Del Pozo, A., 2002. Agroforestry tree selection in central Chile: biological nitrogen fixation and plant growth in six dryland species. *Agrofor. Syst.* 56: 155-166.
- Aronson, J., Blignaut, J.N., Milton, S.J., y Clewell, A.F., 2006. Natural capital: the limiting factor. *Ecol.* 28:1-5.
- Aronson, J., Milton, S., y Blignaut, J., eds, 2007. *Restoring natural capital: Science, business, and practice*, Island Press, Washington, D.C.
- Ascer, R., 1975. Balsa wood in boat construction. *Revue du Bois et de ses Applications* 30:59.
- Cabido, M., Antón, A., Cabrera, M., Cingolani, A.M., Di Tada, I., Enrico, L., Funes, G., Haro, G., Polop, J., Renison, D., Rodríguez, V., Roqué Garzón, J., Rosacher, C., y Zak, M., 2003. *Línea de Base y Programa de Monitoreo de la biodiversidad del Parque Nacional Quebrada del Condorito y la Reserva Hídrica Provincial Pampa de Achala*.
- Cairns, J. Jr., 1993. Ecological restoration: Replenishing our national and global ecological capital. En *Nature conservation 3: Reconstruction of fragmented ecosystems* (eds. Saunders, D, Hobbs, R. y Ehrlich, P.), pp. 193-208, Surrey Beatty & Sons, Chipping Norton, NSW, Australia.
- Cingolani, A.M., Cabido, M.R., Renison, D., y Solís Neffa, V., 2003. Combined effects of environment and grazing on vegetation structure in Argentine granite grasslands. *J. Veg. Sci.* 14: 223-232.
- Cingolani, A.M., Renison, D., Zak M.R., y Cabido, M.R., 2004. Mapping vegetation in a heterogeneous mountain rangeland using Landsat data: an alternative method to define and classify land-cover units. *Remote Sens. Environ.* 92: 84-97.
- Clewell, A. F., y Aronson, J., 2006. Motivations for the restoration of ecosystems. *Conserv. Biol.* 20: 420--428.

- Clewell, A. F., y Aronson, J., 2007. *Ecological restoration: Principles, values, and structure of an emerging profession*, Island Press, Washington, DC.
- Daily, G.C., 1997. *Nature's services. Societal dependence on natural ecosystems*, Island Press, Washington, DC.
- de Vos, J., 1988. *Oro verde. La conquista de la selva Lacandona por los madereros tabasqueños, 1822-1949*, Instituto de Cultura de Tabasco/Fondo de Cultura Económica, México, D. F.
- Douterlungne, D., 2005. *Establecimiento de acahuals a través del manejo tradicional lacandón de Ochroma pyramidale Cav.* Tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural. ECUSUR.
- Douterlungne, D., Levy-Tacher, S., Golicher, D., y Román-Dañobeytia, F., 2007. Applying indigenous knowledge to the restoration of degraded tropical rain forest dominated by bracken. (*Inédito*).
- Ekins, P., Folke, C., y De Groot, R., 2003. Identifying critical natural capital. *Ecol. Econ.* 44, 159-163.
- García, C., Renison, D., Cingolani, A.M., y Fernández-Juricic, E. En prensa. Avifaunal changes as a consequence of large scale livestock exclusion in the mountains of Central Argentina. *J. App. Ecol.*
- Heil, L., Fernández-Juricic, E., Renison, D., Nguyen, V., Cingolani, A.M., y Blumstein, D.T., 2007. Avian responses to tourism in the biogeographically isolated high Córdoba Mountains. *Biodivers. Conserv.* 16:1009-1026.
- Hofstede, R., 1995. *Effects of burning and grazing on a Colombian páramo ecosystem*. Ph.D. Thesis. University of Amsterdam, Amsterdam.
- Janzen, D.H., 2002. Tropical dry forest: area de conservación Guanacaste, northwestern Costa Rica. En *Handbook of ecological restoration. Vol. 2. Restoration in practice* (eds. Perrow, M. y Davy, A.), pp. 559-584, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Levy T., S., 2000. *Sucesión causada por roza-tumba-quema en las selvas de Lacanhá, Chiapas*. Tesis Doctor en Ciencias. Colegio de Posgraduados, montecillo estado de México.
- Levy, S.I.T., & Duncan, J.G., 2004. How predictive is Traditional Ecological Knowledge? The case of the Lacandon Maya fallow enrichment system. *Interciencia* 29:496-503.
- Levy-Tacher, S., & Aguirre, R., 2005. Successional pathways derived from different vegetation use patterns by Lacandon Mayan Indians. *J. Sustainable Agric.* 26:49-82.
- Longwood, F.R., 1962. *Present and potential commercial timbers of the Caribbean*. Agric. Handb. 207. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.
- Luti, R., Solis, M., Galera, F., Ferreira, N., Berzal, M., Nores, M., Herrera, M., y Barrera, J., 1979. Vegetación. En *Geografía física de la provincia de Córdoba* (eds. Vázquez, J. B., Miatello, R. A. y Roqué, M. E.), pp. 297-368, Ed. Bolett, Buenos Aires.
- Marion, M.O., 1991. *Los hombres de la selva, un estudio de tecnología cultural en medio selvático*. Instituto Nacional de Antropología e Historia, México, D. F. 287 p.
- Mas, J.F., Velázquez, A., Díaz, J.R.G., Mayorga, R.S., Alcántara, C., Bocco, G., Castro, R., Fernández, T., y Pérez, A.V., 2004. Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico. *Int. J. of Appl. Earth Observ. Geoinf.* 5:249-261.
- Mendoza, E., y Dirzo, R., 1999. Deforestation in Lacandonia (southeast Mexico): evidence for the declaration of the northernmost tropical hot-spot. *Biodiv. Conserv.* 8:1621-1641.
- Mentis, M.T., 2006. Restoring native grassland on land disturbed by coal mining on the Eastern Highveld of South Africa. *South African J. Sci.* 102:193-197.
- Millennium Ecosystem Assessment (MA), 2005. *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC. and Covelo, Ca.

- Milton, S.J., Aronson, J., y Blignaut, J.N., 2005. Restoring natural capital – shared visions for ecology and economy. *Quest* (South African Academy of Science) 2:39-41.
- Nations, J.D., y Night, R.B., 1980. The evolutionary potential of Lacandon Maya sustained-yield tropical rain forest agriculture. *J. Antropol. Res.* 36:1-33.
- Ovalle, C., Aronson, J., Del Pozo, A., y Avendaño, J., 1999. Restoration and rehabilitation of mixed espinales in central : 10-year report and appraisal. *Arid Land Res. Manage.* 13:369-381.
- Ovalle, C., del Pozo, A., Zagal, E., y Aronson, J. (in prep.). *Restoring natural capital in central Chile: annual legume pasture mixtures and new multipurpose trees can repair a degraded agroforestry system.* Agric. Ecosyst. Environ.
- Parra-S., L.N., 2005. *Análisis facial de alta resolución en el páramo de Frontino.* Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia.
- Rangel-Ch., J. O. 2000 (ed.). *Colombia Diversidad Biótica III. La región Paramuna.* Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia. Instituto A. Von Humboldt, Bogotá. D.C.
- Rangel-Ch., J.O. 2006. *The biodiversity of the Colombian paramo region and its relation to antropogenic impact.* En *Land use change and mountain biodiversity* (eds. Spehn, E., Liebermann, M. & C. Korner, C.), pp. 103-118, CRC Press, Boca Raton , FL.
- Renison, D., Cingolani, A.M., y Suarez, R., 2002. Efectos del fuego sobre un bosquecillo de *Polylepis australis* (Rosaceae) en las montañas de Córdoba, Argentina. *Revista Chilena de Historia Natural* 75:719-727.
- Renison, D., Cingolani, A.M., Suarez, R., Menoyo, E., Coutsiere, C., Sobral, A., y Hensen, I., 2005. The restoration of degraded mountain forests: effects of seed provenance and microsite characteristics on *Polylepis australis* seedling survival and growth in Central Argentina. *Restor. Ecol.* 13:129-135.
- Renison, D., Hensen, I. , Suarez, R., y Cingolani, A.M., 2006. Cover and growth habit of *Polylepis* woodlands and shrublands in the mountains of central Argentina: human or environmental influence? *J. Biogeogr.* 33:876-887.
- SER, 2002. The SER primer on ecological restoration. Society for Ecological Restoration International, Science and Policy Working Group, <http://www.ser.org/>.
- Tavarone, E.G., 2004. Análisis de la factibilidad de reintroducción del guanaco (*Lama guanicoe*) en el Parque Nacional Quebrada del Condorito. Master thesis. Universidad Nacional de Córdoba.
- Tongway, D.J., y Ludwig, J.A., 1996. Rehabilitation of semiarid landscapes in . I. Restoring productive soil patches. *Restor. Ecol.* 4:388-397.
- Van Wilgen, B.W., Marais, C., y Magadlela, D., 2002. Win-win-win: South Africa's Working for Water Programme. En *Mainstreaming biodiversity in development: Case studies from South Africa* (eds. Pierce, S. M., Cowling, R. M., Sandwith, T. y MacKinnon, K.), pp. 5-20, World Bank, Washington, DC.
- Westman, W., 1977. How much are nature's services worth? *Science* 197:960-964.
- Woodworth, P., 2006. *Working for Water in : Saving the world on a single budget?* *World Policy Journal* 31-43, 2006a.
- Yates, C.J., y Hobbs, R.J., 1997. Woodland restoration in the Western Australian wheatbelt: A conceptual framework using a state and transition model. *Restor. Ecol.* 5:28-35.