AEET
ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE ECOLOGÍA TERRESTRE

Ecosistemas 19 (2): 56-68. Mayo 2010.
http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=649

INVESTIGACIÓN

ecosistemas
REVISTA CIENTÍFICA Y TÉCNICA DE ECOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE
www.revistaecosistemas.net

El observatorio de cambio global de Sierra Nevada: hacia la gestión adaptativa de los espacios naturales

R. Aspizua [1], F.J. Bonet [2], R. Zamora [2], F.J. Sánchez [3], F.J. Cano-Manuel [3], I. Henares [3]

(1) EGMASA. Empresa de gestión medioambiental S.A. Junta de Andalucía. C/ Johan G. Gutenberg, 1, Isla de la Cartuja. E-41092 Sevilla, España
(2) Departamento de Ecología. Universidad de Granada. Centro Andaluz de Medio Ambiente. Avda. del Mediterráneo s/n. E-18006, Granada, España.
(3) Centro Administrativo Parque Nacional y Natural de Sierra Nevada. Carretera Antigua de Sierra Nevada, Km. 7, E-18191 Pinos Genil, Granada, España

Recibido el 16 de marzo de 2010, aceptado el 10 de abril de 2010.

Aspizua, R., Bonet, F.J., Zamora, R., Sánchez, F.J., Cano-Manuel, F.J., Henares, I. 2010. El Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada: hacia la gestión adaptativa de los espacios naturales. *Ecosistemas* 19(2):000-000.
Sierra Nevada es uno de los centros más importantes de diversidad ecológica y endemicidad de Europa, y constituye por ello un observatorio excepcional para estudiar el funcionamiento de sistemas y procesos naturales en un contexto de cambio global. Con vocación de largo plazo y buscando la colaboración permanente entre científicos y gestores, se constituye el Observatorio de Seguimiento de Cambio Global de Sierra Nevada. Su objetivo es obtener la información necesaria para identificar con la máxima antelación posible los impactos del cambio global, pudiendo así diseñar mecanismos de gestión que permitan minimizarlos. Se sustenta en cuatro pilares básicos: un programa de seguimiento de especies, ecosistemas y procesos clave; un sistema de información que transforme los datos generados por el anterior en conocimiento útil; una gestión activa adaptativa de los recursos naturales que a la vez ponga en práctica nuevas técnicas de gestión y retroalimente este conocimiento; unas herramientas eficaces de formación continua del personal responsable de la gestión del espacio y por último, unos mecanismos de difusión, que permitan trasladar a la sociedad tanto los resultados obtenidos como las metodologías de trabajo empleadas, posibilitando así la comparación con lo que ocurre en otros puntos del planeta.

Palabras clave: adaptación, Cambio global, montaña mediterránea, seguimiento de ecosistemas, Sierra Nevada.

Aspizua, R., Bonet, F.J., Zamora, R., Sánchez, F.J., Cano-Manuel, F.J., Henares, I. 2010. Sierra Nevada observatory for monitoring global change: towards the adaptive management of natural resources. *Ecosistemas* 19(2):000-000.
Sierra Nevada Observatory for Monitoring Global Change: towards the adaptive management of natural resources. Sierra Nevada is one of the most important hotspots of biological diversity and endemicity of the Iberian Peninsula and, thus, it constitutes an exceptional observatory to study the functioning of natural systems and processes under the current situation of global change. Sierra Nevada Observatory for Monitoring Global Change arises with long-term vocation and seeking permanent cooperation between scientists and managers. Its objective is to obtain the information that allows identifying the impacts of global change as early as possible, enabling the design of management mechanisms to minimize it. It rests on four pillars: a program to monitor key species, ecosystems and processes, an information system that processes the data generated by the former into useful knowledge, an active adaptive management of natural resources being at the same time result and feedback for this knowledge, some efficient tools for continuous formation of managers and, finally, effective spreading mechanisms that make possible to transfer society both the results obtained and the methodologies used, enabling comparison with other experiences occurring elsewhere in the world.

Keywords: adaptation, ecosystem monitoring, Global change, Mediterranean mountains, mitigation, Sierra Nevada.

Sierra Nevada: laboratorio de campo para el estudio del cambio global

Sierra Nevada ocupa unas 170.000 ha distribuidas en un total de 60 términos municipales repartidos entre las provincias de Granada y Almería (España). En 1986 fue declarado Reserva de la Biosfera por la UNESCO, y tres años después el Parlamento Andaluz le otorgó la figura de Parque Natural. En 1999 las 85.883 ha centrales fueron declaradas Parque Nacional

Ecosistemas no se hace responsable del uso indebido de material sujeto a derecho de autor. ISSN 1697-2473.

por las Cortes Generales, en representación de los ecosistemas de alta montaña mediterránea. Además, forma parte de la red europea 'Natura 2000' como Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) y Lugar de Importancia Comunitaria (LIC). En el año 2007, tras el traspaso de los Parques Nacionales a la Comunidad Autónoma, se creó el Espacio Natural Sierra Nevada como ámbito unitario de gestión del Parque Natural y del Parque Nacional Sierra Nevada. La **figura 1** muestra los principales hitos en la conservación del espacio, así como los límites de las figuras de protección existentes.

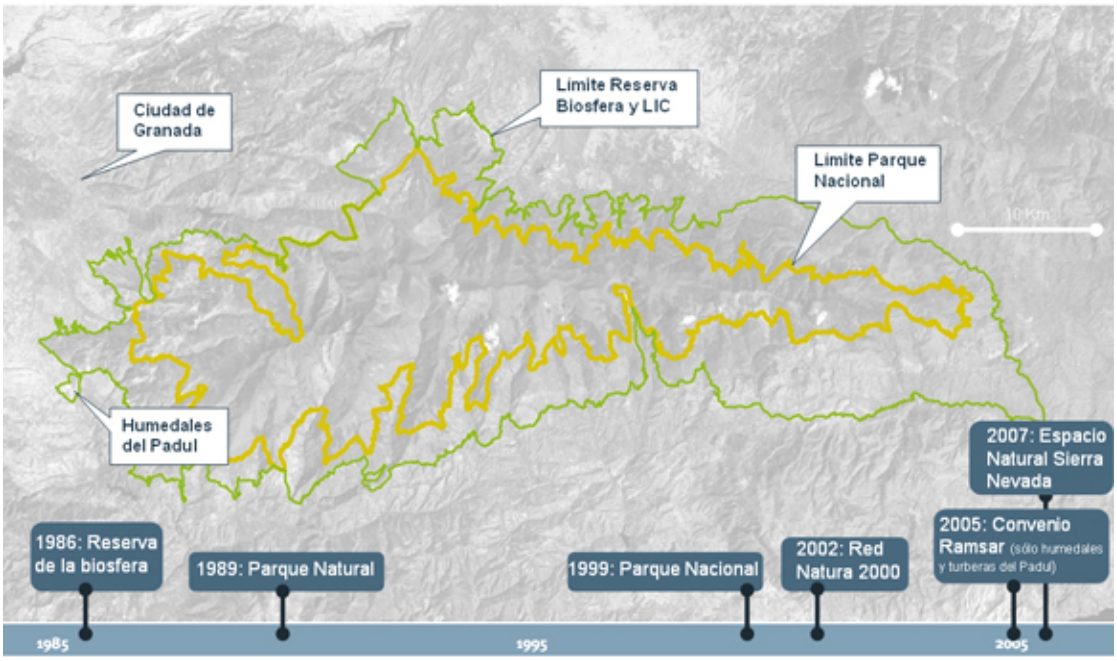

Figura 1. *Cronología de la protección de Sierra Nevada por distintas figuras nacionales e internacionales. También se muestran los límites del Espacio Natural.*

El macizo incluye la más alta cumbre peninsular: el Mulhacén, con 3.482 m, que lo convierte en el techo de la Península Ibérica. Constituye el área de mayor riqueza biológica y endemicidad de la Península, y una de las más importantes de toda Europa. Representa para la flora uno de los territorios con mayor importancia en el Mediterráneo occidental por la presencia de más de 2.200 taxones catalogados que se asocian en las 154 comunidades vegetales inventariadas hasta el momento, incluyendo más de 80 endemismos exclusivos (Blanca et al. 2001). En cuanto a la fauna, entre las más de 350 especies de invertebrados catalogadas hasta la fecha, se cuentan más de 270 endemismos (Ruano y Tinaut, 2003). Sin duda, es la cabra montés la especie de vertebrado más conocida de Sierra Nevada, donde atesora la población más importante del mundo, tanto por su variabilidad genética como por su tamaño.

La considerable altitud de Sierra Nevada y su proximidad al mar Mediterráneo propician la presencia de cinco de los seis pisos bioclimáticos de la Región Mediterránea, con la consiguiente variabilidad de ecosistemas que esto lleva aparejado. A las grandes diferencias climáticas inter e intranuales se unen unos muy diversos grados de antropización del paisaje, una gran complejidad geológica y, en general, grandes contrastes en los factores ecológicos. Todos estos factores convierten a este espacio protegido en un observatorio excepcional para estudiar los procesos naturales en un contexto de cambio global.

Antecedentes y origen del proyecto

El Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada tiene su origen en una iniciativa internacional auspiciada por la UNESCO, denominado GLOCHAMORE (GLObal CHAnge in MOuntain REgions). Este proyecto se inició en 2003, a través del programa MaB (Hombre y Biosfera) y tenía como finalidad última el desarrollo de protocolos de seguimiento de los efectos del cambio global en regiones de montaña. La filosofía del proyecto se basa en que las montañas son enclaves privilegiados para el estudio de los efectos del cambio global, dado que:

- Presentan gradientes altitudinales que reproducen cambios similares a los que ocurren a lo largo de los gradientes latitudinales, pero a una escala espacial mucho menor.
- En general están menos transformadas por el hombre que las tierras bajas.
- Son refugios de flora y fauna ya desaparecidas en otras zonas.
- Son escenarios muy sensibles a cambios ambientales por las complejas relaciones entre los componentes del sistema natural.

A escala europea y mundial, Sierra Nevada, por su latitud, altitud y características ecológicas y culturales, junto con el efecto de isla climática húmeda en un entorno seco, es un enclave de gran valor para el estudio del cambio global. Debido a esto, Sierra Nevada fue el único espacio español que se incorporó, junto a otras 27 Reservas de la Biosfera de montaña de todo el mundo, a esta Red Internacional. Esta iniciativa conjuga el seguimiento a largo plazo con la escala planetaria, teniendo en cuenta la dimensión humana junto a la biótica y buscando la conexión permanente entre científicos y gestores. Con estas premisas, los objetivos de GLOCHAMORE fueron:

- Desarrollar una estrategia para detectar señales de cambio global en ambientes de montaña.
- Evaluar las consecuencias del cambio global, tanto para los sistemas de montaña como para las tierras bajas adyacentes.
- Facilitar estrategias de uso sostenible de la tierra, agua y biodiversidad.

El principal resultado de este proyecto es una estrategia de investigación consensuada entre científicos y gestores de los espacios protegidos implicados que define tanto los ámbitos temáticos en los que centrar el seguimiento en regiones de montaña, como las metodologías recomendadas para asegurar que los resultados de dicho procedimiento sean comparables entre unos lugares y otros (Björnsen et al., 2005). Este documento fue el punto de partida del actual Observatorio de Seguimiento de Cambio Global Sierra Nevada. La participación en el proyecto GLOCHAMORE puso de manifiesto algo que ha marcado considerablemente la estructura y funcionamiento del Observatorio de Sierra Nevada: es fundamental abordar el estudio del cambio global aunando la perspectiva de la investigación científica con la gestión sostenible y activa de los recursos naturales. En otras palabras, es fundamental, por un lado, que los protocolos de seguimiento que se pongan en marcha estén avalados científicamente y, por otro, que suministren información útil para la toma de decisiones por parte de los gestores del territorio. Decisiones que a su vez desembocarán en actuaciones cuyo resultado podrá retroalimentar el proceso gracias a una filosofía de continua adaptación al cambio.

Actualmente y como continuación de GLOCHAMORE, el programa MaB de la UNESCO está promoviendo el proyecto 'Global Change in Mountain Sites (GLOCHAMOST)', destinado a examinar y poner en práctica estrategias de adaptación en Reservas de la Biosfera. En definitiva, se trata de implementar la anterior Estrategia GLOCHAMORE fomentando la cooperación y comunicación entre países tanto industrializados como en vías de desarrollo, facilitando la colaboración entre investigadores, gestores de reservas de la biosfera de montaña y comunidades afectadas por el cambio global (Schaaf, 2009). Sólo 10 Reservas de la Biosfera participan en el diseño esta iniciativa, habiéndose seleccionado junto a Sierra Nevada otros espacios en países como China, Alemania, India, Perú, Rusia, Suiza y Estados Unidos.

Respondiendo a la necesidad de abordar de manera coordinada los problemas relacionados con el cambio global, el Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino de España (MARM) puso en marcha, a través de la Fundación Biodiversidad, la 'Red de Seguimiento del Cambio Global en Parques Nacionales', en la que junto a Sierra Nevada participan los Parques Nacionales de Picos de Europa, Teide y Cabrera. Gracias a este proyecto se financió la instalación de 8 estaciones meteorológicas en Sierra Nevada, poniendo fin a la carencia histórica de registros automáticos de datos climáticos en regiones remotas de montaña. Mediante otras iniciativas el MARM también financió otras dos estaciones meteorológicas automáticas, así como un equipo específico para medición de flujos de carbono.

Desde el ámbito regional, la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía asumió la implementación de las directrices formuladas por la estrategia GLOCHAMORE, siendo hasta la fecha la administración ambiental que sustenta principalmente las actividades del Observatorio. Este apoyo se realiza a través de varias líneas de financiación dando como resultado la creación de equipos transdisciplinares: por un lado, es la empresa pública de dicha Consejería (EGMASA) la encargada de realizar buena parte del seguimiento de procesos y elementos en campo, a través de un importante equipo humano constituido por una docena de técnicos y otros tantos auxiliares de campo. Por otro lado, el Laboratorio de Ecología del Centro Andaluz de Medio Ambiente (CEAMA-UGR) asumió la responsabilidad de realizar tanto la coordinación científica de todas las tareas del Observatorio, como el diseño de un sistema de información que albergara todo el conocimiento generado. La Consejería de Medio Ambiente aporta a este equipo humano la experiencia de los gestores y técnicos del Espacio Natural Sierra Nevada, que dirigen e impulsan los trabajos, y también la de los Agentes de Medio Ambiente, que se encargan de realizar una parte cada vez mayor de los seguimientos en campo recibiendo formación específica para ello.

Objetivos y pilares básicos

La finalidad última del Observatorio de cambio global de Sierra Nevada es la de garantizar la obtención de la información necesaria para identificar con la máxima antelación posible los impactos del cambio global, con objeto de diseñar mecanismos de gestión que permitan minimizarlos y favorezcan la adaptación del sistema a los nuevos escenarios. Para lograr esto, se plantean los siguientes objetivos generales:

- Evaluar el funcionamiento de los ecosistemas del Espacio Natural Sierra Nevada, sus procesos naturales y su dinámica, en un horizonte temporal de medio plazo.
- Conocer la dinámica poblacional, variaciones fenológicas y problemática de conservación de diversos organismos clave como indicadores de procesos ecológicos que pueden verse afectados por el cambio climático y, de manera más amplia, de los efectos del cambio global que se está produciendo y que previsiblemente irán en aumento en el futuro.
- Identificar, con la máxima antelación posible, los posibles efectos del cambio global en las especies, ecosistemas y recursos naturales monitoreados, proporcionando una visión de las tendencias del cambio que permita construir capacidad de adaptación en el conjunto del ecosistema.
- Diseñar mecanismos para evaluar la efectividad y eficacia de las actividades de manejo llevadas a cabo en Sierra Nevada, con objeto de proponer los ajustes pertinentes para implementar un modelo de gestión adaptativa.
- Proporcionar información básica para aquellas tareas periódicas de planificación del espacio: planes rectores de uso y gestión, planes sectoriales, planes de recuperación de especies, planes de desarrollo sostenible, etc.
- Contribuir a la difusión de la información de interés general que mejore el conocimiento de los valores e importancia de Sierra Nevada.

La consecución de estos objetivos requiere, en primer lugar, el diseño y puesta en funcionamiento de un programa de seguimiento de los efectos del cambio global en Sierra Nevada. La información generada por este conjunto de metodologías de seguimiento ha de ser transformada en conocimiento útil para que los gestores del espacio lleven a cabo una gestión activa y adaptativa de los recursos naturales. Para ello, es fundamental que todos los datos recopilados sean integrados y analizados en el contexto de un sistema de información asociado al proyecto. Por último, es muy importante trasladar a la sociedad tanto los resultados que se obtengan como las metodologías de trabajo, mediante mecanismos eficaces de difusión.Estos cuatro elementos (programa de seguimiento, gestión adaptativa, sistemas de información y difusión) son los pilares básicos del Observatorio del cambio global de Sierra Nevada (**Fig. 2**). En los siguientes apartados los describimos con más detalle.

Figura 2. *Se muestran los cuatro pilares que definen el Observatorio de Seguimiento de Cambio Global en Sierra Nevada. El programa de seguimiento genera datos que son procesados por el sistema de información para generar conocimiento útil para la gestión de los recursos naturales. Los datos normalizados se integran en bases de datos de libre acceso, para facilitar su consulta.*

Programa de Seguimiento

El diseño de mecanismos de adaptación frente al cambio global requiere la disponibilidad de información relevante sobre la estructura y dinámica de los distintos elementos y procesos que constituyen los ecosistemas del espacio en cuestión. Por ello, el diseño de un programa de seguimiento que recopile información sobre estos aspectos es la primera tarea importante a abordar. El diseño de este programa de seguimiento se basó en los ámbitos temáticos propuestos por el proyecto GLOCHAMORE. Para cada uno de esos ámbitos temáticos se definieron metodologías de seguimiento con objeto de evaluar tanto el estado de funciones ecológicas clave, como la estructura de los principales ecosistemas nevadenses. Estas metodologías son validadas por parte de la coordinación científica del Observatorio. Su puesta en práctica corre a cargo del órgano de gestión del Parque Nacional y Parque Natural de Sierra Nevada.

Con esta filosofía se ponen las bases de un programa de seguimiento que recopila información relevante sobre el estado actual de los ecosistemas. Esta perspectiva de 'presente hacia futuro' es muy interesante, pero debe complementarse con una visión retrospectiva que nos permita conocer el estado de dichos ecosistemas en el pasado. Un programa de seguimiento sólido debe permitir a sus usuarios conocer el pasado, para comprender el presente y tratar de adaptarse al futuro. Esto es especialmente importante en ecosistemas mediterráneos como el que nos ocupa, que han sido secularmente manejados por el ser humano.

La primera fase del programa de seguimiento se inició en 2008 y finaliza en mayo de 2010. El principal logro de esta primera fase ha sido la consolidación de una veintena de metodologías de seguimiento de procesos ecológicos (**Fig. 3**). En buena parte de ellas hay datos procedentes de al menos dos campañas de campo, lo cual ha permitido validar su aplicabilidad. También se ha realizado una intensa tarea de recopilación de información antigua sobre varios ámbitos temáticos (usos del suelo, nieve, climatología, etc.), que nos ha permitido adquirir un conocimiento preliminar del funcionamiento de algunos elementos clave de Sierra Nevada (Bonet y Cayuela, 2009). La aplicación de estas metodologías en el territorio genera una gran cantidad de puntos de muestreo distribuidos por todo el espacio. La **Figura 4** representa gráficamente esos puntos y da una idea del es esfuerzo de muestreo que se está realizando.

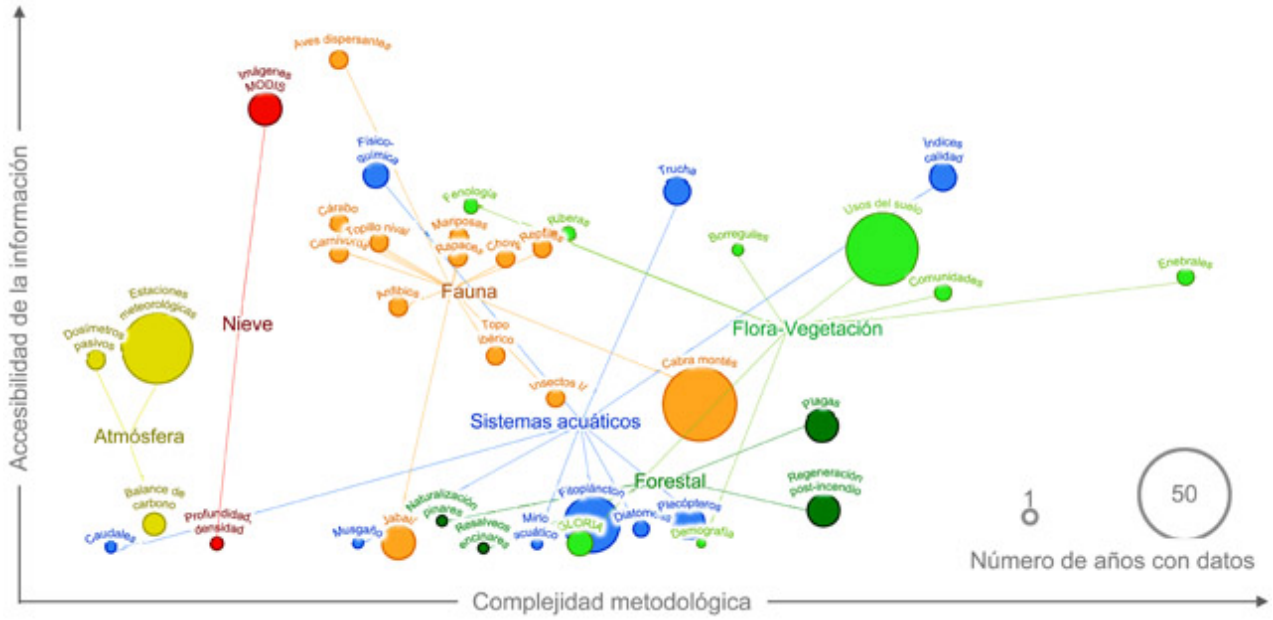

Figura 3. *Gráfica que muestra las distintas metodologías puestas en funcionamiento durante la primera fase del proyecto. En el eje X se representa la complejidad relativa de cada una de ellas. Observamos que las más complejas son las relacionadas con el seguimiento de comunidades vegetales, como los enebrales. En el eje Y se representa la accesibilidad de la información generada por parte de los usuarios. Es una forma de indicar el grado de integración de la información obtenida en el sistema de información que se está creando. Los datos procedentes del seguimiento de la nieve mediante MODIS y los de aves dispersantes son los más fácilmente accesibles por ahora. El tamaño de los círculos representa la cantidad de años para los cuales se tiene información. En este sentido destacan los datos climáticos, los de la cabra montés y los de cambios de uso del suelo. Las líneas entre los elementos indican que éstos están incluidos en el mismo ámbito temático (flora, fauna, sistemas acuáticos, etc.).*

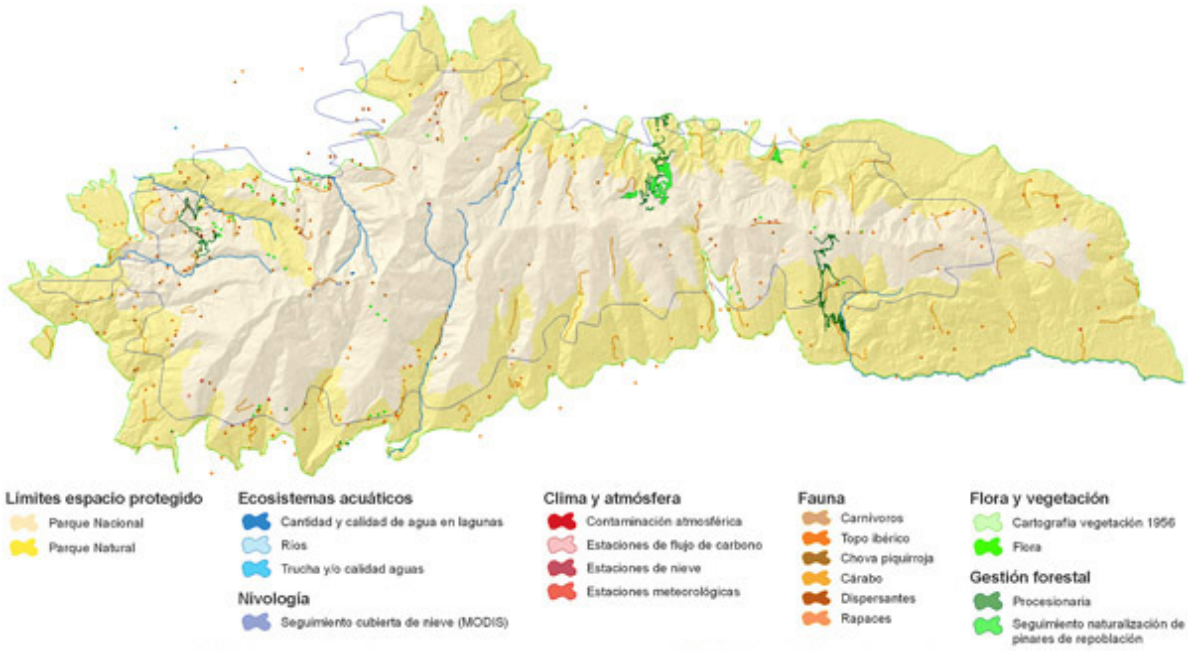

Figura 4. *Mapa que muestra la distribución espacial de la recogida de información dentro del Observatorio del cambio global de Sierra Nevada. Se presentan las distintas estaciones meteorológicas, puntos de muestreo, transectos y trabajos de fotointerpretación que alimentan al programa de seguimiento. En cuanto a la distribución del seguimiento en el espacio el diseño ha tenido en cuenta la enorme heterogeneidad del macizo montañoso. Así, las unidades de muestreo se distribuyen a lo largo de los cinco pisos bioclimáticos presentes en Sierra Nevada, en los diferentes tipos de ecosistemas existentes, incluyendo también las diferentes exposiciones y, en la medida de lo posible, incorporando la máxima diversidad ambiental.*

Gestión de la información generada

Paralelamente a la recopilación de información sobre el estado y estructura de los sistemas naturales de Sierra Nevada, se está elaborando un sistema de información que pretende ser el repositorio donde se almacene toda esta información. La finalidad última de esta herramienta es la de suministrar a los gestores información útil (= conocimiento) para mejorar la forma en la que se manejan los recursos naturales de Sierra Nevada. Este conocimiento se obtiene tras el procesamiento y análisis de los datos en bruto obtenidos por el programa de seguimiento anteriormente descrito.

La filosofía de este sistema de información es la de almacenar tanto los datos en bruto capturados por los distintos protocolos de seguimiento, como la información sintética generada tras el análisis de los primeros. De esta forma pretendemos satisfacer tanto las necesidades de los científicos (que casi siempre prefieren datos brutos) como las de los gestores (que necesitan información sintética para tomar decisiones). También consideramos muy importante caracterizar y documentar todos los procesos que permiten transformar los datos brutos en conocimiento útil.

El Sistema de Información se basa en el diseño de procedimientos para almacenar de manera coherente la información generada por el programa de seguimiento. Para ello se usan bases de datos relacionales, cuya estructura es compatible con la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM, que es el sistema de información propio de la Consejería de Medio Ambiente). Estas bases de datos están documentadas mediante los estándares de metadatos utilizados por la red LTER (Fegraus et al., 2005). Los algoritmos que permiten analizar y procesar los datos anteriores son también documentados y ejecutados de forma automatizada gracias al uso de aplicaciones de gestión de flujos de trabajo (Barseghian et al., 2010). Además de los datos tomados en virtud de las metodologías del programa de seguimiento, se genera gran cantidad de información difícilmente normalizable en una base de datos. Un proyecto como el que nos ocupa genera muchos documentos de texto, presentaciones de diapositivas, bibliografía, videos, imágenes, etc. Es de gran interés incluir toda esta información en el repositorio que estamos describiendo. Para ello hemos recurrido a las herramientas propias de la web 2.0, ya que permiten la edición colaborativa de documentos y la asignación de etiquetas para la clasificación de los mismos (Pérez-Luque et al., 2009). En este sentido, los integrantes del proyecto mantienen de manera colaborativa una wiki (www.observatoriosierranevada.iecolab.es) en la que se muestran tanto las metodologías aplicadas como los resultados obtenidos. Otro ejemplo interesante es el de la gestión de la bibliografía. Contamos con una base de datos centralizada (www.refbase.iecolab.es) que recopila más de mil referencias bibliográficas de interés y que también es mantenida

colaborativamente. El último paso que hemos contemplado en la estructura del sistema de información es el de la difusión de la misma. No sólo es importante tener perfectamente documentados los datos que genera el programa de seguimiento, sino que también es importante poner en práctica procedimientos para difundir tanto los datos en bruto como los resultados obtenidos. Para ello utilizamos herramientas que permiten generar mapas dinámicos, gráficas visualmente atractivas y otros elementos propios de la disciplina denominada 'visualización funcional de la información' (Woolman, 2002).

La **figura 5** muestra los elementos básicos del sistema de información que estamos elaborando. Para obtener más detalle sobre la filosofía de gestión de la información en los programas de seguimiento del cambio global, remitimos al lector al artículo denominado 'Gestión de la información ambiental en los espacios protegidos y en las redes de seguimiento del cambio global' publicado en este mismo monográfico (Bonet y San Gil, 2010).

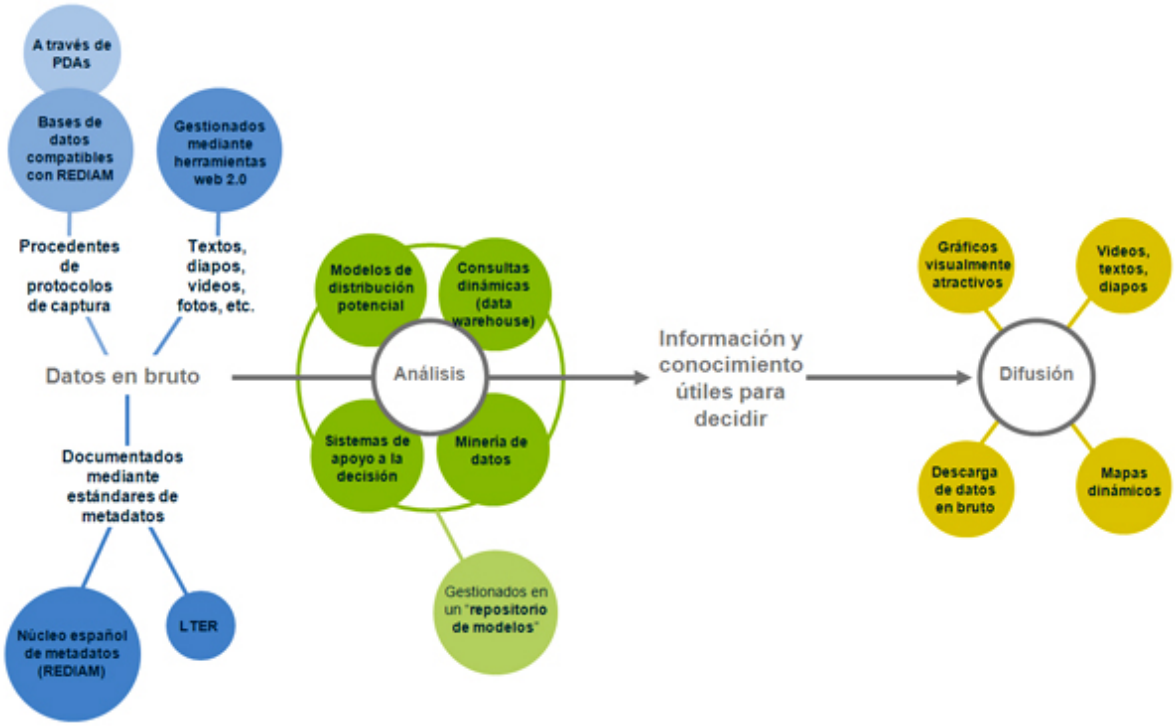

Figura 5. *Estructura del sistema de información que apoya al Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada. Se muestran los distintos elementos que permiten convertir los datos brutos en conocimiento útil para la gestión del espacio.*

Gestión adaptativa

Dado el profundo impacto que el ser humano está ejerciendo sobre los sistemas de soporte de vida del planeta, en una época en la que el ritmo, la escala, los tipos y combinaciones de cambios que están ocurriendo son fundamentalmente diferentes a los de cualquier otro periodo de la historia (Speth, 2002), nos encontramos ante un nuevo imperativo ético. El dominio que la humanidad ejerce sobre el sistema Tierra implica que no podamos eludir la responsabilidad de gestionarlo (Vitousek et al., 1997).

En un panorama como el actual, en el que el cambio es una evidencia constatada (sobreexplotación de recursos, cambio climático, pérdida de biodiversidad, cambios de uso del suelo, contaminación, etc…), la gestión responsable de los recursos debe incorporar necesariamente el cambio tanto en sus planteamientos teóricos como en las actuaciones concretas.

Frente a la tradicional gestión con insuficiente seguimiento practicada tradicionalmente por las administraciones públicas, que combina observaciones casuales con experiencias a menudo poco o nada documentadas y basada en políticas establecidas legalmente (Lee, 1999), surge por primera vez en 1978 el concepto de *gestión adaptativa* (Holling, 1978). Este concepto está basado en la puesta en marcha de políticas a modo experimental, como innovación metodológica dentro de la gestión de los recursos. El enfoque se centra en el conocimiento científico sobre los ecosistemas naturales y en la experiencia adquirida experimentalmente en campo. Pasa por admitir la falta de conocimiento inequívoco y definitivo sobre la manera en la que funcionan los ecosistemas y reconocer la incertidumbre que domina nuestra interacción con ellos. El principio central de la gestión adaptativa es, por tanto, una actitud abierta, analítica y basada en la experimentación (Borrini et al., 2007). Se trata de

una aproximación sistemática y rigurosa que busca aprender de los resultados de la actuaciones sobre los recursos naturales, mejorando su gestión mediante la adaptación al cambio. Implica una síntesis del conocimiento existente, explorando las acciones alternativas y realizando prediciones explícitas sobre los resultados. Así, actuaciones de gestión y programas de seguimiento se diseñan cuidadosamente para generar una retroalimentación fiable que además ponga de manifiesto los efectos sobre los procesos naturales afectados. Las actuaciones y los objetivos se reajustan nuevamente a la luz del nuevo conocimiento obtenido. Asimismo, tanto las decisiones tomadas como las actuaciones realizadas y los resultados de la gestión han de ser cuidadosamente documentados y difundidos para permitir la transmisión del conocimiento obtenido con la experiencia (Nyberg, 1999).

La forma más efectiva de gestión adaptativa es la gestión 'activa' adaptativa, que utiliza los programas de gestión diseñados para comparar experimentalmente diferentes políticas o prácticas para la evaluación de hipótesis alternativas acerca del sistema objeto de gestión (Nyberg, 1998).

Los elementos básicos de una gestión activa adaptativa podrían resumirse en:

- Objetivos explícitos de gestión de los recursos naturales e hipótesis explícitas para su consecución (incluyendo indicadores de seguimiento).
- Toma de datos inmediata (indicadores de seguimiento).
- Evaluación sobre la marcha de los resultados del seguimiento. Mejora del conocimiento de los procesos naturales que rigen los sistemas ecológicos objeto de gestión.
- Ajuste de actividades e incluso políticas de gestión de los recursos naturales mediante cambios coherentes con los resultados obtenidos y las lecciones aprendidas. También puede implicar ajuste de recursos.
- Documentación de proceso y resultados.
- Difusión del conocimiento obtenido y acceso a los datos a expertos en la materia.

Tal vez lo más importante de este tipo de gestión sea su componente cíclica, que se plasma en la **figura 6** (adaptado de Nyberg 1999):

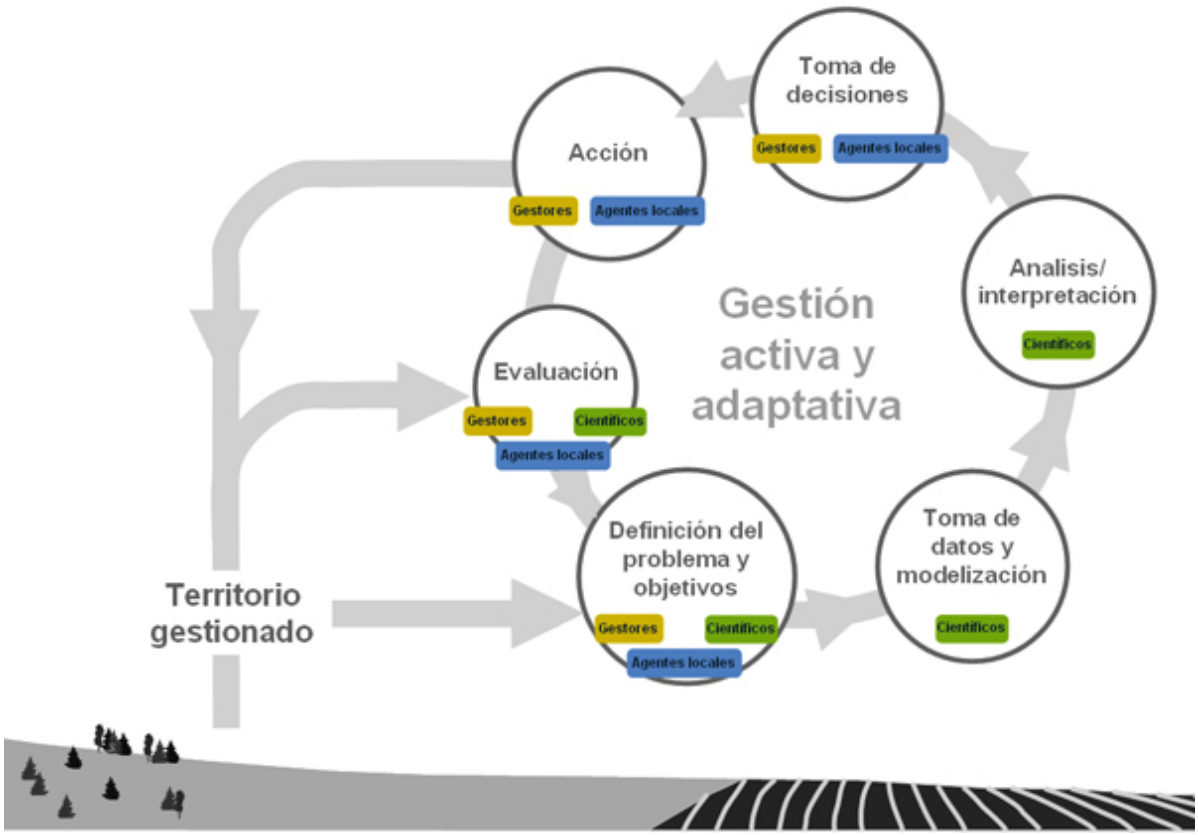

Figura 6. *Esquema que representa el ciclo de gestión adaptativa cuya implantación es la finalidad última de nuestro proyecto.*

Partiendo de este marco conceptual, el Observatorio de Seguimiento del Cambio Global en Sierra Nevada ha incorporado la gestión adaptativa a sus planteamientos teóricos y a las actuaciones prácticas de gestión. Esta nueva orientación se refleja tanto en los modelos de inversión como en la mentalidad con la que se manejan los recursos. Como consecuencia de esta implicación, varios son los ejemplos que ilustran este enfoque en el manejo de los recursos naturales del espacio protegido.

El primer ejemplo de gestión activa adaptativa que describiremos es el tratamiento experimental realizado tras el incendio ocurrido en Lanjarón en septiembre de 2005, en el que más de 3000 ha, en su mayor parte pinares de repoblación, resultaron calcinadas por el fuego. Una de las cuestiones que se plantearon tras el incendio fue conocer el papel que tiene la madera muerta en la regeneración natural tras un evento de estas características, ya que aunque la restauración tradicional incluye la corta y saca de los troncos quemados, junto con el astillado de ramas, existen muy pocos estudios que evalúen la idoneidad de este procedimiento con carácter general. Es importante conocer si estas actuaciones condicionan el reclutamiento de plántulas y rebrotes, así como su efecto sobre la diversidad y el reciclaje de nutrientes (Castro et al., 2009, 2010). Para ello, se planteó un experimento a gran escala en el que se estudió la respuesta del ecosistema ante tres tratamientos diferentes: (a) la tradicional corta y saca de madera y astillado de ramas; (b) corta de la mayor parte de los árboles, dejando restos de ramas apiladas cubriendo aproximadamente un tercio del suelo así como algunos árboles en pie dispersos que actuaran como percha para los animales dispersantes de semillas; y (c) ni corta ni extracción, dejando los árboles quemados en pie. Se marcaron así 9 parcelas (en la **figura 7** se muestra una imágen aérea), con tres réplicas de cada tratamiento, ocupando la superficie experimental un total de 112 ha que se excluyeron del tratamiento tradicional efectuado en el resto del territorio. En dichas parcelas experimentales se ha evaluado el impacto de los distintos manejos sobre la capacidad de regeneración vía rebrote y vía semilla, el éxito de establecimiento de plantones repoblados, y la diversidad de la comunidad. Se han cuantificado además diversos parámetros bióticos y abióticos como disponibilidad de nutrientes y agua, radiación, compactación del suelo, y tasas de descomposición de la madera. Finalmente, se está realizando una valoración de los costes económicos de ejecución y mantenimiento de las labores realizadas, lo que permitirá incorporar parámetros ecológicos, económicos y de gestión para la elaboración de los modelos de restauración más adecuados.

Figura 7. *Imagen aérea que muestra la distribución de las parcelas de regeneración post incendio en Lanjarón.*

Otro ejemplo de gestión activa para construir capacidad de adaptación, esta vez aplicada a una superficie mayor, es la realización de proyectos de conservación y mejora de masas de robledal, enebral y sabinar para su mejor adaptación a los impactos del cambio global. Estas formaciones vegetales se encuentran en una situación de estancamiento e incluso de

degradación motivada por las condiciones ambientales y los cambios de usos del suelo. Han sufrido una disminución en cuanto a su distribución territorial y se ha observado una mayor presencia en la comunidad de especies oportunistas o acompañantes. En concreto, los robledales de Sierra Nevada, distribuidos por una parte del macizo entre los 1.000 y 2.000 metros de altitud, se localizan en el límite más meridional de su área de distribución natural y están sometidas a unas presiones de cambio en los últimos tiempos, sobre todo asociadas a un mayor déficit hídrico. Se ven afectados por el alargamiento del periodo seco, que coincide con el periodo vegetativo de la especie. Esto ocasiona un debilitamiento general de las masas, pérdida de capacidad reproductiva y una mayor predisposición a ataques de agentes nocivos (plagas de defoliadores principalmente).

Con el objetivo de mejorar la resiliencia de este tipo de ecosistemas y favorecer su regeneración en las cambiantes condiciones de la alta montaña donde habitan, se realizan cortas de liberación y saneamiento, desbroces selectivos para disminuir la competencia y tanto siembras como plantaciones para favorecer la persistencia de las especies de roble, enebro y sabina en aquellos emplazamientos que, según las predicciones arrojadas por los modelos climáticos desarrollados para Sierra Nevada (Benito de Pando, 2009) les serán más favorables en las décadas sucesivas.

Quizá lo más novedoso de estas actuaciones sea la combinación de diversos tipos de tratamientos en función de las características de la zona. En efecto, para la mejora y recuperación de las formaciones vegetales arbóreas y arbustivas de Sierrra Nevada se han diseñado una serie de actuaciones encaminadas a aumentar su diversidad tanto específica como estructural, mejorando de este modo su capacidad de adaptación al cambio climático. Así, actuando sobre más de 1.300 hectáreas, se realizan claras y clareos en pinares de repoblación para favorecer los mecanismos de restauración pasivos (dispersión de semillas por animales, dispersión anemócora) que permitan la naturalización de las repoblaciones con propágulos provenientes de la vegetación nativa cercana. También se están llevando a cabo resalveos en robledales (*Quercus pyrenaica*) para que recuperen su vigor vegetativo y su capacidad de producir bellotas. En las zonas más degradadas se realizan plantaciones en bosquetes irregulares en forma y heterogéneos en su composición específica, variando la proporción de éstas según el grado de evolución de las unidades de actuación. Los bosquetes se combinan con plantaciones mediante núcleos de dispersión (naturales o plantados) que incluyen una mezcla de especies arbustivas y arbóreas, complementado todo ello con siembras de diversificación y enriquecimiento, que son tanto más densas cuanto mayor es la degradación de la zona.

Divulgación

Creemos que una parte importante del éxito de un proyecto como el que nos ocupa tiene mucho que ver con la forma en la que se dan a conocer tanto los objetivos como los resultados del mismo. Por ello damos gran importancia a todas las tareas relacionadas con la divulgación.

Para que la divulgación tenga éxito, es importante definir previamente cuáles serán las 'dianas' de dicha difusión de resultados. En nuestro caso, son las siguientes:

- Público en general: Es importante concienciar a la sociedad de la importancia que tiene Sierra Nevada como proveedor de servicios ecosistémicos claves (por ejemplo, captación de agua) para buena parte de Andalucía Oriental, y de sustento de una parte importante de las actividades humanas que ocurren en el macizo. Por ello es clave diseñar mecanismos para hacer llegar a este público tanto los objetivos como los resultados obtenidos por el Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada.
- Gestores: según la filosofía del proyecto, los gestores del espacio han de ser los principales receptores de resultados. La idea básica es que el Observatorio de Sierra Nevada suministre conocimiento útil para mejorar la forma en la que los gestores toman decisiones sobre el manejo de los recursos naturales.
- Científicos: la singularidad ecológica de Sierra Nevada hace que sea un importante foco de interés para los científicos de diversas disciplinas, por lo que el proyecto que nos ocupa también ha de tener en cuenta sus necesidades. Éstas suelen ser el acceso a los datos brutos generados por el programa de seguimiento.

Teniendo en cuenta estos tres principales receptores de los resultados del Observatorio, podemos distinguir distintas modalidades de divulgación, formación de capital humano, difusión o comunicación:

- Tareas de divulgación: se refieren al conjunto de procedimientos encaminados a poner al alcance del público en general los resultados del Observatorio. Las principales herramientas que utilizamos en este sentido son la wiki del proyecto y las publicaciones en la prensa convencional. También se han realizado varios documentales sobre el trabajo del Observatorio en la televisión autonómica andaluza.
- Tareas de formación de capital humano: hemos iniciado un proceso de formación continua mediante reuniones periódicas en grupos de trabajo, talleres y seminarios, experiencias de demostración, cursos reglados, etc., que tiene el doble objetivo de: 1) actualizar el conocimiento científico- técnico del personal involucrado en el programa de seguimiento (técnicos del Parque Nacional y Parque Natural, técnicos de EGMASA, Agentes de Medio Ambiente..), 2)

intercambiar experiencias y conocimientos y compartir los problemas relacionados con el desarrollo del proyecto entre los investigadores, gestores y técnicos que en él participan, con la finalidad de generar sinergias entre los diferentes colectivos, y poder así tomar decisiones desde perspectivas realmente interdisciplinares. La formación reglada ha abordado cuestiones de interés relevante para científicos y gestores, incidiendo en aquellos aspectos metodológicos o instrumentales que no son cubiertos por otros cursos. Así, en el Centro Andaluz de Medio Ambiente (CEAMA-UGR) hemos impartido cursos de análisis espacial con R, comunicación científica, herramientas web 2.0, bases de datos, etc. Estas actividades formativas han sido organizadas en colaboración con diversas entidades, como la Asociación Española de Ecología Terrestre, Universidad Internacional de Andalucía, CENEAM, etc.

- Tareas de difusión: Consideramos que la difusión constituye el conjunto de actividades encaminadas a poner los resultados del Observatorio al alcance de otros profesionales de la gestión e investigación de los recursos naturales, y de la sociedad en general. En este sentido, se han realizado varias comunicaciones a congresos (Bonet y Cayuela, 2009; Bonet et al. 2009; Navarro y Bonet 2009; Pérez-Luque et al. 2009), así como publicaciones en revistas del ámbito de la gestión (Aspizua et al. 2007; Sánchez-Gutiérrez et al. 2009). Pero la herramienta de difusión más importante es un portal web (http://apps.iecolab.es/linaria), que permitirá consultar y descargar toda la información recopilada por el Observatorio de Sierra Nevada.
- Tareas de comunicación: incluimos aquí aquellas actividades que pretenden una interacción directa entre el emisor y el receptor de la información. En este caso no se trata sólo de emitir una información dada (como ocurre en los dos casos anteriores), sino que se intenta que haya una posible respuesta por parte de los usuarios. Para contemplar esto tratamos de incorporar la filosofía de la web 2.0 y de las redes sociales a las herramientas de divulgación y difusión. Nuestra principal herramienta de comunicación es la wiki del proyecto, que permite la edición colaborativa de contenidos. Dentro de este grupo también podemos incluir los talleres y jornadas preparados para intercambiar experiencias con otros programas de seguimiento similares.

El Observatorio de Sierra Nevada como nodo de otras redes de seguimiento

El Observatorio de Sierra Nevada surge como consecuencia de la confluencia de dos intereses: por un lado los gestores y científicos que desarrollan su trabajo en Sierra Nevada ponen de manifiesto su interés en que el Observatorio que hemos descrito sea una realidad. Al mismo tiempo hay otras iniciativas que surgen de instituciones internacionales (GLOCHAMORE, auspiciado por la UNESCO), y que propiciaron la puesta en marcha de este proyecto. La resultante de estas dos tendencias (bottom up y top down) es la creación de un proyecto que desarrolla su actividad en un ámbito territorial concreto, pero que pone en práctica metodologías compatibles con otros espacios y que además muestra una gran vocación colaborativa con otras iniciativas similares.

Esta vocación se pone de manifiesto con la implicación del Observatorio de Sierra Nevada en el diseño y puesta en marcha de otros proyectos similares tanto a escala regional como nacional. La filosofía de nuestro proyecto se traslada a otros proyectos de similar concepción, como el denominado GLOCHARID, que pretende poner en marcha un programa de seguimiento en el sureste árido de Andalucía. Este proyecto está también financiado por la Consejería de Medio Ambiente de Andalucía y ejecutado parcialmente por la Universidad de Almería. También estamos contribuyendo a la creación y consolidación de la Red de Observatorios de Cambio Global en Andalucía, colaborando particularmente con el Programa de Seguimiento de la ICTS de Doñana. A escala estatal, el Observatorio de Sierra Nevada forma parte de LTER España y también está implicado en el Programa de Seguimiento auspiciado por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el permanente apoyo de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía mediante las diferentes fórmulas de financiación mencionadas, así como al Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino de España por su importante dotación de instrumental científico aportado por la Red de Seguimiento del Cambio Global en Parques Nacionales. También a la Universidad de Granada por su importante contribución en la vertiente científica del proyecto a través del Centro Andaluz de Medio Ambiente y, por último, al entusiasta apoyo del personal del Espacio Natural de Sierra Nevada y de la empresa pública Egmasa.

Referencias

Aspizua, R.; Cano, F.J.; Bonet, F.J.; Zamora, R. & Sánchez, J. 2007. Sierra Nevada: Observatorio internacional de seguimiento del cambio global. *Revista Medio Ambiente* 57:21-25.

Barseghian D., Altintas, I., Jones, M.B., Crawl, D., Potter, N., Gallagher, J., Cornillon, P., Schildhauer, M., Borer, E.T., Seabloom, E.W., Hosseini, P.R. 2010. Workflows and extensions to the Kepler scientific workflow system to support environmental sensor data access and analysis. *Ecological Informatics* 5:42-50.

Benito de Pando, B. 2009. *Ecoinformática apicada a la conservación: Simulación de efectos del cambio global en la distribución de la flora de Andalucía*. Tesis doctoral. Universidad de Granada. España.

Björnsen A., Becker, A., Brun, J., Bugmann, H., Dedieu, J., Grabherr, G., Haeberli, W., 2005. GLOCHAMORE, *Global Change and Mountain Regions. Research Strategy*. 31 pp. UNESCO Man and the Biosphere (MAB) Programme, and the UNESCO International Hydrological Program (IHP). Ed. GLOCHAMORE Scientific Project Manager. Zürich, Switzerland, SC/EES/TS/5865/6.2.

Blanca, G.; López, M.R.; Lorite, J.; Martínez, M. J.; Molero, J.; Quintas, S.; Ruíz, M.; Varo, M. A.; Vidal, S. 2001. *Flora amenazada y endémica de Sierra Nevada*. 401 pp. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y la Universidad de Granada. España.

Bonet, F.J., San Gil, I. 2010. Gestión de la información ambiental en los espacios protegidos y en las redes de seguimiento del cambio global. *Ecosistemas* 19(2):000-000.

Bonet, F.J. y Cayuela, L. 2009. Seguimiento de la cubierta de nieve en Sierra Nevada: tendencias en la última década y posibles implicaciones ecológicas de las mismas. En: *Actas del IX Congreso Nacional de la Asociación Española de Ecología Terrestre: La dimensión ecológica del desarrollo sostenible: Ecología, del conocimiento a la aplicación*. pp. 193. Úbeda, 18-22 Octubre 2009, AEET, España.

Bonet, F.J., Villegas Sánchez, I., Navarro, J., Zamora R. 2009. Breve historia de la gestión de los pinares de repoblación en Sierra Nevada. Una aproximación desde la ecología de la regeneración. En: S.E.C.F-Junta de Castilla y León (eds.), *Actas del 5º Congreso Forestal Español* - Montes y Sociedad: Saber qué hacer. Ref: 5CFE01-184 1-13. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Pontevedra. ISBN: 978-84-936854-6-1.

Borrini, G., Farvar, M.T., Nguinguiri, J.C., Ndangang, V.A. 2007. *Comanagement of natural resources: Organising, negotiating and learning-by-doing*. GTZ-IUCN, Kasparek Verlag, Heidelberg. Alemania.

Castro, J. , Navarro-Cerrillo, R., Guzmán-Álvarez, J.R., Zamora, R., Bautista, S. 2009. ¿Es conveniente retirar la madera quemada tras un incendio forestal?. *Quercus* 282:38-43.

Castro, J., Allen, C.D., Molina-Morales, M., Marañón, S., Sánchez, Á., Zamora, R. 2010. Salvage log7ing versus the use of burnt wood as a nurse object to promote post-fire tree seedling establishment. *Restoration Ecology* (en prensa) 00:000-000.

Fegraus, E.H., Andelman, S., Jones, M.B., Schildhauer, M. 2005. Maximizing the value of ecological data with structured metadata: An introduction to ecological metadata language (EML) and principles for metadata creation. *Bulletin of the Ecological Society of America* 86:158-168.

Holling, C.S. 1978. *Adaptive environmental assessment and management*. 377 pp. John Wiley and Sons, New Cork, UK.

Lee, K.N. 1999. Appraising adaptive management. *Conservation Ecology* 3(2): artículo 3. Disponible en: http://www.consecol.org/vol3/iss2/art3/

Navarro, I., Bonet, F.J. 2009. Caracterización de la evolución histórica de la cubierta vegetal y los usos del suelo de Sierra Nevada en un contexto de cambio global. En: *Actas del IX Congreso Nacional de la Asociación Española de Ecología Terrestre: La dimensión ecológica del desarrollo sostenible: Ecología, del conocimiento a la aplicación*. pp. 192. Úbeda, 18-22 Octubre 2009, AEET, España.

Nyberg, J.B. 1998. Statistics and the practice of adaptive management. En: Sit, V., Taylor, B. (eds.), *Statistical methods for adaptive management studies*, pp. 1-7. Land Management Handbook 42, B.C. Ministry of Forests, Victoria, BC. Canadá

Nyberg, B. 1999. *An introductory guide to adaptive management. Forest practices branch*. 24 pp. B.C. Forest Service, Canadá.

Pérez-Luque, A.J., Bonet, F.J., Zamora, R. 2009. Herramientas colaborativas para la creación de conocimiento útil para la gestión en el proyecto de Seguimiento del Cambio Global en Sierra Nevada. En: *Actas del IX Congreso Nacional de la Asociación Española de Ecología Terrestre: La dimensión ecológica del desarrollo sostenible: Ecología, del conocimiento a la aplicación*. pp. 185. Úbeda, 18-22 Octubre 2009, AEET, España.

Ruano, F., Tinaut, A. 2003. Historia de la entomología en Sierra Nevada (Sur de España) de 1813 a 2000. *Boletín de la Asociación Española de Entomología* 27(1-4):109-126.

Sánchez-Gutiérrez, F.J., Henares-Civantos, I., Cano-Manuel, F.J., Zamora, R.; Bonet, F.J., Aspizua, R. 2009. El observatorio de cambio global de Sierra Nevada. *Revista Medio Ambiente* 63:16-19.

Schaaf, T. 2009. *Mountain biosphere reserves - A people centred approach that also links global knowledge*. Sustainable Mountain Development No. 55, International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD).

Speth, J.G. 2002. The global environmental agenda: Origins and prospects. En: Esty, D.C., Ivanova, M.H. (eds.), *Global environmental governance: Options and opportunities, pp. 1-30.* New Haven, CT: Yale School of Forestry and Environmental Studies. New Haven, USA. ISBN0-9707882-2-3.

Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J., Melillo, J.M. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277 (5325):494-499.

Woolman M. 2002. *Digital information graphics*. Watson-Guptill. New York, USA.

Zamora, R., Sánchez, F.J. 2009. El valor de los Espacios Protegidos de montaña en un escenario de cambio global. *Ecosistemas* 18(3):35-37.