

Capítulo X

La metodología cartográfica y el empleo de los sistemas de información geográfica en la distribución y análisis de la herpetofauna

Neftalí SILLERO
Santiago Martín-ALFAGEME
Laura CELAYA IRIGOYEN



1. Introducción

1.1. Los SIG en Biología

Un Sistema de Información Geográfica (SIG), en su definición más breve, es toda aquella base de datos que esté georreferenciada, esto es, a la que se le asocian coordenadas geográficas o geocodificadas. El SIG es únicamente una herramienta, no un fin en sí mismo. Tal y como reconocen WADSWORTH & TREWEEK (1999) en su libro *GIS for Ecology*, no hay proyectos SIG, sino proyectos que necesitan SIG. ¿Cuál es la utilidad que tienen los SIG en el campo de la biología? Según estos mismos autores, un SIG puede combinar datos de forma fiable, tomar medidas correctamente, y obtener clasificaciones, representaciones y resultados consistentes.

El uso del SIG está infravalorado: la mayoría de las veces sólo se usa para representar mapas, obviando sus enormes capacidades para el análisis espacial, y cuando se realizan éstos, se tiende a pensar que lo resuelven todo, lo que lleva a una extrapolación excesiva de los datos.

El uso más extendido en la Ecología es el mapeo y clasificación de recursos ecológicos. El principal problema a la hora de generar mapas es una incorrecta georreferenciación de los datos: en estos casos el investigador o el técnico encargado de recoger los datos debe entender la ventaja del uso de sistemas como el GPS, puesto que desaparecen los errores de georreferenciación, y por muy malas que sean las condiciones ambientales o estructurales que tengamos, la exactitud y precisión de la medida será siempre superior a la de la referenciación clásica con un mapa, que en el supuesto de usar mapas de escala 1:25000, la precisión máxima a la que podemos aspirar será de 50m. Actualmente, y dado que la Disponibilidad Selectiva (ver más abajo) ha desaparecido, cualquier GPS, sea de la calidad que sea, comete errores inferiores a 15 m. Además, evitamos posibles errores en la transcripción de los datos. Con un GPS este proceso se automatiza y pasa directamente al SIG. No solo evitamos los errores, sino que también disminuimos el tiempo de trabajo.

El trabajo que suponía representar sobre un mapa las citas capturadas en campo resultaba ingente y tedioso, expuesto siempre a equivocarse al leer las coordenadas. Con un SIG, este error no sólo se minimiza, sino que las posibilidades de sacar provecho al trabajo se multiplican: podemos modificar los sistemas de proyección en función de nuestros intereses, calcular la densidad de citas en cada cuadrícula de forma rápida y sencilla, elaborar mapas de densidad que antes eran imposibles de realizar, comparar distribuciones de distintas especies sobre el mismo mapa, detectar a lo largo del tiempo cambios en los usos de la tierra y en las distribuciones, detectar qué factores son los que modifican esas distribuciones respecto a las teóricas, etc.

La toma de datos se puede automatizar y hacerse más segura. Podemos crear formularios en los que introducir datos erróneos sea imposible, o que citas mal georreferenciadas sean detectadas en el acto. Y también, facilitar la conexión GPS-ordenador. Implementando las bases de datos en sistemas como el World Wide Web, se pueden introducir los datos desde puntos distantes y a la misma vez, sin que se creen varias bases de datos simultáneas de contenidos parecidos pero no idénticos. Además, para la gestión de la base de datos sólo se necesitaría un administrador.

Quizás, la ventaja más importante de estos sistemas, híbridos de SIG e Internet, es que agilizan enormemente el mantenimiento de la base de datos, prolongando su vida más allá del proyecto para el que fue diseñada. Los datos se pueden seguir introduciendo en el sistema, que permite, a la vez, la obtención de cartografía en el acto y actualizada para ese momento. Los problemas que suponen la publicación de citas de especies en peligro desaparece en el momento en que la información sólo reside en un servidor, cuyo acceso puede ser tan restringido como se quiera. Un ejemplo se puede ver en el Finnish Museum of Natural History (ver dirección web).

1.2. Definición de SIG. Funciones

La definición más sencilla de un Sistema de Información Geográfica, SIG o GIS (del inglés Geographical Information System) es: *toda base de datos informatizada que está georreferenciada*, esto es, que posee coordenadas geográficas o geocodificadas.

El *National Center for Geographic Information and Analysis* proporciona una definición más amplia: “Un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión” NGCIA (1990). Otra definición muy similar la sugiere BURROUGH & MCDONNELL (1998): “Un SIG reúne, introduce, almacena, transforma y cartografía datos espaciales sobre el mundo real para un conjunto de objetivos particulares”.

El objetivo principal de un SIG no es representar la realidad a través de un mapa, sino analizar los datos contenidos en los mismos para crear nuevos mapas a partir de los ya existentes, No son una ciencia en sí misma, sino una

herramienta al servicio de muchas y variadas disciplinas, cualquiera que emplee información espacial. Una buena manera de definir un SIG es describiendo sus funciones:

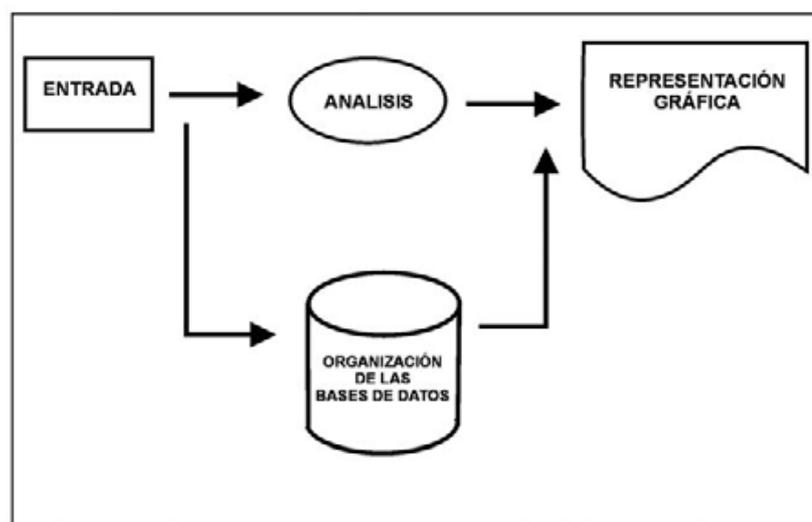
1. *Entrada de datos*: Aquellas que nos permiten la entrada de datos a partir de las fuentes utilizadas: mapas, planos, fotografías, imágenes, listados, etc. Son típicas las de digitalización cartográfica, georeferenciación de imágenes, utilidades de incorporación de datos GPS, etc.
2. *Gestión de la base de datos*: Existen dos tipos de datos en los SIG.
 - Los relativos a la posición geográfica de los elementos representados: puntos, líneas o polígonos.
 - Los asociados a estos elementos, donde guardamos la información que queremos incorporar al sistema. Por ejemplo, especie, altura, etc.

Tanto unos como otros necesitan un sistema gestor de bases de datos para poder almacenar y consultar la información. En los últimos años, los SIG están incorporando gestores estándar en el mundo del PC con el objeto de facilitar su uso.

3. *Funciones analíticas*: Son el sello distintivo de un SIG frente a otros sistemas gráficos tales como los programas de diseño asistido (CAD, del inglés *Computer Aided Design*). El objetivo final de estas funciones es obtener un mayor conocimiento que el que proporcionan los datos y mapas de partida. Los SIG son, por lo tanto herramientas de simulación que permiten responder a la pregunta: ¿Qué pasaría si...? Se pueden distinguir varios grupos de funciones:
 - Consulta: reclasificaciones (por ejemplo, mostrar la distribución de *Bufo bufo* en Castilla y León).
 - Álgebra de mapas: superposiciones (por ejemplo, dibujar zonas donde coincida la distribución de *Bufo bufo* y zonas protegidas).
 - Operadores de distancias (por ejemplo, determinar en cada punto de una zona de estudio la distancia a núcleos poblados).
 - Operadores de contexto: (por ejemplo, dibujar un mapa de pendientes de un zona a partir de un mapa topográfico mediante un modelo digital del terreno).

Además de los resultados gráficos (mapas) de estas operaciones, se pueden obtener resultados estadísticos a partir de bases de datos asociadas (por ejemplo, número de citas de una determinada especie localizadas en una cuadrícula UTM).

4. *Funciones de salida*: Son las funciones de representación gráfica de los resultados obtenidos. Incorporan esencialmente funciones de producción cartográfica, aunque también deben recoger la posibilidad de hacer informes de las bases de datos, exportación a formatos gráficos, etc. Con excesiva frecuencia esta es la parte más utilizada de los SIG, sin tener en cuenta que existen programas específicos de dibujo y cartografía que resultan más eficaces para esta tarea.



Funciones del SIG

1.3. Historia de los SIG

El nacimiento de los SIG a finales de los años 60 del siglo XX, viene condicionado por la necesidad de resolver problemas inabordables desde una perspectiva clásica de gestión de la información. Las primeras experiencias arrancan en distintos campos de la ciencia y la técnica. En concreto, el *Canadian Geographical Information System* constituye el sistema pionero en la gestión de recursos naturales (MOLDES, 1995).

Otro trabajo importante fue el desarrollado por arquitectos involucrados en la planificación territorial en el Harvard Laboratory For Computer Graphics And Spatial Analysis, de la Universidad de Harvard (USA). Se trataba de combinar información a partir de mapas temáticos en papel. Se superponían en una mesa de luz con el fin de cartografiar zonas de uso según distintos criterios. Se planteó el uso de ordenadores para esta labor, cristalizando el sistema SYMAP (1986), pionero en los sistemas vectoriales y el GRID en ráster.

El posterior desarrollo se ve condicionado en los años 80 por los avances en gestión de bases de datos, entornos gráficos y computación. Los SIG salen, a principios de los años 90, del ámbito académico y gubernamental extendiéndose y diversificándose sus aplicaciones. Todo campo de actuación que utilice datos georeferenciados puede utilizar estas herramientas. Toman especial relevancia las aplicaciones en Ciencias de la Tierra, combinadas en muchos casos, con el tratamiento digital de imágenes de satélite (Teledetección).

En la actualidad, los SIG se han incorporado en Internet como un apoyo a la consulta de bases de datos georeferenciadas: (callejeros, recursos turísticos, etc.), también juegan un papel muy importante en las redes de comunicaciones y junto con la tecnología GPS se están popularizando como navegadores incorporados en los automóviles. En los estudios del medio natural, la abundancia de datos digitalizados unida a la mayor facilidad de manejo de los SIG está haciendo que su uso se generalice.

1.4. Uso del GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un sistema de navegación por ondas de radio emitidas desde satélite que permite el posicionamiento geográfico sobre la superficie de La Tierra. Creado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos (DoD), el proyecto se inició entre los meses de febrero y diciembre de 1978, siendo ideado para usos militares y civiles.

El sistema se compone de tres sectores: el sector espacial (los satélites), el sector control (las bases terrestres que monitorizan los satélites) y el sector usuario (el receptor, componentes) (HOLANDA & BERMEJO, 1998).

El sector espacial está compuesto en la actualidad por 27 satélites. Giran alrededor de La Tierra en órbitas casi-sidreanas, a una altura de 20.200 km, lo que permite un vuelo muy estable. Siempre hay un mínimo de cuatro satélites disponibles en todo momento desde cualquier punto del globo terrestre.

El satélite está compuesto por una antena emisora de ondas de radio, que transmite la información al usuario, otra antena emisora-receptora que permite enviar y recibir información sobre su posición en el espacio a las bases de control, y lo más importante, un oscilador o reloj atómico.

El sector control está compuesto por varias bases terrestres que se encargan de monitorizar y corregir de forma constante las órbitas de los satélites y establecer el estado de los relojes atómicos de a bordo.

El sector usuario está compuesto de los receptores que reciben, leen y tratan las señales de los satélites, formado de varias partes:

- La antena receptora: convierte la señal radioeléctrica en pulsos eléctricos.
- El sensor es el encargado de modular la señal original del satélite.
- El controlador es un dispositivo que supervisa al sensor, almacena los datos, evalúa la calidad de la señal, define el sistema de referencia geográfica, etc.

La posición del receptor se conoce mediante la triangulación de las distancias que separan, en principio, a tres satélites de la antena. El receptor conecta, primero, con un único satélite: su posición se encuentra en cualquier punto de una esfera cuyo radio es la distancia que hay entre los dos. Con dos satélites, disminuimos las posibles posiciones a la línea de intersección de las dos esferas. Con tres satélites, esa línea se reduce a dos puntos, en donde la tercera esfera la corta (ver Figura 10.1). Uno de esos dos puntos es absurdo: normalmente se encuentra en el espacio. Es el controlador del receptor el que decide cuál de las dos posiciones es la correcta.

Pero, ¿cómo sabemos a qué distancia está el satélite? Mediante la señal de radio que emite. Conocemos la velocidad a la que viaja la emisión, cercana a los 300.000 km/s. Si el espacio es igual al cociente de la velocidad del objeto y el tiem-

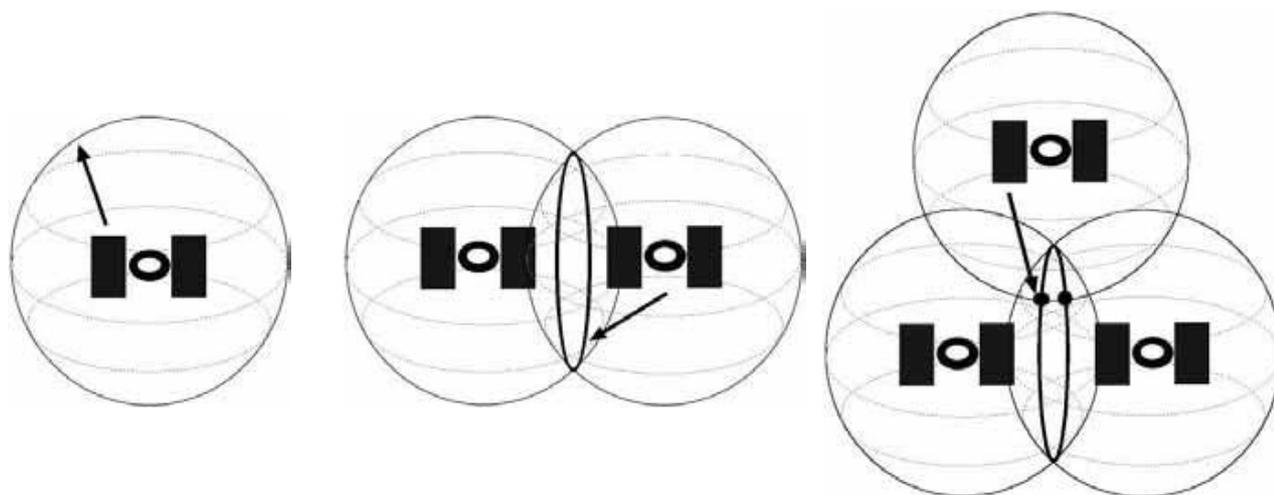


Figura 10. 1. Esquemas de la triangulación de la distancia con uno, dos, y tres satélites.

po que tarda en recorrer dicho espacio, lo único que necesitamos es averiguar el tiempo que tarda en recorrer la señal de radio la distancia que media entre el satélite y el receptor.

Dicha señal es única e inequívoca: cada satélite tiene la suya propia. El receptor posee réplicas de las mismas, que serán comparadas con las originales. Las señales son secuenciales y sirven para medir el tiempo. La procedente del satélite llega al receptor con un desfase en el tiempo (igual que la luz solar que recibimos no es la de este momento sino la de ocho minutos antes), que se manifiesta al compararla con la réplica del receptor. El tiempo de ese desfase corresponde al tiempo que tarda la señal en recorrer la distancia que separa al satélite del receptor. Al ser códigos secuenciales no necesitamos saber en qué preciso momento el satélite emite dicha señal: el desfase se manifiesta en cualquier punto.

Con los datos de la velocidad de la señal y el tiempo de viaje obtenemos la distancia a la que está el receptor. Con tres de estas distancias, teóricamente, podemos hallar la posición por triangulación. El problema surge al hallar el tiempo de desfase en la comparación de la señal del satélite con la del receptor. Un error de un milisegundo supone una desviación de 300 km. El satélite porta un oscilador atómico de alta precisión, pero el receptor sólo posee un reloj de cuarzo. Para solucionar este problema se acude a una cuarta medición: si con tres mediciones perfectas la triangulación es correcta, con cuatro imperfectas, también. Es por esta razón, que para tomar un punto necesitamos contactar, como mínimo, con cuatro satélites a la vez.

Por último, para saber dónde está el receptor, necesitamos las posiciones exactas de los satélites con los que se conecta, efemérides que recibimos en el mensaje de navegación. Las bases de control reciben esta información, la evalúan, corrigen y devuelven al satélite, que aplica dichas correcciones y las reenvía al receptor a través del mensaje de navegación.

A los errores inherentes al propio sistema hay que añadir otros debidos a causas externas:

- Las capas de la ionosfera y de la troposfera producen una reducción en la velocidad de la señal (ésta sólo es constante en el vacío).
- El relieve de la superficie terrestre produce desviaciones y rebotes en la señal del satélite. Los receptores son capaces de distinguirlas y desecharlas.
- Los relojes atómicos a bordo de los satélites pueden producir pequeños errores en el posicionamiento del receptor.
- El Departamento de Defensa introdujo un error intencionado llamado Disponibilidad Selectiva (*Selective Availability*, SA) para que nadie pudiera utilizar la precisión del GPS en su contra. El 1 de mayo de 2000 se decidió su suspensión total. La política actual consiste en eliminar las señales de los satélites en aquellas zonas que ellos consideren oportunas.

La solución a todos estos posibles errores es la tecnología GPS Diferencial (DGPS). Es un principio bastante simple: se contrastan las medidas de un receptor fijo en una posición de coordenadas perfectamente conocidas con las adquiridas por nuestro receptor. Esto supone la corrección de nuestras medidas de campo.

Además del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) creado por Estados Unidos hay otro sistema creado por Rusia llamado GLONASS (*Golobal naya Navigatsionnaya Sputnikova Sistema*). La Unión Europea, a través de la ESA, pretende, a su vez, construir su propio sistema global de navegación por satélite (GNSS, *Global Navegation Satellite System*), llamado Galileo.

2. Elaboración de Atlas faunísticos

2.1. Diseño de la bases de datos

La fase de diseño de las bases de datos, previa a cualquier trabajo de cartografía utilizando herramientas SIG, es extremadamente importante. Para CEBRIÁN & MARK (1986) “la elección de una determinada estructura de datos es definitiva”. Esta idea resalta la necesidad de valorar diversos aspectos tales como características de la información a almacenar: datos numéricos, coordenadas, fechas, textos, etc. Destaca la importancia de la fase de diseño, a la que en numerosas ocasiones no se le dedica la necesaria atención. Todo ello antes de introducir cualquier dato en el sistema. El tipo de consultas al que se va a someter a la base es otra cuestión a plantear, así como la cartografía que se derivará de esos datos.

La base de datos que soporta la información representada en el Atlas fue diseñada con el objeto de almacenar citas de autor. Se partió inicialmente de una tabla que contiene los siguientes campos: género y especie, cuadrícula UTM 10x10, localidad, provincia, año, autor y altitud.

La complejidad de la carga de la información ha sido importante. La base de datos reúne información de diversos colaboradores, es almacenada por distintos operarios y examinada por un grupo de supervisores. El clásico control de altas, bajas y modificaciones de registros supone tomar las siguientes acciones:

- Diseño de campo clave. Esencial para evitar citas repetidas, control de borrados accidentales, etc.
- Diseño de formularios para minimizar errores de tipografía en las altas.

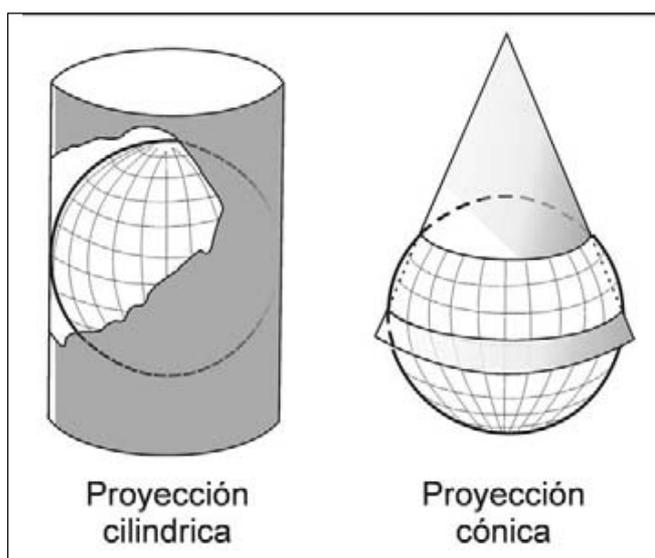


Figura 10. 2. Proyecciones cartográficas. Modificada de Vázquez & Martín (1995)

2.2. Sistemas de Proyección cartográfica

La capacidad de integración de datos de los SIG hace de ésta una de las funciones más utilizadas. Podemos integrar datos de muy diversa procedencia: listados, citas bibliográficas, mapas, etc., cuyo nexo de unión sea su localización geográfica en una determinada zona. Esto supone un conocimiento práctico de lectura de mapas. Para unir información de forma correcta debemos conocer los sistemas utilizados para localizar elementos la cartografía y para construir esa misma cartografía, las proyecciones.

Uno de los problemas esenciales, y más antiguos, en Cartografía es solucionar las representaciones de una superficie esférica –la Tierra– en una superficie plana –el mapa– sin deformaciones (VÁZQUEZ & MARTÍN, 1995). Las trans-

formaciones matemáticas que intentan solventar el problema, son las proyecciones. Consisten en ecuaciones que transforman las localizaciones sobre el globo terrestre en forma de coordenadas esféricas (latitud, longitud) en coordenadas planas en un sistema cartesiano (por ejemplo, coordenadas UTM).

No hay ningún sistema capaz de evitar las distorsiones en distancias, ángulos o áreas cuando se proyecta. Así los que conservan las distancias, se denominan proyecciones "automecoicas". Otros no deforman las superficies, son las "equivalentes". Una segunda clasificación es la relacionada con el paso de esfera a plano. Si se ha hecho por medio de un cilindro serán "cilíndricas", como la UTM, o "cónicas" cuando se hacen mediante un cono, como la Lambert.

Otro elemento a considerar es la superficie matemática sobre las que se apoyan las proyecciones y que intentan asemejarse a la superficie de la Tierra, que no tiene una forma esférica perfecta: una aproximación es el elipsoide.

Un elipsoide es el resultado de la rotación de una elipse definida por un eje mayor y un eje menor. Al tratarse de una aproximación, se han utilizado históricamente diversos elipsoides intentando ajustarse a las irregularidades de un determinado país o zona. Así para la proyección UTM en Estados Unidos se utiliza el de Clarke de 1866 mientras que en Europa, y por lo tanto en España, se utiliza el de Hayford o Internacional de 1924. Actualmente el Servicio Geográfico del Ejército (S.G.E.) está empezando a publicar sus mapas con el elipsoide WGS84 utilizado por los sistemas de posicionamiento GPS.

Por último, el Datum define la posición del esferoide con relación al centro de la Tierra. Este parámetro determina todo el armazón de nuestro sistema de coordenadas. Así, una misma localización medirá coordenadas distintas dependiendo del Datum utilizado, aunque estemos utilizando el mismo sistema de coordenadas. Este error puede ser de 200 o 300 m.

El sistema de proyección utilizado en España, en la mayor parte de la cartografía oficial actual, es la UTM (Universal Transverse Mercator). Es cilíndrica y de empleo a escala global. Para lograrlo sin reproducir las deformaciones típicas de esta proyección, cambia el cilindro de posición cada 6°; es lo que se denominan husos. La Península Ibé-

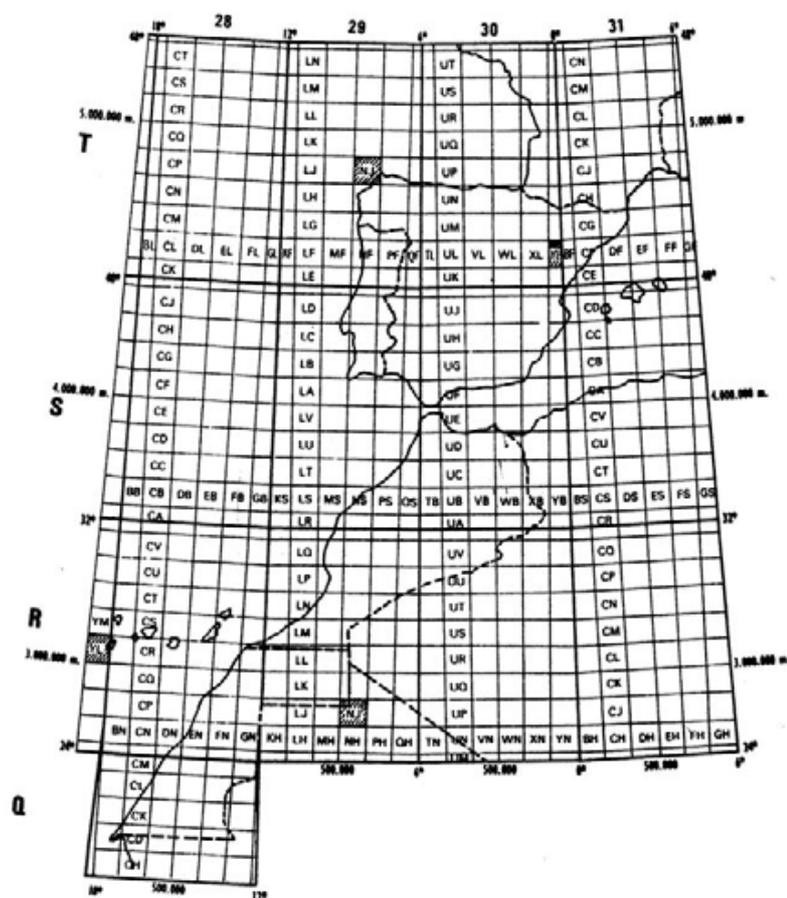


Figura 10. 3. Husos y cuadrículas UTM de 100 Kms de lado, para el entorno de la Península Ibérica e Islas Canarias, Tomadas del S.G.E.

rica está comprendida entre los husos 29, 30 y 31, y Canarias, entre el 27 (Isla de Hierro) y 28. El Datum, a partir de 1979, es el Europeo o de Potsdam (Alemania). En la cartografía militar anterior a los años 70 se empleaba la proyección Lambert "española" y otra adaptada a Canarias.

2.3. Sistemas de cartografía en biología

El instrumento habitual para representar distribuciones de especies vegetales o animales son los mapas, que se elaboran a partir de localizaciones en campo de la especie a estudiar. El posicionamiento o localización se hace refiriéndolo a una rejilla o cuadrícula superpuesta a la zona de estudio. El sistema de proyección UTM es, en esencia, un sistema de localización por cuadrículas. Por ello ha sido utilizado profusamente en Biología en el ámbito europeo. La primera utilización de la división militar UTM por cuadrículas se remonta al Atlas *Flora Europaea* en 1972 (JALAS & SUONUINEN, 1979).

La cuadrícula básica UTM se compone de una división del elipsoide en 60 husos iguales de 6°, y cada huso en 20 fajas de 8° de amplitud, son las zonas CUTM. Los husos se numeran como hemos visto del 1 al 60, y las filas se alfabeticizan con letras mayúsculas desde la C hasta la X. Se excluyen CH, I, LL, Ñ y O. A la Península le corresponde la R, S y T, para Canarias, la R (ver fig. 10. 3).

Las CUTM se dividen a su vez en cuadrados de 100 km de lado. Cada cuadrado se denomina etiquetándolos desde la A hasta la V en latitud y longitud cada 18°. Con ello se consigue que nunca se repita una designación en un área de 18° x 18°. En el territorio español sólo se repite la cuadrícula YL (Aragón y Oeste de Hierro en Canarias). Si queremos utilizar divisiones inferiores a 100 km lo podremos hacer en decenas de kilómetros, kilómetros, hectómetros, decámetros o metros. Basta con ir añadiendo cifras en abscisas y ordenadas.

2.4. Elaboración de mapas de citas

Para la elaboración de mapas de distribución tomamos como punto de partida una base de datos de citas ya completada, de la que se obtiene una serie de mapas. La base de datos constituye un conjunto de datos procedentes de observaciones en campo y referencias bibliográficas de especies de anfibios y reptiles.

Los datos esenciales que se han utilizado para la generación de los mapas son los campos de especie y la cuadrícula UTM de 10 x 10 km. El trabajo se ha desarrollado en diversas fases (ver fig. 10. 4).

a) Generación de la Malla UTM

Toda la cartografía generada tiene como soporte fundamental un conjunto de polígonos regulares que representan la malla UTM que cubre todo el territorio español.

Se adoptó proyectar en el huso 30 al ser éste mayoritario en cuanto a área cubierta. Inicialmente se generaron dos mallas con las coordenadas correspondientes. Posteriormente se proyectó al huso 30 las correspondientes al huso 28, 29 y 31. En la zona de solape fue necesaria una labor de limpieza de arcos. Una vez construida la geometría de los bordes de la cuadrícula, se etiquetó cada uno de los polígonos con la denominación de la cuadrícula.

b) Programa de conteo de especies por cuadrícula UTM

Una consecuencia inmediata de la generación de la malla cartográfica es la obtención de una base de datos que contiene los nombres de todas las cuadrículas UTM que abarcan el territorio comunitario.

Un primer paso necesario para representar tanto mapas de ausencia-presencia de especie como de densidad de citas es generar una tabla de datos que contenga un campo por especie más un campo de nombre de cuadrícula. Cada fila de la base de datos representa un cuadrado de 10 x 10 km y en el campo de cada especie se anota el número de citas de esa especie en esa cuadrícula.

La generación de la tabla se realizó mediante un programa de conteo que recorre la base de datos inicial de citas y anota en la tabla de conteo en la cuadrícula correspondiente (fila) y en la especie (campo). Las anotaciones son acumulativas, obteniendo finalmente el número de citas por cuadrícula y por especie.

c) Unión de bases de datos de conteo y mapa

Una vez obtenida la tabla de conteo, y utilizando las propiedades de las bases de datos relacionales que incorporan los SIG, unimos la tabla de conteo a la tabla asociada a los polígonos del mapa vectorial de las cuadrículas. Para ello utilizamos como campo clave el nombre de la cuadrícula UTM.

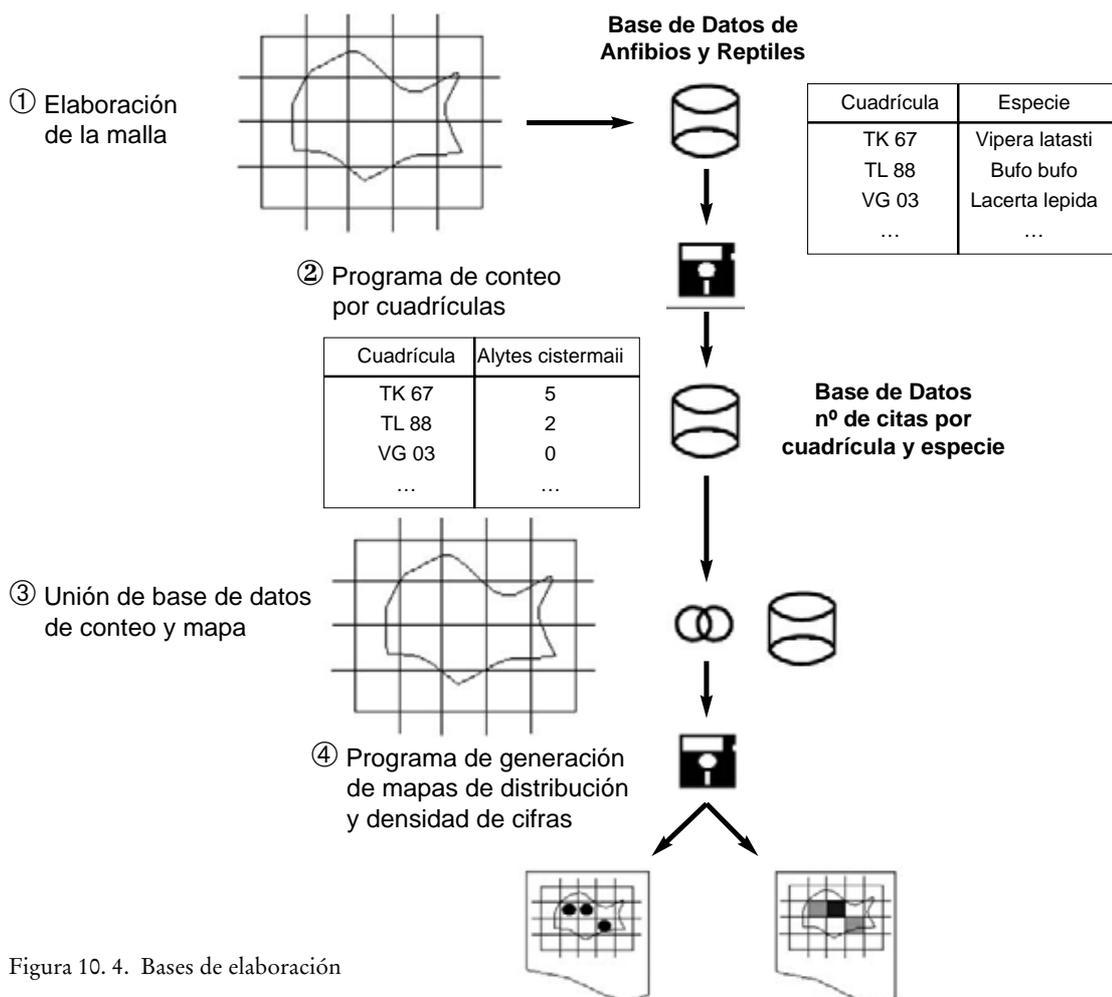


Figura 10. 4. Bases de elaboración

d) Generación de los mapas

La capacidad de automatización de la producción cartográfica de los SIG es otro de los aspectos utilizados en este trabajo.

Una vez obtenido el conteo de especies por cuadrícula, se trata de utilizar esa información para generar dos conjuntos de mapas: de distribución (presencia/ausencia) y densidad de citas. Se pretendía presentar, por lo tanto, dos mapas por especie estudiada. La cantidad de especies tratadas hacía necesaria la generación automática frente a la tediosa labor que supondría la confección manual de los mapas. A tal efecto se desarrolló un programa en lenguaje de programación de macros de un SIG, que a partir de la información de conteo de especies almacenada en la cuadrícula, genera los mapas para ser impresos.

2.5. Correlación y validación de datos

El uso de los SIG se muestra como una herramienta muy útil en la confección de una serie de mapas a partir de una base de datos. Las funciones de superposición y la gestión de bases de datos relacionales permiten, a su vez, corregir posibles errores que difícilmente se pueden tratar con el simple manejo alfanumérico de los datos.

La simple elaboración de un mapa de distribución como expresión de los datos almacenados ofrece una visión clara al herpetólogo para subsanar los posibles errores de localización. La secuencia de carga de datos, mapeado de los datos y supervisión de los especialistas se repitió hasta conseguir depurar totalmente la información.

Los SIG también permiten la mecanización de carga de información. Se utilizaron estas funciones en varios casos:

- Asignación automática de la cuadrícula UTM, provincia y municipio. En el caso de citas posicionadas con GPS, valiéndose de las funciones de superposición y utilizando el mapa de cuadrículas UTM y los puntos medidos en campo. Para las provincias y municipios se utiliza el mapa vectorial del I.G.N. 1:1.000.000.
- Asignación automática de la altura. En el mismo caso anterior y superponiendo la posición GPS a un modelo digital de elevación (MED). Éste consiste en una matriz de alturas a escala peninsular cuyos valores representan la altura media para una celda de 1 km x 1 km.
- Corrección de errores de localización. En citas que no están situadas puntualmente, como las obtenidas por bibliografía, se puede confrontar mediante SIG la información de la cuadrícula con la de la provincia y municipio. Una primera comparación puede señalar citas “sospechosas” que sólo pueden ser analizadas por un herpetólogo para valorar la causa del error e intentar su corrección.

2.6. Conclusiones

El empleo de los SIG supone, como se ha descrito en los apartados anteriores, un valor añadido en la calidad de la información suministrada. La eliminación de buena parte de los errores de mapeo frente a los métodos manuales es una buena prueba de lo afirmado. No obstante, el desarrollo de aplicaciones informáticas mediante SIG no es suficiente en sí mismo para obtener resultados óptimos. Es fundamental la intervención de los herpetólogos y el trabajo conjunto con los técnicos SIG. Por muy elaborada que sea la analítica SIG, ésta no puede determinar con seguridad si una determinada cita está totalmente fuera de lugar, o trazar las envolventes que señalan los límites de la distribución de una especie.

Los SIG pueden ser también una herramienta útil en el mantenimiento de la base de datos de citas. La visión de mapas de densidad o presencia-ausencia permiten delimitar las áreas necesitadas de muestreo. La incorporación de nuevas citas se ve sometida a unos filtros que aseguran su exactitud, evitando a los futuros usuarios la engorrosa tarea de revisar los datos cada vez que se quieren utilizar.

3. Aplicaciones de los SIG en la Biología

Los SIG tienen múltiples utilidades en la biología. Exponemos brevemente algunas de ellas:

- 1) Gestión de bases de datos (búsqueda de datos, obtención de patrones de relación).
- 2) Mapeo, clasificación y recuento de recursos ecológicos.
- 3) Edición de mapas de distribución (búsqueda de relaciones en las distribuciones de las especies, entre los propios seres vivos y con factores bióticos y abióticos, explicaciones biogeográficas).
- 4) Cálculo de mapas de densidad y diversidad.
- 5) Cálculo de distribuciones potenciales de diferentes taxones.
- 6) Búsqueda de áreas a proteger.
- 7) Aplicación en empresas e instituciones de medio ambiente: creación de rutas, programas de presentación interactivos (en museos, centros de interpretación, parques nacionales y naturales).
- 8) Aplicación al estudio de impacto ambiental: mapas de riesgo (inundaciones, erosión, mapeo de la contaminación y sus efectos en fauna y flora), gestión del impacto de nuevas carreteras y búsqueda de la solución menos traumática, impacto de actividades humanas sobre poblaciones animales y vegetales y en la diversidad de cierta zona.
- 9) Estudio del movimiento de animales con radio control (cálculo de la superficie del territorio, estudio de los movimientos, estudio de migraciones).
- 10) Estudio de producción agrícola (relación producción/superficie de explotación, mejora del riego, mejora del aprovechamiento del suelo fértil)
- 11) Actualización de mapas temáticos.
- 12) Previsión, detección y control de fuegos forestales.
- 13) Control de plagas.

3.1. Los mapas temáticos

Existen varios tipos de mapas (BOSQUE, 1997): los de base o referencia y los temáticos. La principal función de los primeros es localizar un objeto en el espacio. Un buen ejemplo son los mapas topográficos 1:50.000 del Servicio

Geográfico del Ejército español. Los mapas temáticos son principio y fin de los SIG. Unas veces serán la fuente de datos y otras el resultado de un análisis.

3.1.1. El proyecto Land-Cover/Corine: ejemplo de mapa temático

El proyecto CORINE (*Coordination Information Environment*) nació en la antigua Comunidad Económica Europea el 27 de junio de 1985, con el fin de recoger, coordinar y dar coherencia a la información sobre la situación del medio ambiente en los países miembros.

Dentro de este proyecto, se creó un apartado llamado Land-Cover que debía mapear en toda la superficie de la Comunidad los usos del suelo, unificando los criterios de clasificación para facilitar las comparaciones entre distintos países, tanto dentro de la Comunidad como fuera de ella. Se realizó a escala 1:100.000, suficiente dado su carácter regional. El proyecto piloto del Land-Cover se encargó a España. Fue, pues, el primer mapa de España de los usos del suelo en formato digital, y sobre todo, la posibilidad de actualizar los antiguos mapas de usos de 1978, que no cubrían todo el territorio nacional.

El único método, capaz de medir los usos del suelo en superficies tan enormes, era y es la Teledetección, técnica que permite tomar imágenes digitales de la superficie terrestre mediante sensores incorporados en satélites espaciales. Se escogió el satélite que fue creado para este propósito: Landsat 5 Thematic Mapper. Con una resolución espacial de 30 x 30 m y una resolución temporal de 16 días, es perfecto para estos cometidos, gracias a que tiene 4 bandas en el infrarrojo, una en el cercano, dos en el medio y la última en el lejano. Además, permite el cálculo de índices de vegetación, como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que facilitan con mucho la clasificación de la vegetación.

Dado que en aquel entonces los métodos de clasificación en Teledetección no eran lo suficientemente fiables, se decidió realizar ésta por medio de fotointerpretación. Así pues, se georreferenciaron las imágenes de satélite, se compusieron los mosaicos y se homogeneizaron las reflectancias de cada escena. El fotointerpretador clasificó visualmente los distintos tipos de usos del suelo, obteniendo un mapa que sería digitalizado posteriormente.

Por supuesto, la clasificación fue comprobada en el campo. Sin esta labor posterior y paralela al momento de clasificar, es imposible asegurar que lo que aparecen en las imágenes de satélite es lo que creemos. Desde que surgió la Teledetección y se vislumbró sus inmensas posibilidades, aparecieron voces predicando que los tiempos de ir al campo habían llegado a su fin. Nada más lejos de la realidad: la Teledetección es una herramienta que facilita la labor en estudios regionales, pero que ha de ser comprobada siempre. Verdad es, que comprobar resulta mucho más barato y rápido que muestrear toda la zona en busca de los datos necesarios, situación imposible en la mayor parte de estos estudios.

Las clasificaciones realizadas a partir de información remota son igual de válidas que las obtenidas mediante fotointerpretación, como demuestran SADER *et al.* (1991), de forma similar a lo hecho en el proyecto Land-Cover/CORINE. Utilizan una clasificación no supervisada (es el método menos preciso en Teledetección) y la comparan con la realizada por un fotointerpretador experimentado sobre ortofotos infrarrojas (el infrarrojo es quien detecta la vegetación mejor). El resultado es una similitud del 70%, cifra totalmente aceptable. De otra forma sería imposible realizar tal estudio, sobre todo si se intenta monitorizar cambios en el tiempo.

El grado de precisión varía en función de la dificultad de obtención de datos en las distintas zonas de estudio, o de las características que tenga la variable a medir. Dicho de otro modo: el resultado depende del objeto en estudio. La abundancia de ciertas aves está relacionada con la extensión de los bosques donde habitan. Estas áreas se puede medir de dos formas: el tradicional, a partir de mapas topográficos y datos recogidos en el campo, y la Teledetección. En Inglaterra el 70% de los bosques tienen un tamaño inferior a 1 ha, el 10% están en el rango de 1-2 ha, y el resto (el 20%) son superiores a 2 ha (MARK *et al.* 1997). El satélite Landsat 5 TM detecta totalmente las masas boscosas superiores a 3 ha., las de 2 ha. en un 97%, las de 1ha. en un 84%, y las inferiores a 1 ha., en tan solo un 18%. Por lo tanto, el resultado del estudio depende totalmente de la resolución de los datos que tomemos: si estamos utilizando imágenes de satélite hay que elegir correctamente el sensor en función de nuestros propios intereses.

El tener un mapa de usos del suelo en formato digital implementado en un SIG da unas ventajas palpables a primera vista. Podemos superponer esa capa a otro mapa, ya sea topográfico o temático, con todas las posibilidades de análisis que conlleva. Pero también podemos realizar nuestra propia clasificación en función del tipo de trabajo que estemos realizando: unir distintas clases, separar otras dependiendo de los valores de una nueva variable, modificar las leyendas en aras de una mejor comprensibilidad, etc. En fin, el formato digital permite una manipulación de los datos, los resultados y su representación que antes no existía.

3.2. Cálculo de distribuciones potenciales

Una de las aplicaciones donde la utilización de Sistemas de Información Geográfica resulta más eficaz es el cálculo de distribuciones potenciales de taxones, tanto de flora como de fauna. Los SIG permiten agilizar los análisis y acometer proyectos de mayor envergadura.

Los mapas de distribuciones potenciales se obtienen a partir de combinar factores que relacionan especies y hábitats (variables ambientales procedentes de la literatura, por ejemplo) con datos de información remota de distribución de paisajes o unidades ecológicas. Es necesario considerar el tamaño mínimo de los polígonos del mapa que llevarán la información referente a los hábitats en estudio. Este es el problema más importante a resolver: decidir la escala del estudio. El resultado depende directamente de la resolución que tenga la fuente de datos elegida. En unos casos se sacrifica esa resolución en aras de una mayor economía y una mayor extensión del área de estudio.

Las escalas pequeñas portan menos detalles que las grandes, pero proporcionan mayor información sobre especies muy móviles, que escapan a la resolución de las escalas grandes sobre superficies pequeñas. Según WADSWORTH & TREWEEK (1999), las escalas 1:5.000 sirven para especies de distribución muy restringida o de requerimientos de hábitats muy específicos, y también para hábitats pequeños pero usados por varias especies diferentes. Las escalas comprendidas entre 1:10.000 y 1:20.000 permiten diferenciar y clasificar distintos ecosistemas. Las escalas entre 1:50.000 y 1:100.000 son útiles para vertebrados grandes que requieren de extensas superficies o recorren varios ecosistemas. Son idóneas para los estudios a nivel regional. Las escalas más pequeñas (1:250.000-1:500.000) se utilizan en estudios regionales o superiores para cuantificar la abundancia de ciertos tipos de hábitats importantes en políticas de conservación.

Los estudios que se han realizado sobre este tema en los últimos años se centran en el cálculo directo de la distribución potencial de cierta especie por algún método determinado, o bien, comparar diversos métodos buscando el más preciso. Hay varias fuentes de datos para realizar estos estudios:

- a) Captura de datos directamente del campo.
- b) Los datos proceden de mapas climáticos, digitalizados o no.
- c) Las imágenes de satélite son el método más barato y fiable para los estudios a niveles regionales (es decir, a escalas pequeñas). Cubren extensas áreas con un coste inferior a otros tipos de datos. Los datos digitales se introducen directamente en el ordenador y se analizan rápidamente con un SIG. Los distintos tipos de hábitats se diferencian gracias a sus reflectancias particulares. Los cambios en el paisaje se detectan fácilmente repitiendo las observaciones a lo largo del tiempo (MARK *et al.*, 1997).

El objetivo final es producir modelos con una gran capacidad predictiva del hábitat potencial de cada especie, basados en variables ambientales fáciles de medir y cuya distribución espacial sea actualizable a bajo coste. RIVAS-MARTÍNEZ (1987) demuestra que las variables climáticas que mejor explican la distribución de los animales son la precipitación, la temperatura y la cobertura vegetal. La dificultad de obtener valores continuos de estas variables es lo que aventaja a los SIG, y en especial a la Teledetección. A partir de imágenes de satélites podemos obtener valores de humedad en el suelo, cobertura vegetal y temperatura en una malla, que dependiendo del sensor elegido, variará desde un tamaño de 1 x 1 km en el AVHRR del satélite NOAA, los 30 x 30m del Thematic Mapper del Landsat 5 o los 10 x 10 m del SPOT, en su canal pancromático. El análisis de tal cantidad de datos sólo es posible a través de una plataforma SIG.

BRITO *et al.* (1996) establecen un modelo predictivo para el lagarto verdinegro (*Lacerta schreiberi*) en Portugal. La fuente de datos elegida son los mapas procedentes del Atlas do Ambiente de 1983. Las variables que se obtienen de estos mapas están basadas en el trabajo de MARCO & POLLO (1993), en el que no se empleó tecnología GIS. Éste es un buen ejemplo de la facilidad que un SIG hubiera proporcionado a la realización del estudio biogeográfico. Dichos autores buscaron las variables ambientales que mejor explicaban la distribución particular del lagarto verdinegro. Obtienen los datos a partir de distintos mapas pluviométricos, de temperatura y de vegetación forestal potencial. La utilización de estos datos en formato digital posibilita aumentar el horizonte analítico, mejorando con mucho la precisión y exactitud de los resultados. Y el SIG hubiera realizado todo el proceso de cálculo de forma automática, impidiendo el trabajo que conlleva hacerlo a mano, y los posibles errores que se pudieran introducir. Por ejemplo, en el estudio se calcula el número de cuadrículas que poseen una o más citas de lagarto verdinegro. En un SIG este cálculo hubiera supuesto muy poco tiempo.

Brito y colaboradores incluyen otras variables además de las del trabajo de Marco y Pollo. Mediante Regresión Logística, se calcula la probabilidad de que la especie se encuentre o no en una cuadrícula dada, en función de las variables ambientales existentes en la misma. El resultado es un mapa de puntos cuyos valores es la probabilidad de

presencia de la especie estudiada. Se compara con las citas obtenidas en el campo, resultando que el 75% de las cuadrículas con presencia son clasificadas correctamente, al igual que el 94% de las ausencias; en total, el 82% de las cuadrículas son clasificadas de forma correcta.

Las ventajas que generan este tipo de estudios son obvias:

- 1) Permite descubrir nuevas poblaciones que habían pasado inadvertidas anteriormente.
- 2) Agilizan y facilitan los estudios biogeográficos.
- 3) Se evalúa el nivel de conservación de una especie de forma rápida y barata. Como se explica en otro trabajo (BRITO *et al.*, 1999), a partir de un modelo predictivo se consigue seleccionar áreas necesarias de conservación, identificar las áreas de mayor peligro para el animal, evaluar el grado de protección en el que se encuentra y definir una estrategia de conservación.

SA-SOUSA (2000) también emplea la Regresión logística y los SIG para calcular sendos modelos predictivos para las dos formas de *Podarcis hispanica* presentes en Portugal. El resultado es que ambas tienen modelos predictivos diferentes. Los SIG son una herramienta más a la hora de distinguir y explicar la biogeografía de los seres vivos.

3.3. Los SIG aplicados a la conservación

Los SIG son una herramienta útil en la conservación de especies, y muestra de ello es la gran cantidad de trabajos en los que ya se empieza a aplicar esta tecnología (ver, por ejemplo: HISNLEY *et al.*, 1995; LOMBARD *et al.*, 1995; SUTHERST *et al.*, 1995; BRITO *et al.*, 1996; NEAVE *et al.*, 1996a; NEAVE *et al.*, 1996b; NEAVE *et al.*, 1996c; SMITH *et al.*, 1997; CORSI *et al.*, 1999). Los campos en los que se aplican son muy variados: aves, mamíferos, anfibios, reptiles, etc. Las ventajas de estos métodos son su facilidad para ser repetidos y continuados en el tiempo. Sólo hay que ir añadiendo la nueva información obtenida para de nuevo generar los modelos predictivos, obteniendo resultados cada vez más precisos y exactos. Esto es muy importante y lo que da una gran aplicabilidad a los SIG: el trabajo que ya se ha realizado no se vuelve a repetir. Todos los procesos se automatizan, desde la captura de datos hasta el procesamiento de los mismos. Y, por supuesto, las salidas gráficas hacen que los resultados y conclusiones sean más comprensibles y accesibles para todos. A partir de un modelo predictivo (BRITO *et al.*, 1999) podemos:

- a) Seleccionar áreas prioritarias en la conservación de dicha especie.
Las decisiones de qué zonas han de ser protegidas suelen ser políticas, en vez de tomarse con criterios biológicos. La conservación de una especie o un conjunto de ellas le supone a la administración tan solo una pequeña inversión adicional. LOMBARD *et al.* (1995) demuestra, a partir de índices de diversidad y endemismos, calculados por medio de los mapas de distribución de las especies de serpientes de Sudáfrica, que el 72-78% de la superficie donde habitan ya tenían algún tipo de protección. Queda claro, como ya hemos indicado, que el esfuerzo suplementario que se necesita para completar la protección de una o varias especies no es tan grande como se dice.
- b) Evaluar el grado de protección proporcionado por el estado para ese taxón e identificar las áreas de mayor riesgo de extinción.
Podemos evaluar los efectos de las perturbaciones humanas, mapear y predecir la distribución de las distintas especies utilizadas como bioindicadores, estimar sus abundancias, y evaluar la protección de sus hábitats, identificando también nuevas zonas de reserva. Las influencias humanas son las que más perturban los ecosistemas: la diversidad aumenta con la distancia a ciudades y carreteras (SMITH *et al.*, 1997).
- c) Definir una estrategia adecuada a la conservación.
La recolonización de áreas por parte de especies económicamente problemáticas, ausentes de las mismas durante muchos años, puede producir enfrentamientos con agricultores y ganaderos, siendo necesario el establecimiento de un plan de manejo a nivel nacional. Estos planes ganan en calidad si son implementados mediante SIG. CORSI *et al.* (1999) calculan la distribución potencial del lobo (*Canis lupus*) a partir de variables ambientales (existencia de tierras de cultivo, bosques, pastizales, eriales y de zonas urbanas; elevación, densidad humana, de carreteras y vertederos, densidad de ovejas, número de especies de ungulados e índices de diversidad y de dominancia), comparando aquellas zonas donde siempre estuvo presente y zonas donde nunca lo ha estado (buscan hábitats totalmente inadecuados para el lobo). Logran tres objetivos: (1) plantear una base para futuros estudios espaciales y de hábitats más profundos, (2) identificar la fragmentación en el hábitat del lobo, y (3) reconocer aquellas áreas que son más probables para una recolonización por parte del lobo. Por primera vez, se

tienen conocimientos para predecir cómo afectan las decisiones de manejo en la ecología de las especies. Estas predicciones a medio y largo plazo se cimientan sobre datos y resultados cada vez más consistentes.

Bibliografía

- BOSQUE, J. (1997): *Sistemas de Información Geográfica*, 2ª ed. corregida. Ed. Rialp, Madrid 451 pp.
- BRITO, J. C., BRITO e ABREU, F., PAULO, O. S., ROSA, H. D. & CRESPO, E. G. (1996): Distribution of Schreiber's green lizard (*Lacerta schreiberi*) in Portugal: a predictive model. *Herpetological Journal*, 6: 43-47.
- BRITO, J. C., GODINHO, R., LUÍS, C., PAULO, O. S. & CRESPO, E. G. (1999): Management strategies for conservation of the lizard *Lacerta schreiberi* in Portugal. *Biological Conservation*, 89: 311-319.
- CEBRIÁN, J. A. & MARK, D. M. (1986). Sistemas de Información Geográfica, Funciones y Estructuras de datos. *Estudios Geográficos*, 47 (184): 277-298.
- CORSI, F., DUPRÉ, E. & BOITANI, L. (1999): A large-scale model of Wolf distribution in Italy for conservation Planning. *Conservation Biology*, 13: 150-159.
- DOMÍNGUEZ BRAVO, J. (2000): Breve Introducción a la Cartografía y a los Sistemas de Información Geográfica (SIG). *Informes Técnicos Ciemat*, 943: 1-38.
- HISNLEY, S. A., BELLAMY, P. E., NEWTON, I. & SPARKS, T. H. (1995): Habitat and landscape factors influencing the presence of individual breeding bird species in woodland fragments. *Journal of Avian Biology*, 26: 94-104.
- HOLANDA, M. P. & BERMEJO, J. C. (1998): *GPS+GLONASS: descripción y aplicaciones*. www.uco.es/~bb1rofra/.
- JALAS, J. & SUONUNEN, J. (1979): Vol. 1: Pteridophyta, pp. 7-13, in: *Atlas Florae Europaea*.
- LOMBARD, A. T., NICHOLLS, A. O. & AUGUST, P. V. (1995): Where should nature reserves be located in South Africa? A snake's perspective. *Conservation Biology*, 9: 363-372.
- MARCO, A. & POLLO, C. P. (1993): Análisis Biogeográfico de la distribución del Lagarto Verdinegro (*Lacerta schreiberi* Bedriaga, 1878). *Ecología*, 7: 457-466.
- MARK, E. L., FIRBANK, L. G., BELLAMY, P. E., HINSLEY, S. A. & VEITCH, N. (1997): The comparison of remotely sensed and ground-based habitat area data using species-area models. *Journal of Applied Ecology*, 34: 1.222-1.228.
- NEAVE, H. M., CUNNINGHAM, R. B., NORTON, T. W. & NIX, H. A. (1996a): Biological inventory for conservation evaluation III. Relationships between birds, vegetation and environmental attributes in southern Australia. *Forest Ecology and Management* 85: 197-218.
- NEAVE, H. M., NORTON, T. W. & NIX, H. A. (1996b): Biological inventory for conservation evaluation I. Design of a field survey for diurnal, terrestrial birds in southern Australia. *Forest Ecology and Management*, 85: 1907-122.
- NEAVE, H. M., NORTON, T. W. & NIX, H. A. (1996c): Biological inventory for conservation evaluation II. Composition, functional relationships and spatial prediction of bird assemblages in southern Australia. *Forest Ecology and Management*, 85: 123-148.
- MOLDES, F. J. (1995): *Tecnología de los Sistemas de Información Geográfica*. Ed. RA-MA, pp. 6-10.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S. (ed.) (1987): *Memoria del mapa de vegetación de series de vegetación de España*. ICONA. Serie Técnica. 268 pp.
- SÁ-SOUSA, P. (2000): A predictive distribution model for the iberian wall lizard (*Podarcis hispanica*) Portugal. *Herpetological Journal*, 10: 1-11.
- SADER, S. A., POWELL, G. V. N. & RAPPOLE, J. H. (1991): Migratory bird habitat monitoring through remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 12 (3): 363-372.
- SGE (1976): *Proyección Universal Transversa Mercator*, SGE, Madrid, Vol. I: Sistemas conformes. Proyección U.T.M.. Cuadrículas y Sistemas de referencia, 220 pp.
- SMITH, A. P., HORNING, N. & MOORE, D. (1997): Regional biodiversity planning and Lemur conservation with GIS in western Madagascar. *Conservation Biology*, 11 (2): 498-512.
- SUTHERST, R. W., FLOYD, R. B. & MAYWALD, G. F. (1995): The Potencial Geographical Distribution of the Cane Toad, *Bufo marinus* L. in Australia. *Conservation Biology*, 9 (6): 294-299.
- VÁZQUEZ, F. & MARTÍN, J. (1995): *Lectura de mapas*. Fundación General de la U.P.M., 3ª edición. 125 pp.
- WADSWORTH, R. & TREWEEK, J. (1999): *GIS for Ecology: an introduction*. Taylor & Francis, London. 184 pp.

Dirección web

Finnish Museum of Natural History. Atlas Florae Europaeae. Distribution of Vascular Plants in Europe. Comitte for Mapping the Flora of Europe & Societas Biologica Fennica Vanamo, Helsinki.
http://www.fmnh.helsinki.fi/map/afe/E_afe.htm?pageid=571&language=English

