

Estimaciones de abundancia por marca-recaptura utilizando radiotelemetría

Enrique Páez* y Martín Lezama**

Resumen. - La telemetría es usada para generar los individuos capturados y marcados dentro de un área de estudio al momento de iniciar un recuento de individuos. Su uso se justifica siempre y cuando existan poblaciones relativamente pequeñas y con amplia capacidad de movimiento. En este trabajo se hace una revisión de las ecuaciones propuestas a manera de modificación del índice de Lincoln-Petersen, frecuentemente usadas para estimar la abundancia incorporando datos de telemetría. Se detalla además el procedimiento empleado para incorporar estos datos a estimaciones de abundancia usando marca-recaptura.

Introducción

Existen diferentes métodos para estimar la abundancia poblacional de una especie, que comprenden desde procedimientos *ad hoc* hasta modelos altamente sofisticados. El primer paso hacia una mayor complejidad, después de los métodos *ad hoc*, es el método "de los momentos", aunque los métodos de "mínimos cuadrados" sean mejores. Pero existe otro método: el de "máxima verosimilitud", muy superior, aunque los estimadores resultantes pueden estar fuertemente sesgados, lo que se corregirá mediante ajustes (Buckland *et al.*, 1987).

El método más simple de los estimadores de marca-recaptura y que proporciona un estimado del tamaño poblacional a partir de sólo dos muestras es el índice de Lincoln-Petersen. El procedimiento es simple: los animales capturados en el primer muestreo son marcados y liberados. Si la segunda muestra se selecciona al azar, la proporción de animales marcados en la segunda muestra, estima sensiblemente la población total.

Hay algunos supuestos que deben ser cumplidos. El supuesto crítico es que cada animal debe tener la misma probabilidad de ser capturado en la segunda muestra. Supongamos que el área de estudio no está bien definida, o lo está pero los animales pueden entrar y salir libremente de ella. Si los animales son territoriales o si simplemente tienen lugares de descanso preferenciales, los que prefieren permanecer cerca del centro del área de estudio tienen más probabilidades de ser capturados que los que están en los límites del área. Si ambas muestras están sujetas a este tipo de sesgo, hay demasiadas recapturas y el estimador será subestimado.

También se puede producir una subestimación cuando los animales son excepcionalmente agresivos, dóciles, o particularmente tímidos, lo cual hace improbable su captura. Lo mismo ocurre cuando un animal se vuelve más evasivo después que ha sido capturado una vez. En este caso, habría pocas recapturas y se sobrestimaría la medición del parámetro. Cuando algunos animales pierden sus marcas entre los períodos de muestra, el tamaño poblacional corre el

* Ministerio de Agricultura, Montevideo, Uruguay.

** Investigador de la UCA

riesgo de ser sobrestimado, por lo que, al diseñar un estudio, se debe verificar que no haya pérdida de marcas.

Si hay nuevos animales en la población por nacimiento o inmigración, este método estima el tamaño poblacional en el momento de la segunda muestra, eliminando la posibilidad de un sesgo. En caso de emigración o muerte, el método estima el tamaño poblacional en la primera muestra, siempre que los animales marcados no tengan una probabilidad diferente de morir o emigrar que los animales no marcados.

Uno de los supuestos críticos en los métodos de marca-recaptura, es conocer el número de animales marcados. Muchas veces, la muerte de animales marcados o la pérdida de marcas afecta este supuesto. La radioteleetría ofrece grandes ventajas para resolver este problema, ya que en estos métodos el factor más importante es la verificación y conocimiento del número de animales antes del segundo muestreo o recaptura.

De este modo, la presencia de animales marcados se verifica antes de la iniciación de los recuentos, y los animales que migran o mueren dentro de la zona de estudio pueden ser removidos del muestreo.

Pero si se utilizan marcas sin radiotransmisores, no hay manera de estimar el número real de animales marcados dentro del área de estudio. Si el número de animales marcados cambia por causas como muerte o migración, el método de Jolly-Seber es el más apropiado (Seber, 1973).

Este método asume que: a) cada animal tiene la misma probabilidad de ser cap-

turado (p_i) en el muestreo i_{th} , permaneciendo vivo cuando el muestreo es realizado; b) cada animal marcado tiene la misma probabilidad Φ_i de sobrevivir desde i a $i+1$, dado que estaba presente inmediatamente después del muestreo i ($i = 1, 2, 3, \dots, s-1$); c) cada animal tiene la misma probabilidad de retornar a la población después de su marcaje; d) no hay pérdida de marcas y las mismas son reportadas en su totalidad; y e) todos los muestreos son instantáneos.

Al revisar el *Wildlife Review*, compendio de publicaciones en vida silvestre, encontramos que, hasta 1990 no existen muchos trabajos de métodos de marca-recaptura que utilizan radioteleetría. No obstante, Servin *et al.* (1987) refieren que la telemetría ha sido muy utilizada para estimar la abundancia relativa de carnívoros a manera de corrección en las contabilizaciones de huellas.

En general, podemos decir que la telemetría para efectos de la estimación de abundancia tiene una aplicación limitada y se ajusta a poblaciones relativamente pequeñas, con amplia capacidad de movimiento.

El propósito de este trabajo es revisar la estimación de abundancia por marca-recaptura utilizando radioteleetría y otras aplicaciones para estimar abundancia de animales.

Características de los estimadores empleados

Eberhardt (1990) revisa y evalúa los principales estimadores usados en los métodos de marca-recaptura: el estimador de Chapman (1951); la mediana de Petersen; el estimador de Bailey y el

estimador de Miller que utiliza las sumas de M_i (número diario de animales marcados), determinado directamente por telemetría, m_i , número de animales observados con marcas encontrados en la muestra de n_i individuos.

Se considera al primer estimador de esta serie como perteneciente al grupo de estimados de máxima verosimilitud. Para este estimador, se realizó una simulación de una población conocida de 100 individuos, con un recuento de 25 elementos para diferentes porcentajes (10, 20, 30, 40 y 50%) de animales marcados.

Para la simulación se consideraron dos supuestos: (i) las marcas no se pierden y se identifican en las capturas o reavistamientos; (ii) todos los individuos tienen la misma probabilidad de ser avistados en cada inspección. Además, se asume que las radio-localizaciones para M_i y las observaciones de n_i individuos son instantáneas e independientes.

White y Garrot (1990) presentan las fórmulas para calcular el índice de Lincoln-Petersen con la modificación de Chapman (1951). Sin embargo, consideramos que los sesgos permanecen, ya que se asume que: a) todos los radios funcionan, y b) todos los radios corresponden a animales vivos. Ambos supuestos presentan inconvenientes según el tipo y comportamiento del animal, clima, topografía y otros factores, pero más aún el primero, que tiene que

ver con el número de animales marcados. El segundo puede ser corregido, pero puede sesgar el estimado si el animal marcado es extraído de la muestra. Sin embargo, tiene una gran ventaja: al utilizar avistamientos por telemetría en la recaptura de los animales de la población, el collar no atrae al observador. Este factor soluciona uno de los posibles sesgos de los métodos de marca-recaptura introducido o provocado por ellos: es común que muchos observadores inicien los conteos en animales marcados como se muestra gráficamente en la ilustración 1, donde se manifiesta que los objetos marcados son los primeros en atraer la atención del lector.

En realidad, los radios no son utilizados para encontrar los animales marcados como parte de los procedimientos del estimado poblacional. Sin embargo, se utilizan para verificar el número de animales marcados. El método es sencillo: mientras un integrante del equipo cuenta los animales marcados (radio señales), otros realizan los avistamientos para completar los datos de la recaptura para ser ingresados a la fórmula del estimador.

Debido a que en los recuentos pueden ser observados animales no marcados, los protocolos del método Schnebel-Darroch no se aplican para esta situación, que es igual al Modelo M_t de Otis *et al.* (1981), donde la probabilidad de captura puede variar con el tiempo.

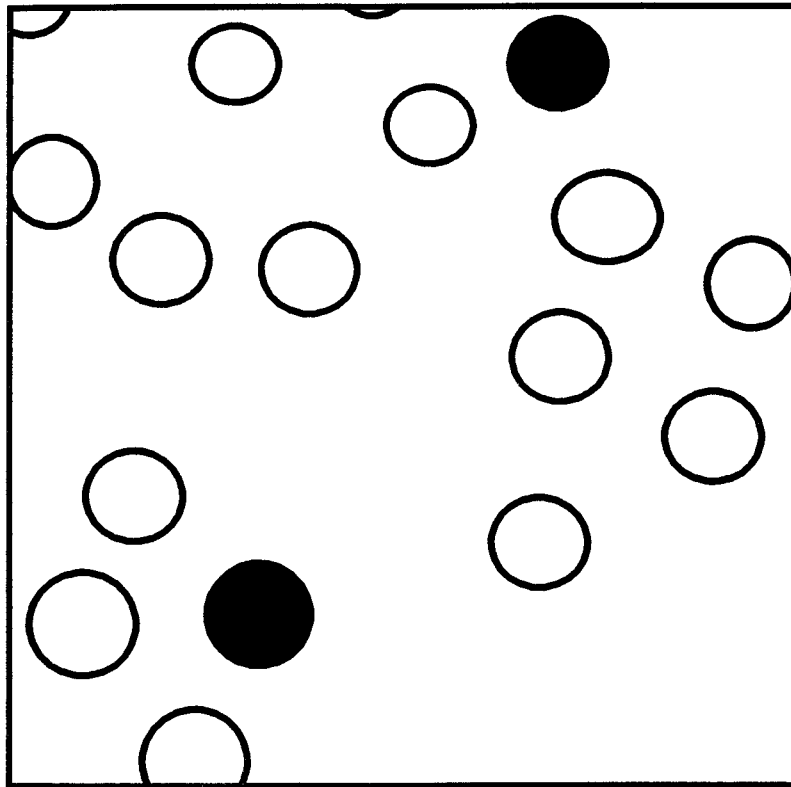


Ilustración 1. Efecto visual que puede ocurrir a los observadores: comenzar a contar animales marcados (círculos oscuros), porque llaman más la atención que el resto de los animales (círculos en blanco).

White *et al.* (1982) intentan establecer un conjunto de modelos que permiten la verificación de los supuestos y el consecuente ajuste de un modelo apropiado. El modelo básico M_0 supone que la probabilidad de captura es la misma para cada animal en cada muestra. El modelo siguiente, M_1 , permite que haya diferentes probabilidades de captura entre las diferentes muestras, pero supone que para una muestra dada, todos los animales tienen la misma probabilidad de ser capturados.

En el tercer modelo, M_b , los autores citados asumen que la probabilidad de capturar un animal no marcado es constante, tanto entre animales como a lo largo del tiempo, pero admiten una respuesta de comportamiento. Se per-

mite que un animal marcado tenga una probabilidad de recaptura diferente a la de captura, que es constante.

El estimador de Lincoln-Petersen corresponde al modelo M_1 . Los resultados de esta simulación indican que, si la heterogeneidad de las probabilidades de la captura existe, entonces el estimador será poco robusto. Muchos datos sugieren que la heterogeneidad está presente. Sin embargo, se conoce que la heterogeneidad individual está asociada a las probabilidades de captura.

Estos autores recomiendan la maximización numérica de la función de verosimilitud, considerando un modelo adicional M_h , en donde los animales muestran heterogeneidad. Cada animal

tiene su propia probabilidad de captura, que se supone constante en el tiempo y con respecto a capturas anteriores. Dado que este modelo tiene más parámetros que datos, la estimación del tamaño poblacional es problemática, sugiriendo una aproximación *jackknife* al problema.

Existen combinaciones del estimador de Lincoln-Petersen que permiten mejorar la precisión de las técnicas de estimación de abundancia, incrementando el número de las recapturas (k). Si suponemos que hay observadores independientes, muchos procedimientos están disponibles para combinar los estimados para el cálculo.

En otras palabras, las aplicaciones del estimador de Lincoln-Petersen pueden utilizar la técnica de radiotelemetría. En este caso, la colocación de los radio-collares se constituiría en el primer muestreo, y el segundo muestreo sería el número de animales marcados y no marcados contados en la recaptura. Si el área de estudio fuese muy extensa, se podría utilizar una avioneta o un helicóptero y cada procedimiento de sobrevuelo daría la posibilidad de un nuevo cálculo del estimador del índice.

Una de las posibilidades que ofrece el uso de marca-recaptura consiste en tomar la media de diferentes observadores. Rice y Harder (1977) utilizan la media y el error estándar de los observadores. Ellos trabajaron con animales marcados con collares de tres diseños diferentes dentro de una área cercada.

Las recapturas fueron visuales: dos observadores independientes sobrevolando la zona con helicópteros, ya que su utilización era justificada por lo extenso de la zona.

La innovación del trabajo fue la utilización de muestreos múltiples, fundamentalmente para probar la precisión de los estimados poblacionales. Pero esta innovación puede ser ineficiente, porque la variación que proponen no es utilizada para crear un promedio ponderado.

Los supuestos que se plantearon fueron:

- 1) la población fue constante a lo largo del período de muestreo excepto por extracciones conocidas;
- 2) la probabilidad de recaptura es igual para todos los animales;
- 3) la presencia de una marca no determina el conteo del animal;
- 4) todas las marcas son reportadas;
- 5) los animales son contados una sola vez;
- 6) el tamaño de la muestra no incide en un estimador insesgado;
- 7) los vuelos son independientes.

La población fue estimada calculando los intervalos de confianza al 95%, y se llegó a la conclusión de que modificaciones utilizadas en el esfuerzo de recapturas eliminan los problemas encontrados en trabajos de marca recaptura.

Sin embargo, White y Garrot (1990) proponen fórmulas para calcular una media ponderada:

donde W_i es el inverso de la varianza

$$\frac{k+1}{\sum_{i=2} W_i N_i} / \sum_{i=2} W_i$$

para cada estimador en el tiempo i .

Como la varianza media del estimador incluye el término del estimador de N_i , ambos están correlacionados. Por tanto,

ambos están correlacionados. Por tanto, se supone que existe un sesgo en los valores. Habrá entonces una subestimación o sobrestimación en el verdadero tamaño poblacional dependiendo de los valores obtenidos. La distribución de N_i es conocida por ser asimétrica con valores grandes en la cola derecha, pero la transformación logarítmica de los datos soluciona el problema, siendo otro posible estimador la media geométrica.

Para este caso, los intervalos de confianza superior e inferior pueden ser exponenciales para obtener intervalos de confianza del verdadero valor de N . La media geométrica y varianza pueden ser construidas para estimar los intervalos (White y Garrot, 1990).

Una segunda opción consiste en trabajar con las medianas, combinando los diferentes estimados para obtener un estimador total. La ventaja de utilizar la mediana es que, como estadístico de localización, no afecta al estimador total.

El problema puede plantearse, sin embargo, con malas condiciones de tiempo. Un observador realiza las recapturas y, si supone que la capacidad de observar los animales con mal tiempo es la misma que con otras condiciones ambientales, incurre en un error. Al tener el número exacto de animales marcados, el resultado subestima el parámetro.

Para calcular otro estimador dentro de los intervalos de confianza creados por los diferentes estimados, puede tomarse la probabilidad generada de las combinaciones tomadas de las observaciones

(distribución binomial). Se pueden calcular las probabilidades de observar otro valor N_i por los estadísticos con todas las observaciones, y la probabilidad será la fórmula:

$$C_n^k 0.5^n (1 - 0.5)^{k-n}$$

donde k es el número de observaciones totales y n el número de estimado a calcular.

Una tercera opción se presenta con el ajuste de estimador hipergeométrico de máxima verosimilitud. Bartmann *et al.* (1987) evalúan la capacidad de tres métodos diferentes combinando los estimados repetidos de Lincoln-Petersen utilizando sobrevuelos en la estimación de la población de venados *O. hemionus*. Los animales fueron marcados con radio-collares de tal manera que se podía determinar el número de marcas presentes antes del momento de la recaptura.

El estudio demuestra el valor de la telemetría en muestreos repetidos por avistamiento aéreo. Los radios aseguran el conocimiento del número exacto de individuos marcados en el momento de las recapturas, siendo la mayor desventaja los costos para marcar un número importante de animales.

Fisher (1922, 1925) presenta el método de máxima verosimilitud como una manera de estimar los parámetros poblacionales de los datos de un muestreo. Su teoría sigue la tendencia del ajuste de los datos al modelo, testeando una variedad de hipótesis (Mood *et al.*, 1974; Lehmann, 1983).

Estimadores de parámetros y la inferencia de la similitud en general, tienen

excelentes propiedades, siendo robustos por su bajo o nulo sesgo y su máxima eficiencia. Estos métodos han sido muy utilizados en estimadores de marca-recaptura, fundamentalmente basados en las distribuciones multinomiales.

El producto de las funciones de máxima verosimilitud puede ser numéricamente optimizado del estimador de N. Los diferentes procedimientos para estimar los intervalos de confianza fueron menores para el índice Lincoln-Petersen. Entre los tres procedimientos, el que se consideró mejor fue el estimador de máxima verosimilitud hipergeométrico.

Los autores sugieren que los intervalos de confianza del 95% sean construidos también por el método de máxima verosimilitud. Los intervalos de confianza son los valores de N, resultante del logaritmo con 2 unidades menores que los valores de máxima verosimilitud. Nos preguntamos si el valor deriva del hecho de que menos 2 veces las diferencias de estimado de modelos anidados siguen un tipo de distribución X.

Las ventajas en los intervalos de confianza consisten en que los niveles menores nunca estimarán menos del número mínimo de animales conocidos o número de animales marcados. Pero igual que otros modelos y estimadores de abundancia, se deben cumplir varios supuestos. Uno de ellos consiste en que, para todos los estimadores, los avistamientos son independientes de las marcas. La mejor estrategia consiste en escoger las localizaciones aleatoriamente, pudiendo ser estos puntos avistamientos aéreos o no. Cada individuo debe tener la misma probabilidad

de ser avistado en cada una de las ocasiones particulares.

La heterogeneidad de las probabilidades en los avistamientos no sesga los estimados del tamaño poblacional, pero puede hacer que la varianza sea subestimada (Seber, 1986). La mayoría de los estimados de Bartmann *et al.* (1987) fueron menores que los valores poblacionales reales, presentando un sesgo negativo. Si sectores de la población tienen diferentes probabilidades de avistamientos, estimador o estimadores e intervalos de confianza resultarán sesgados.

Un supuesto adicional de la estimación es que las diferentes observaciones (k) sean independientes entre sí. Esto significa que un observador no podría hacer observaciones desde un mismo lugar en días consecutivos, ya que al utilizarlos para un estimado total, daría la posibilidad de ver los mismos animales cada día. La probabilidad debe ser igual para cada individuo. Por eso es tan importante la aleatoriedad en los avistamientos. Debe señalarse, además, que existen problemas de pseudoreplicación espacial, lo cual es muy común en los diseños experimentales.

A pesar de la precisión de los estimadores de máxima verosimilitud, éstos no parecen ser mejor que los otros dos estimadores, excepto por el hecho de que sus intervalos de confianza son menores, por lo que se podría considerar un estimador más robusto.

Otro de los problemas asociados a las estimaciones de abundancia es la determinación del tamaño de la muestra. Las simulaciones indican que las muestras pueden presentar sesgos cuando el

tamaño poblacional es pequeño, o cuando pocos animales pueden ser marcados u observados. Un método simple de calcular el tamaño muestral es el propuesto por Jensen (1981), que es válido para los casos en que hay una sola recaptura. Este método permite calcular el número de animales a marcar con radio y el número de animales a observar. Con este procedimiento se pueden determinar los anchos de los intervalos de confianza esperados en función del costo calculado por la media aritmética.

Rice y Harder (1977) utilizan gráficas probadas con capturas repetidas. Sin embargo, estas gráficas sólo dan la posibilidad para marcas entre 0 a 25%, lo que, para determinados estudios, está por debajo del nivel requerido. Bartmann *et al.* (1987) aconsejan un 45% del total de animales para poblaciones pequeñas menores a 100 individuos.

Otros usos y consideraciones

Las transectas lineales son una buena técnica para estimar poblaciones. Deben cumplir dos supuestos básicos: uno, que los animales sobre la línea del transecto son siempre avistados; y, dos, que los animales no se mueven ante la presencia del observador. La radiotelemetría puede ser utilizada tanto como un chequeo de los supuestos o como factor de corrección.

Para el segundo caso, si se está trabajando con índices de abundancia -por ejemplo, conteo de huellas-, se puede calcular la tasa de pasaje del individuo marcado sobre el transecto durante cierto período. Esta corrección puede ser extrapolada al resto de los transectos,

siempre que se esté trabajando sobre un estrato homogéneo. Servin *et al.* (1987) utilizaron esta herramienta como factor de corrección para obtener un estimado de abundancia relativa de *Vulpes vulpes*. Básicamente transformaron el número de huellas en relación con la tasa de pasaje o cruce por cada transecta a fin de obtener el estimado de densidad.

Por otro lado, hay que tomar en cuenta diferentes conceptos y objetivos. Uno de ellos es la duración del estudio, ya que para estudios de corto plazo, las técnicas pueden ser apropiadas. Esto está asociado a la precisión de los resultados que se pueden lograr. Por el contrario, para estudios a largo plazo, las técnicas deben ser eficientes, estando asociadas muchas veces a costos operativos muy altos debido a que la calidad de los datos debe ser alta.

La principal aplicación de la radiotelemetría en las estimaciones de abundancia basadas en el método de marca-recaptura es que permite conocer el número real de animales marcados presentes en el área de estudio, sin violar ningún supuesto de los métodos. Aunque la media aritmética ponderada para estimados múltiples por el índice de Lincoln-Petersen es buena, se recomienda calcularlo a través del ajuste hipergeométrico, sobre todo en el caso del cálculo de las varianzas.

Conclusiones

1. Los costos operativos de la radiotelemetría son habitualmente elevados. Por esta razón, su utilidad en la estimación de abundancia por marca-recaptura disminuye ante la posibilidad de recurrir a otras técnicas de estimaciones de abundancia.

2. La radiotelemetría evita ciertos sesgos en estimadores de marca-recaptura. Pero los mismos también pueden solucionarse con un buen diseño de muestreo.

3. En casos de poblaciones no muy numerosas y con amplia capacidad de movimiento, su uso sería apropiado para

disminuir el sesgo de los estimadores. No obstante, siguen existiendo dificultades en las marcas y en las recapturas.

4. La utilización de la radiotelemetría como una técnica para obtener factores de corrección parece ser una aplicación más práctica. Aunque esto siempre implica mayores costos operativos.

Bibliografía

- BUCKLAND, S.T.; ANGANUZZI, A.A. y PÁEZ, E. (1987). *Métodos para la estimación de abundancia de mamíferos marinos*. Comisión Interamericana del Atún Tropical (CIAT).
- BARTMANN, R.N.; WHITE, G.C.; CARPENTER, L.H. y GARROTT, R.A. (1987). "Aerial mark-recapture estimates of confiner mule deer in pinyon-juniper goodland". *J. Wildl. Manage*, 51:41-46.
- CHAPMAN, D.G. (1951). "Some properties of the hypergeometric distribution with applications to zoological sample censuses". *Publ. Stat*, 1: 131-160. Univ. Calif. Berkeley.
- EBERHARDT, L.L. (1990). "Using radio-telemetry for mark-recapture studies with edge effects". *J. Appl. Ecol*, 27: 259-271.
- FISHER, R.A. (1922). "On the mathematical foundation of theoretical statistics". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: A Mathematical and Physical Sciences*. 222: 309-368.
- FISHER, R.A. (1925). "Theory of statistical estimation". *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 22:700-725.
- JENSEN, A.L. (1981). "Sample size for single mark and single recapture experiments". *Trans. Am. Fish. Soc.*, 110: 455-458.
- LEHMANN, E.L. (1983). *Theory of point estimation*. New York, John Wiley and Sons.
- MILLER, S.D.; BECKER, E.F. y BALLARD, W.H. (1987). "Black and brown bear density estimates using modified capture-recapture techniques in Alaska". *Int. Conference on Bear Research and Management*, 7, 23-25.
- MOOD, A.M.; GRAYBILL, F.A. y BOES, D.C. (1974). *Introduction of the theory of statistics*. New York, McGraw-Hill.
- OTIS, D.L.; BURNHAM, K.P.; WHITE, G.C. y ANDERSON, D.R. (1978). "Statistical inference from capture data on closed animal populations". *Wildlife Monograph* 62.
- RICE, W. y HARDER, J.D. (1977). "Application of multiple aerial sampling to a mark-recapture census of white-tailed deer". *J. Wild. Manage*, 41(2): 197-206.
- SEBER, G.A.F. (1973). *The estimation of animal abundance and related parameters*. London, Griffin & Co.
- SEBER, G.A.F. (1986). "A review of estimating animal abundance". *Biometrics*, 42:267-292.
- SERVI, J.I.; RAU, J.R. y DELIBES, M. (1987). "Use of radio-tracking to improve the estimation by track counts of the relative abundance of red fox". *A. Therio*, 32(30): 489-492.
- WHITE, G.C.; ANDERSON, D.R.; BURNHAM, K.P. y OTIS, D.L. (1982). *Capture-recapture and removal methods for sampling closed populations*. Los Alamos, NM. Los Alamos National Laboratory.
- WHITE, G.C. y GARROT, R.A. (1990). *Analysis of radio-tracking data*. London, Academic Press, Inc. Oval Road.