

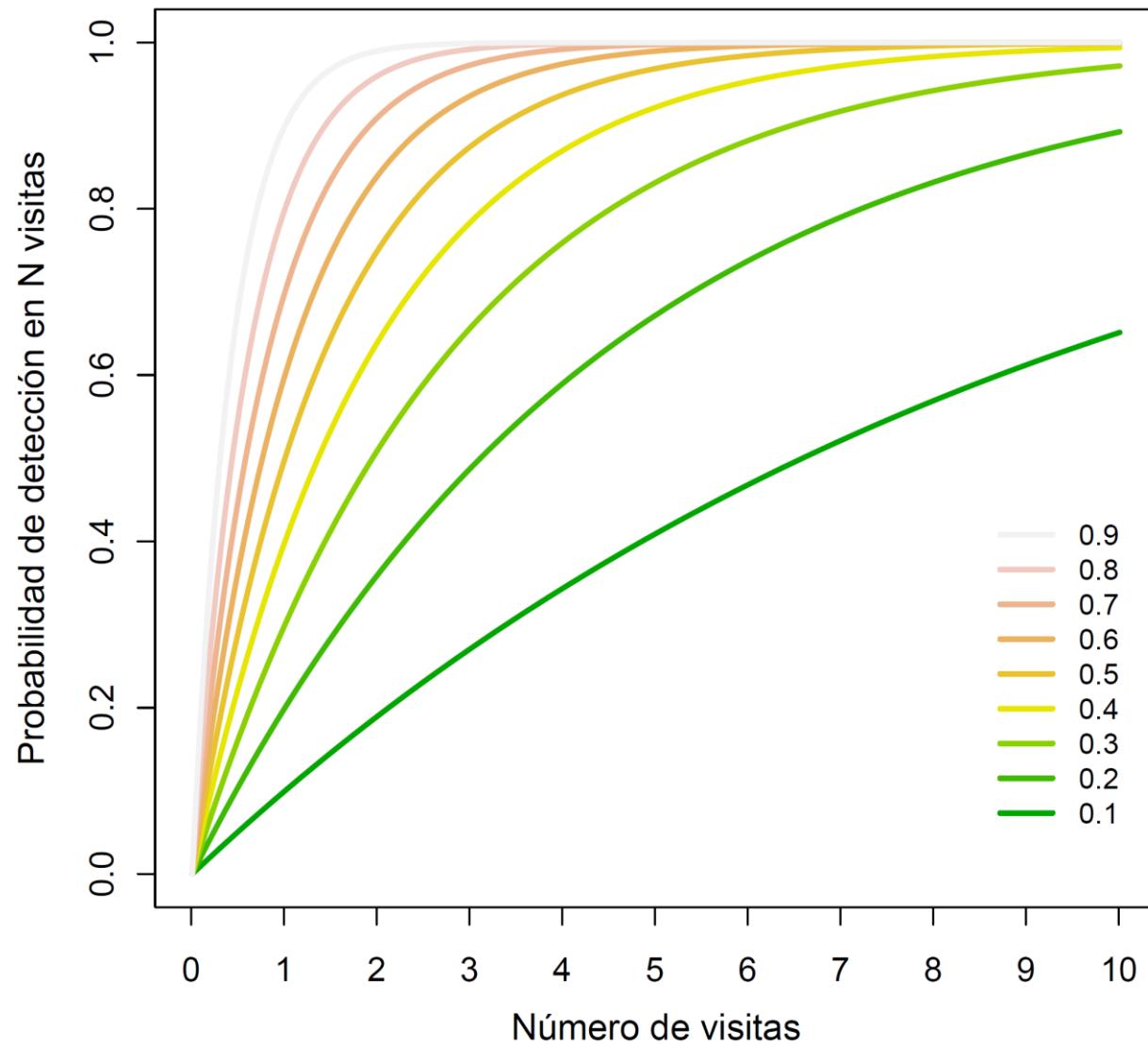
Métodos de captura- recaptura espacialmente explícitos

José Jiménez García-Herrera
IREC-CSIC

... y ¿Por qué hay que utilizar modelos?



PROBABILIDADES DE DETECCIÓN



¿ De que estamos
hablando?

Como lo que vemos no es
la realidad, usamos
herramientas matemáticas
para **estimar** la realidad

SEGUIMIENTO

*La mayoría de las cuestiones más importantes de la vida
son sólo problemas de probabilidad*

Pierre-Simon Laplace

DETECTABILIDAD

Métodos de estima de densidades

- Índices poblacionales  **Desaconsejados**
- Métodos jerárquicos (que calculan simultáneamente la detección y la ocupación):
 - Muestreo de distancias
 - Captura-recaptura  **Modelos de referencia**
 - Doble observador
 - Modelos de extracción
 - Modelos de ocupación (se emplean como sustitutivos de estima de tamaños poblacionales)
 - Modelos binomiales mixtos (estiman tamaños poblacionales, pero sin relación a un ámbito espacial)

Captura-recaptura

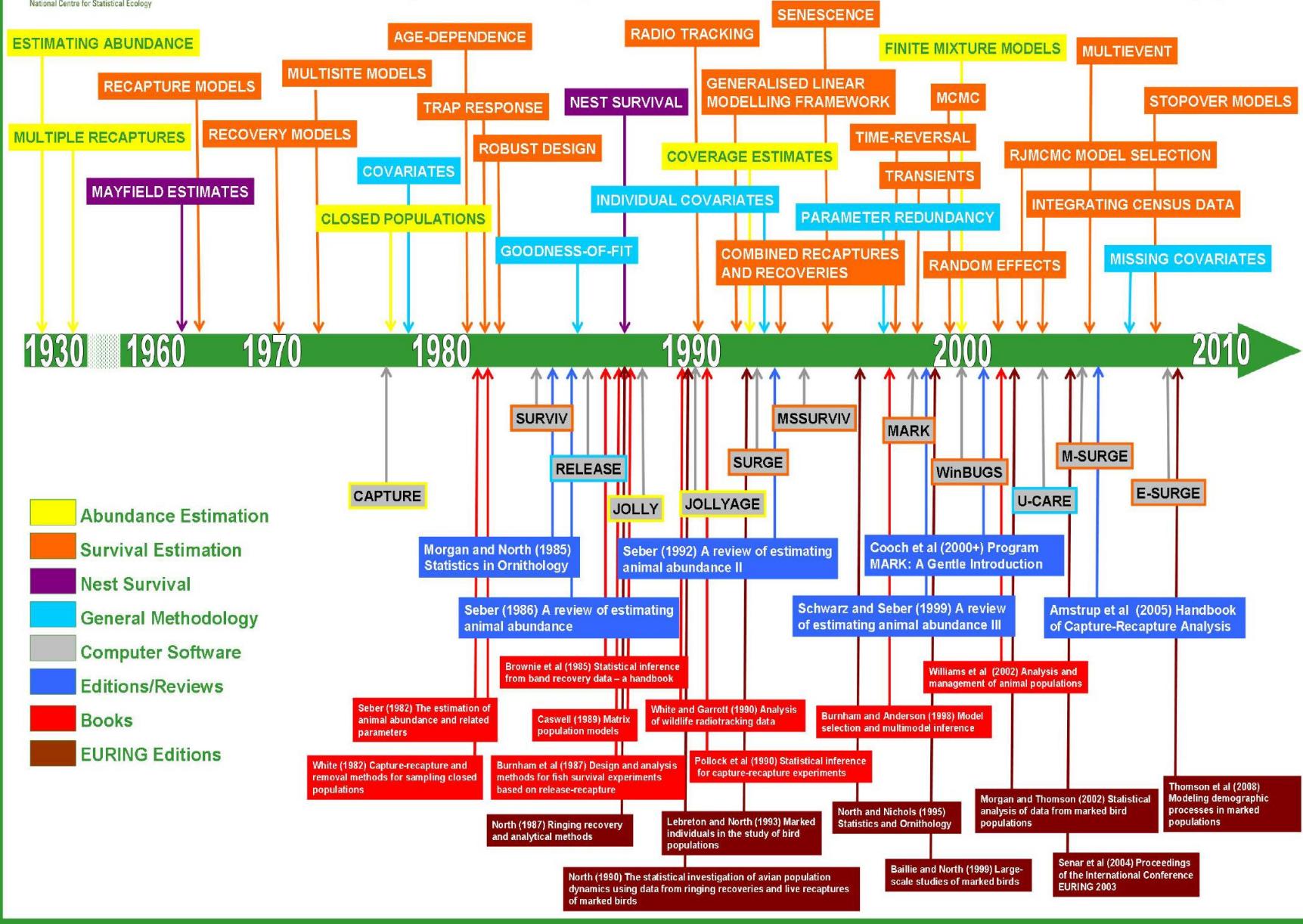
The diagram features a central light green arrow pointing from left to right. Three rounded rectangular boxes are positioned along the arrow: a dark green box on the left containing the text 'Modelos simples', a medium green box in the middle containing 'Modelos complejos', and a light green box on the right containing 'Modelos espaciales'. The boxes are slightly offset from the arrow's path.

Modelos simples

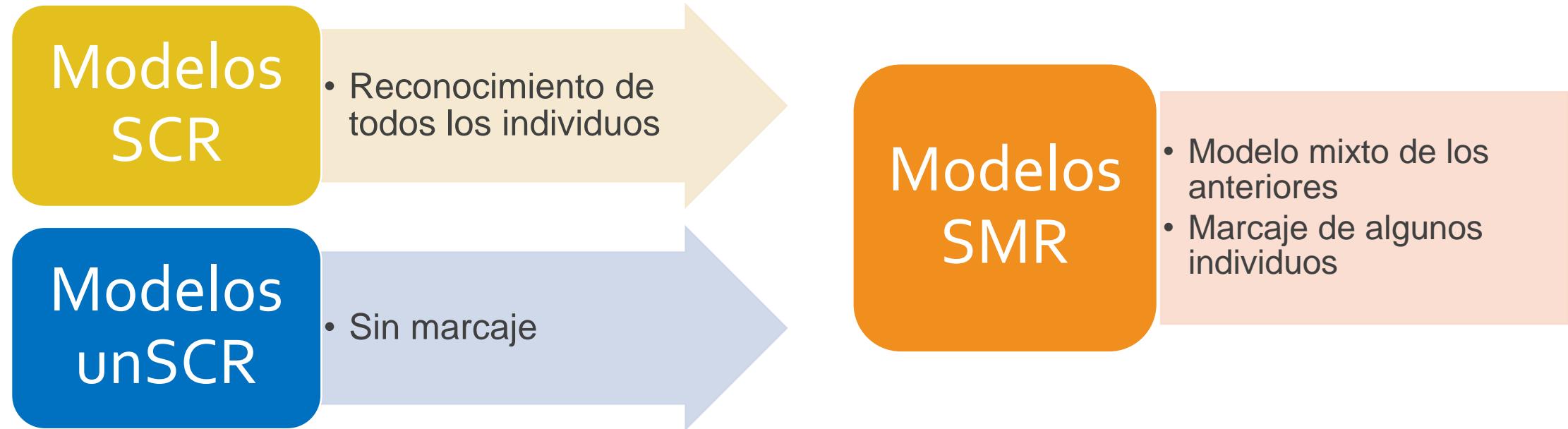
Modelos complejos

Modelos espaciales

A History of Capture-Recapture in Ecology

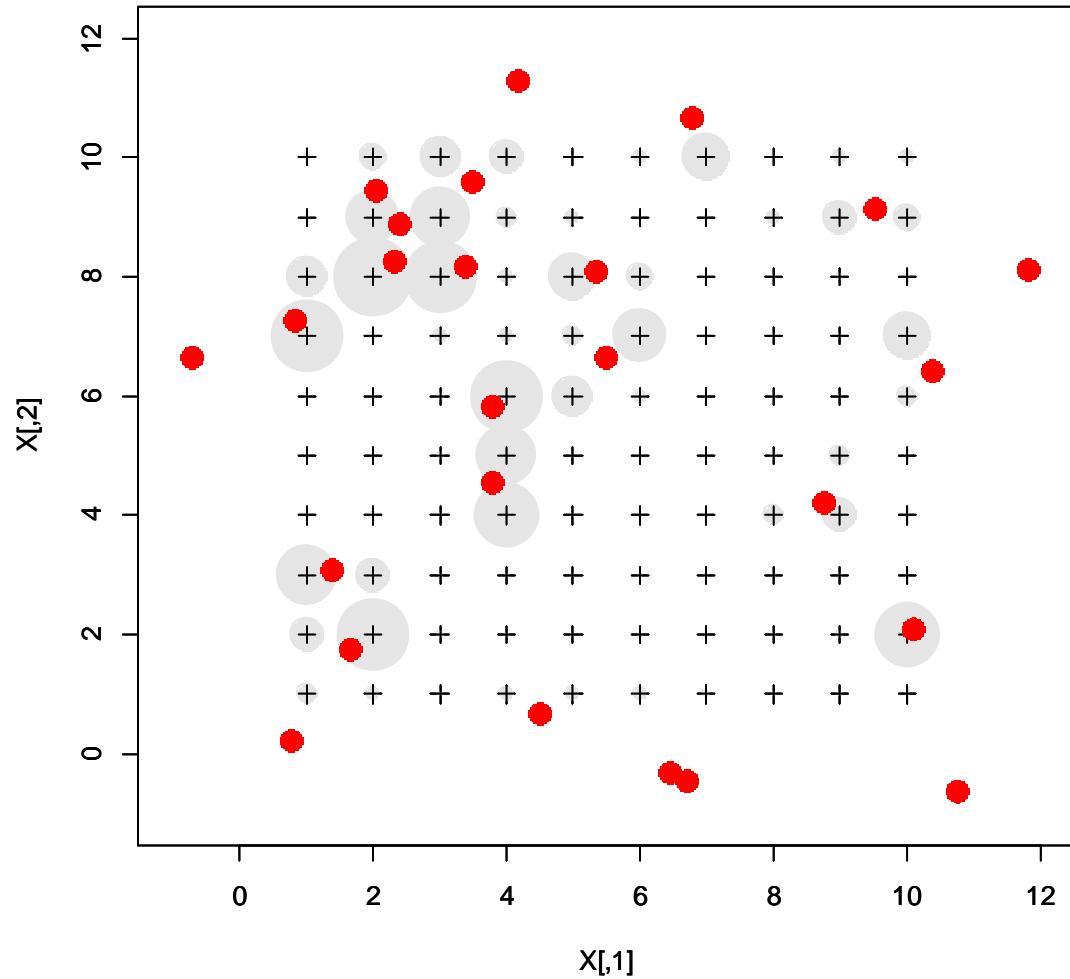


Modelos de captura espaciales



Debilidades de la captura-recaptura no espacial

Heterogeneidad en la probabilidad de detección



En la CR no espacial hay una heterogeneidad intrínseca, consecuencia de la diferente probabilidad de captura de los animales en las diferentes cámaras/trampas

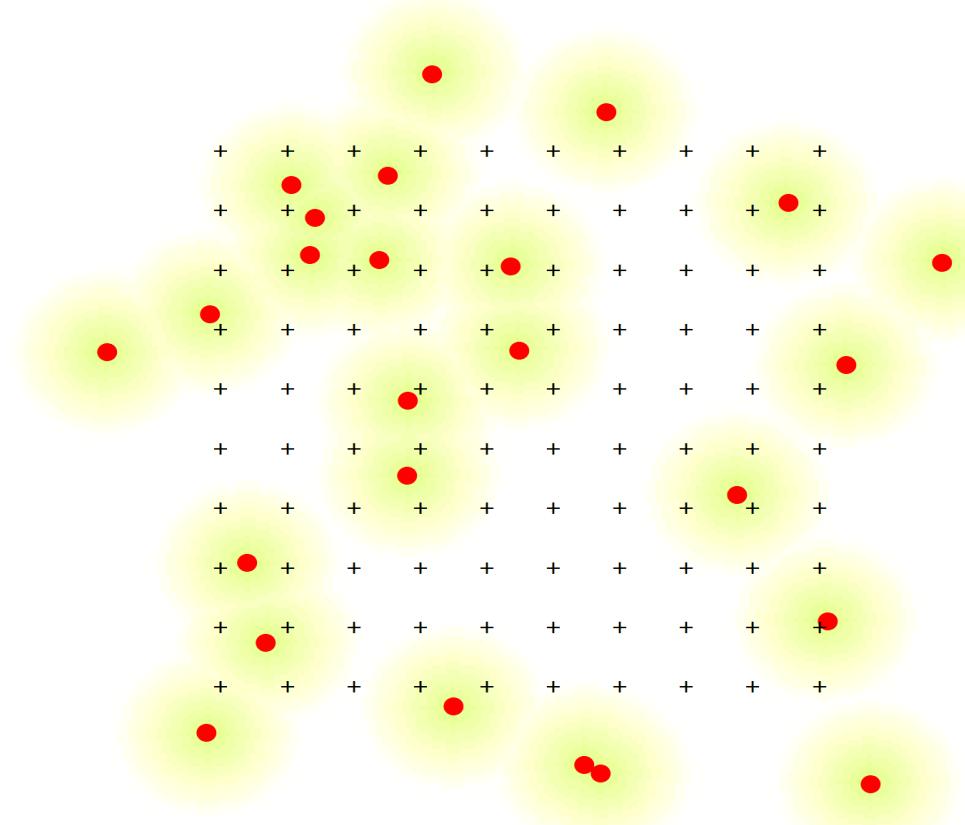
Indefinición del área de muestreo efectiva



En la CR no espacial se calcula el “área de muestreo efectiva” mediante asunciones *ad hoc* sobre el movimiento de los animales, de forma externa al modelo

¿Y si se añade la información espacial a la captura-recaptura?

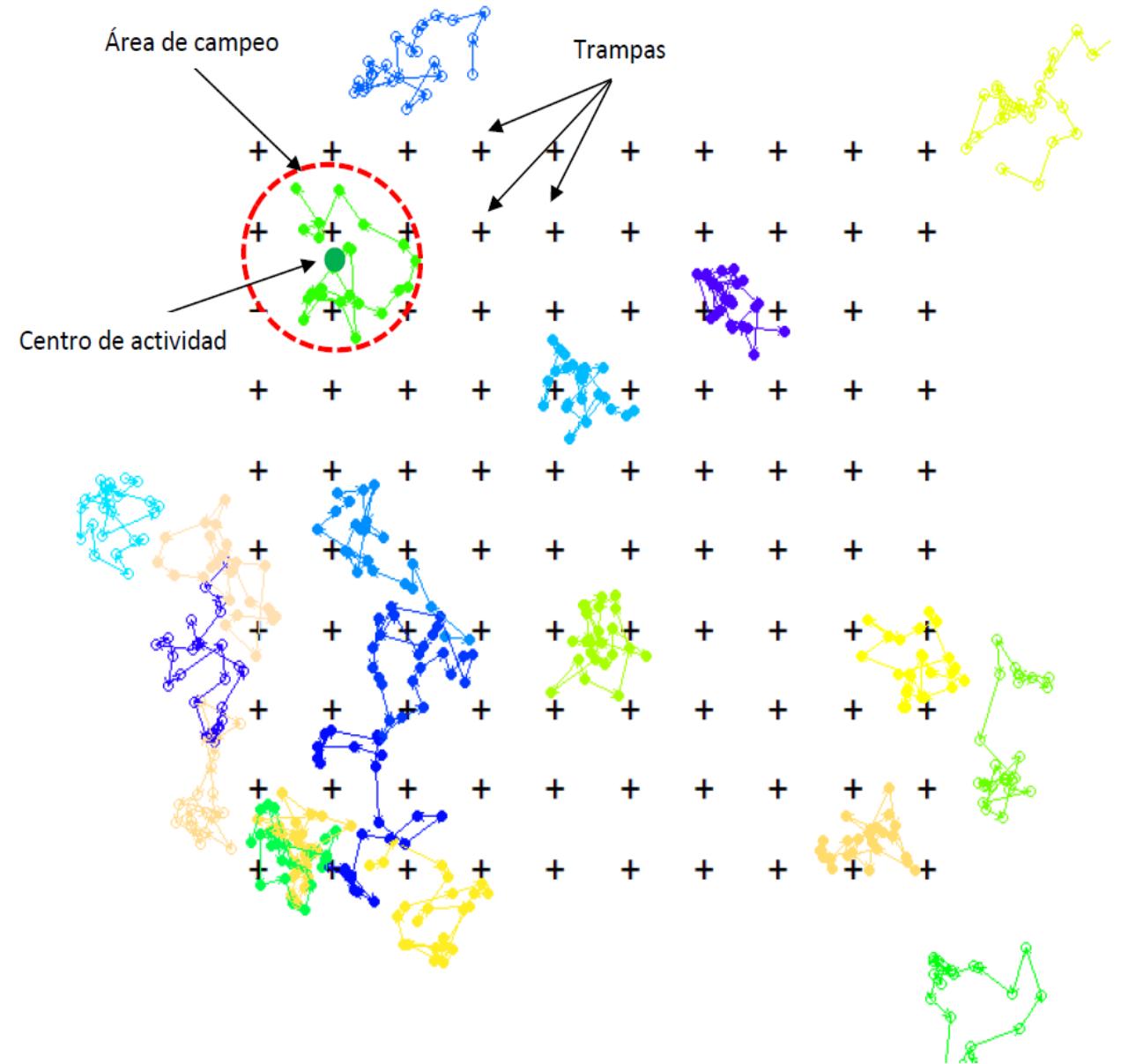
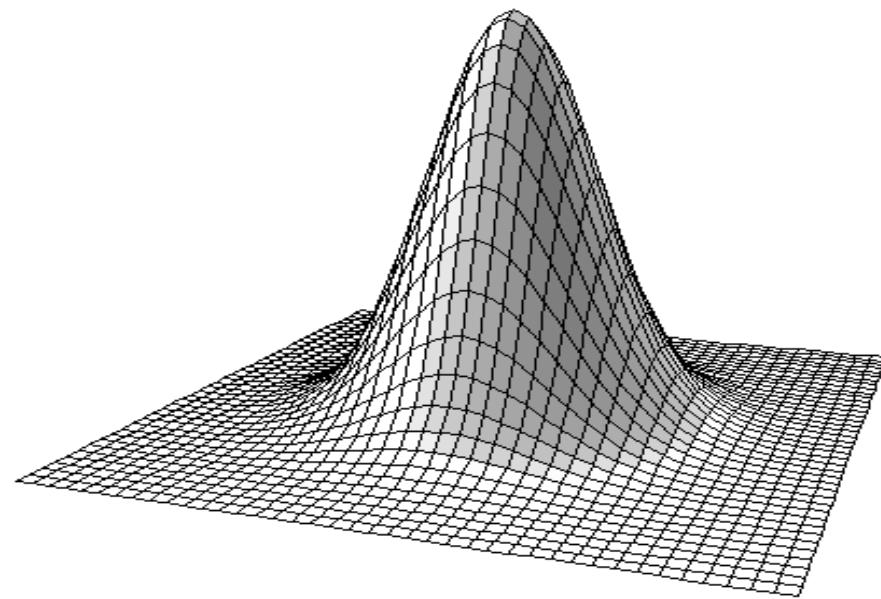
Detección como una distribución seminormal bivariada

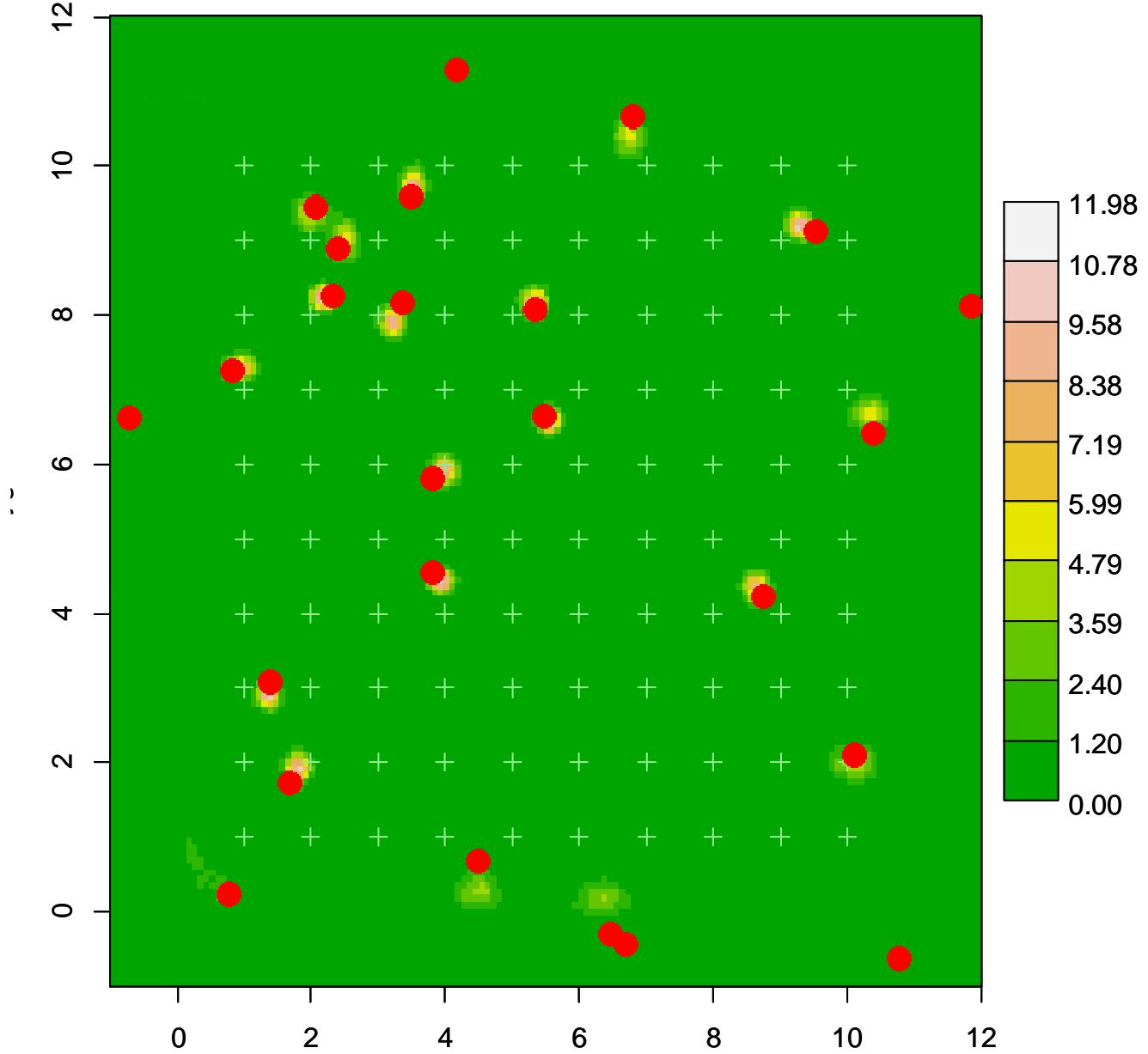


Si consideramos que la probabilidad de detección es una función seminormal, dependiente de la distancia euclídea entre la trampa y el centro de actividad, podemos deducir estos centros a partir de los históricos de captura de las trampas en el espacio

... tenemos los SCR

$$\lambda_{ijk} = \lambda_o e^{\left(-\frac{d_{ijk}^2}{2\sigma^2} \right)}$$





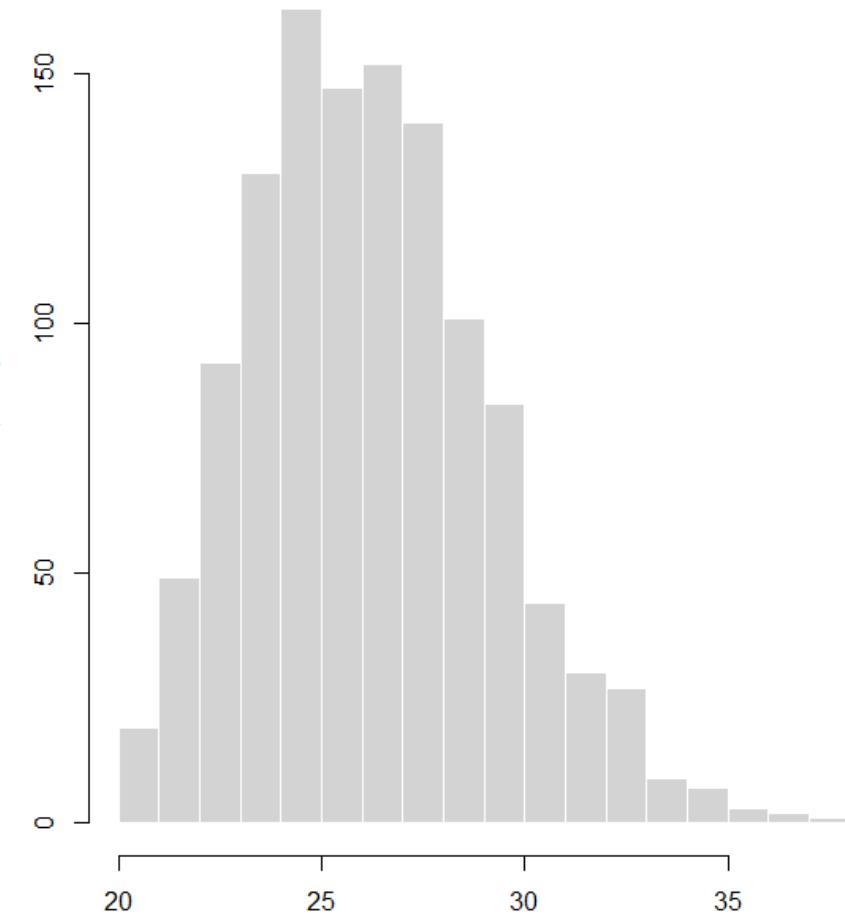
Con el muestreo del espacio de estados se obtienen un ráster de probabilidades de ubicación de los centros de actividad/centros de áreas de campeo

¿Y para que sirven estos modelos?

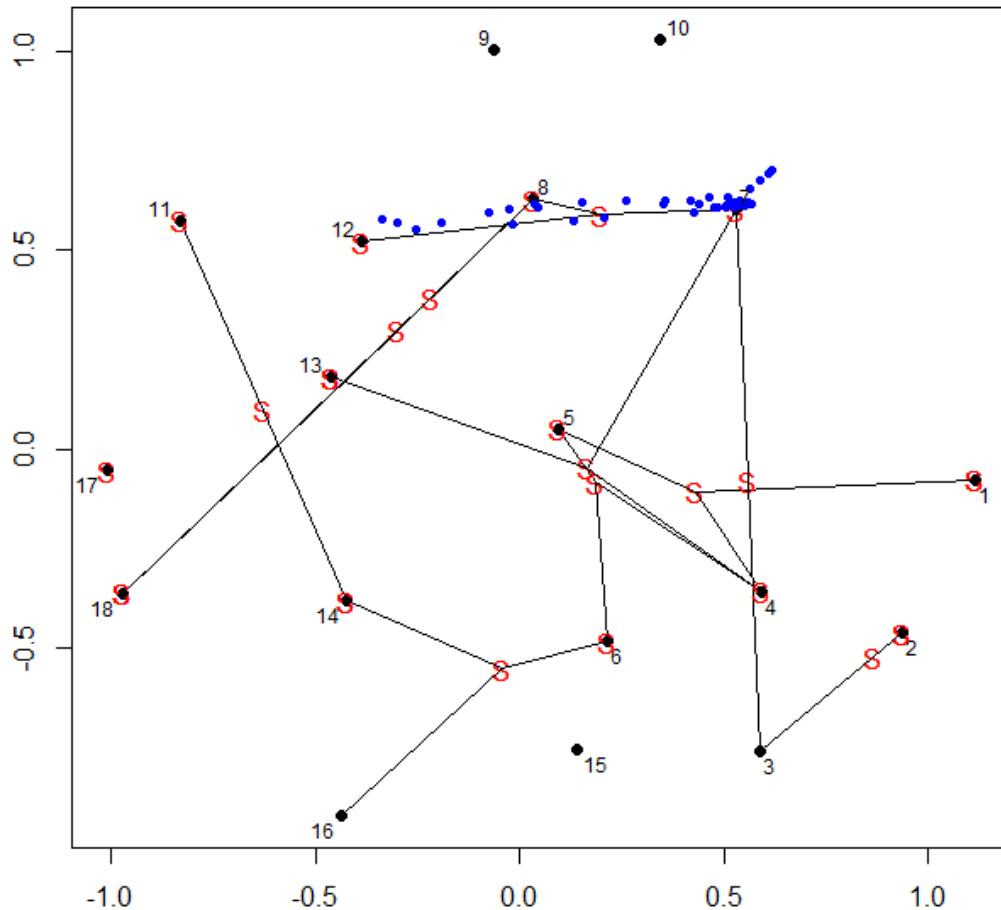
... no sólo para estimar densidades

Número y densidad

```
> summary(out[,c("N","D","alpha0","alpha1")])  
  
Iterations = 101:500  
Thinning interval = 1  
Number of chains = 3  
Sample size per chain = 400  
  
1. Empirical mean and standard deviation for each variable,  
   plus standard error of the mean:  
  
          Mean        SD  Naive SE Time-series SE  
N     26.7225 2.95400 0.0852746      0.1212628  
D     0.1581 0.01748 0.0005046      0.0007175  
alpha0 -2.3841 0.09729 0.0028085      0.0057464  
alpha1  2.1453 0.14701 0.0042439      0.0100634  
  
2. Quantiles for each variable:  
  
       2.5%    25%    50%    75%  97.5%  
N     22.0000 25.0000 26.5000 29.0000 33.0000  
D     0.1302 0.1479 0.1568 0.1716 0.1953  
alpha0 -2.5791 -2.4440 -2.3827 -2.3189 -2.2069  
alpha1  1.8440 2.0508 2.1431 2.2462 2.4233  
  
> |
```

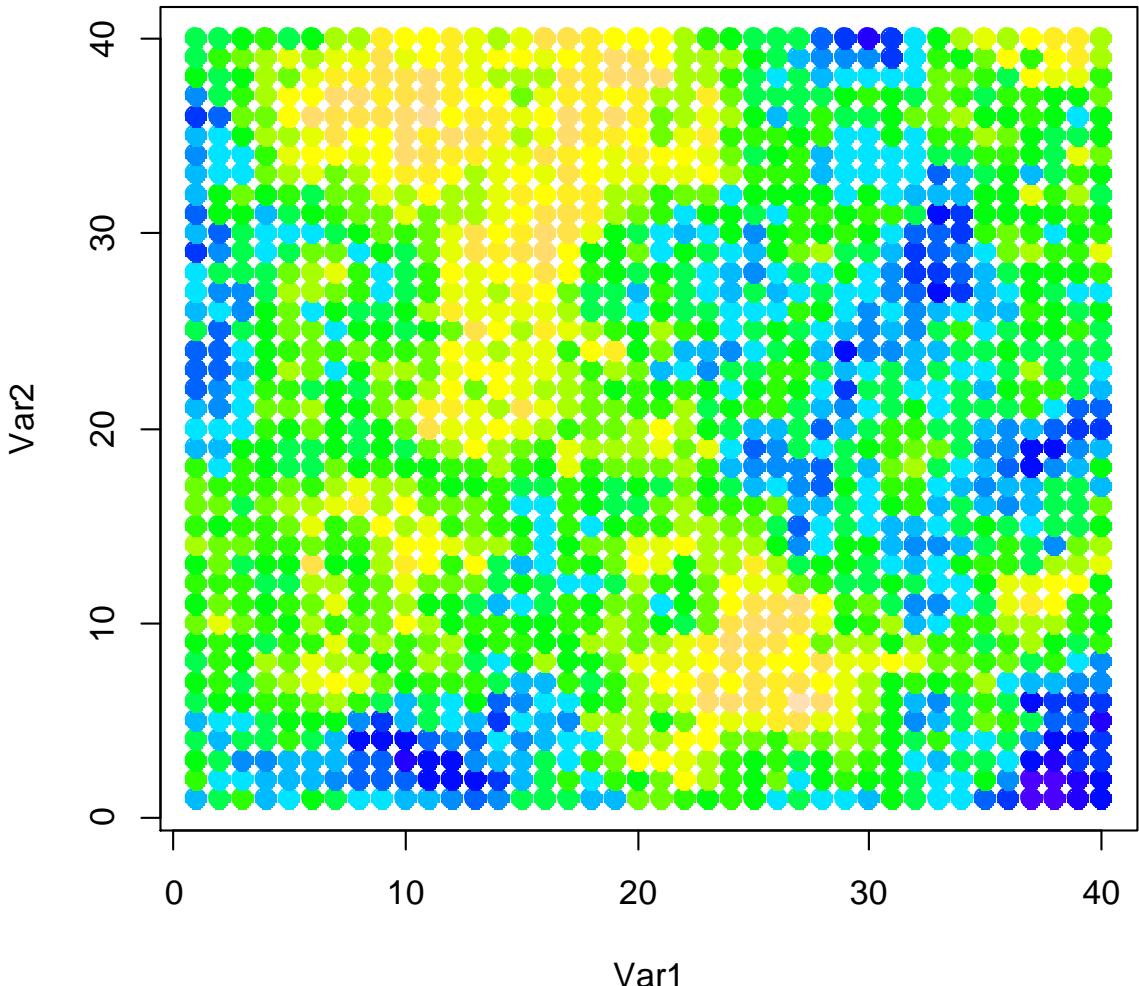


Análisis del movimiento



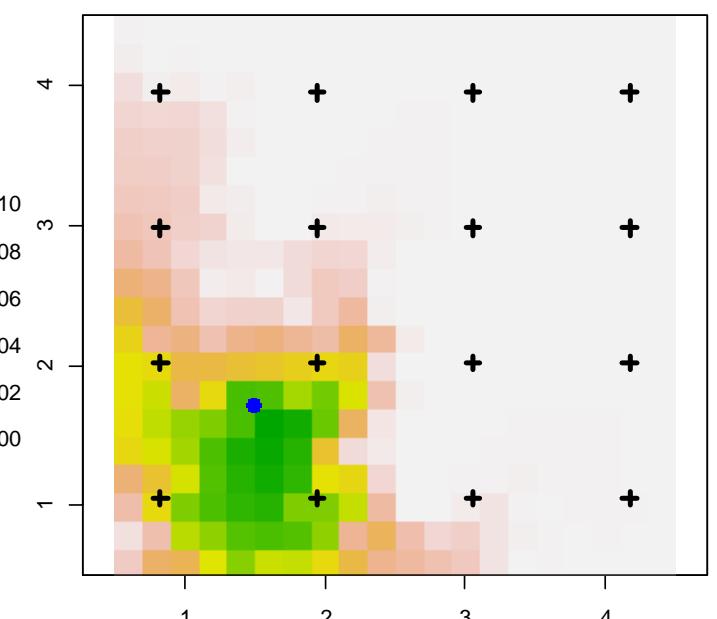
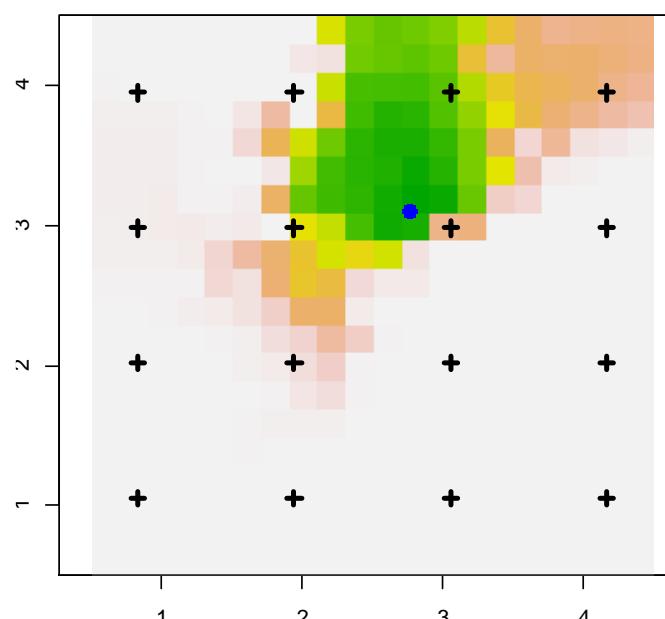
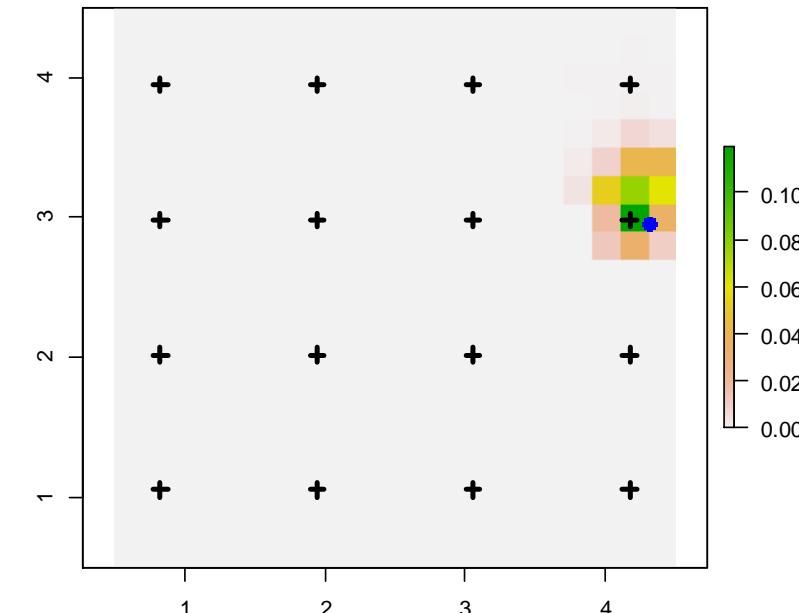
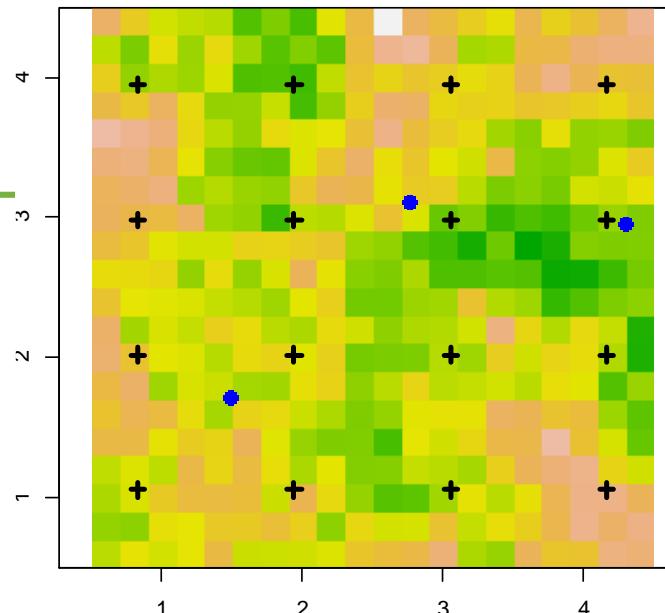
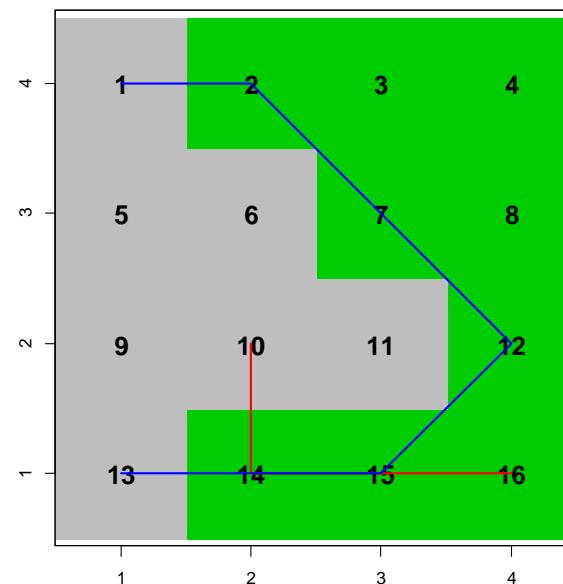
Selección de recursos

Utilizamos el ráster de recursos (vegetación, altitud, inundación...) como covariable para la ubicación de los centros de actividad

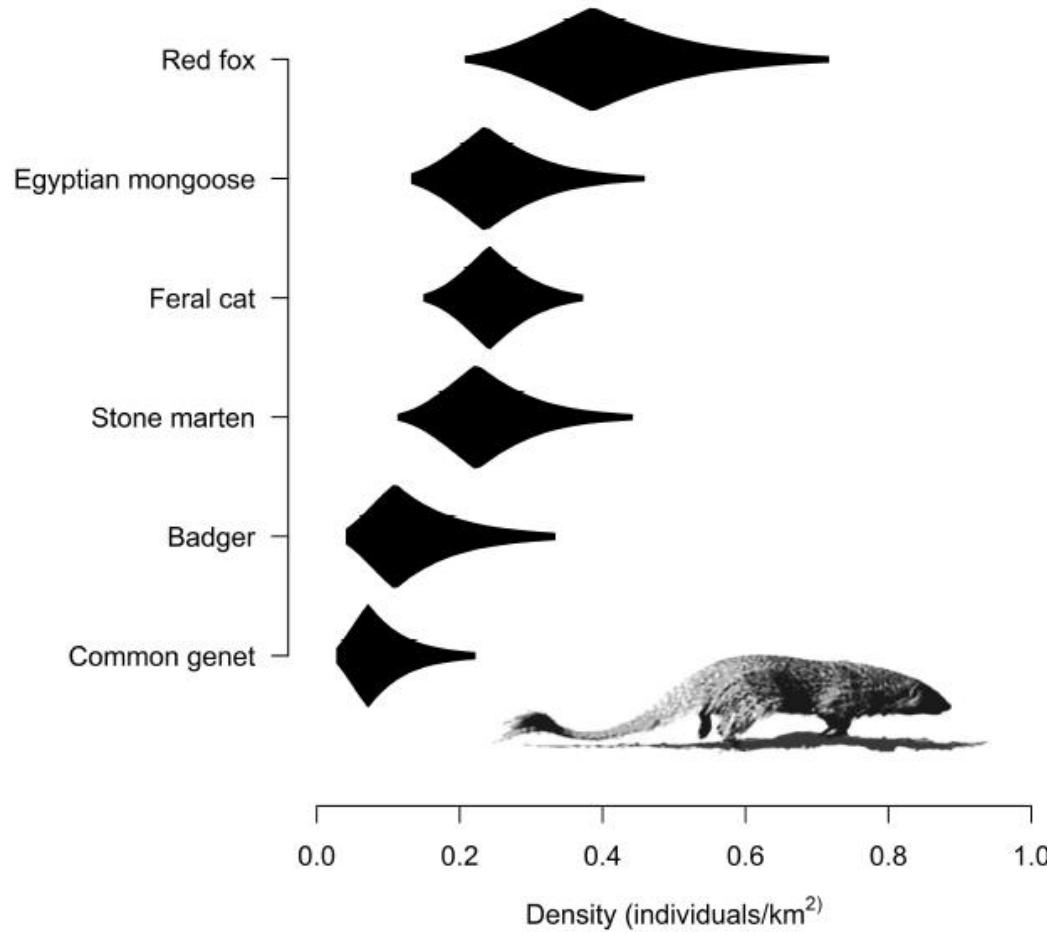


Conectividad

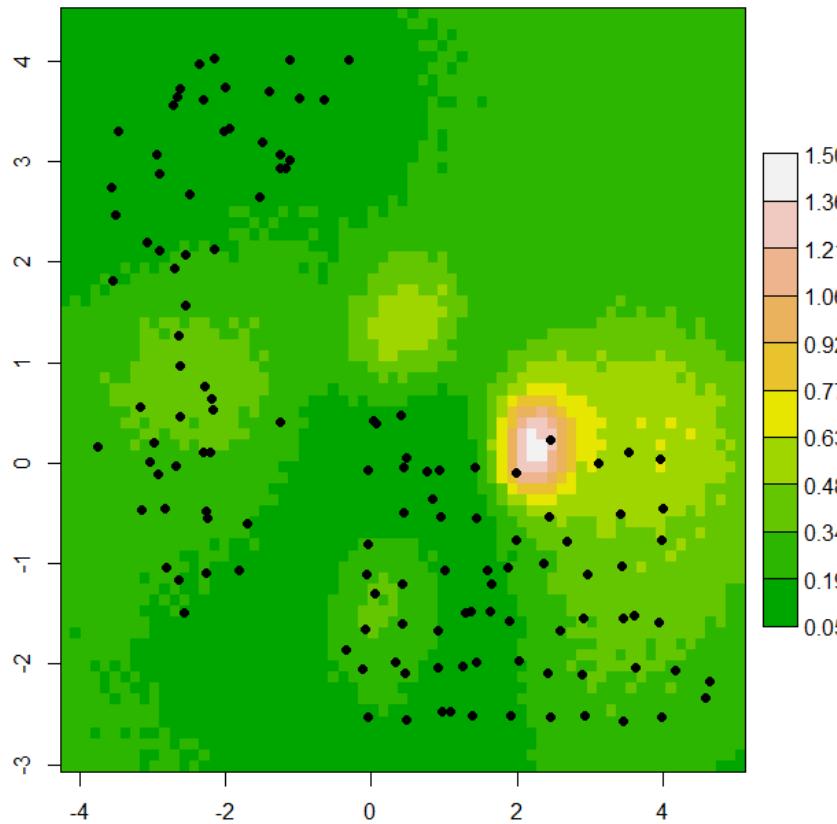
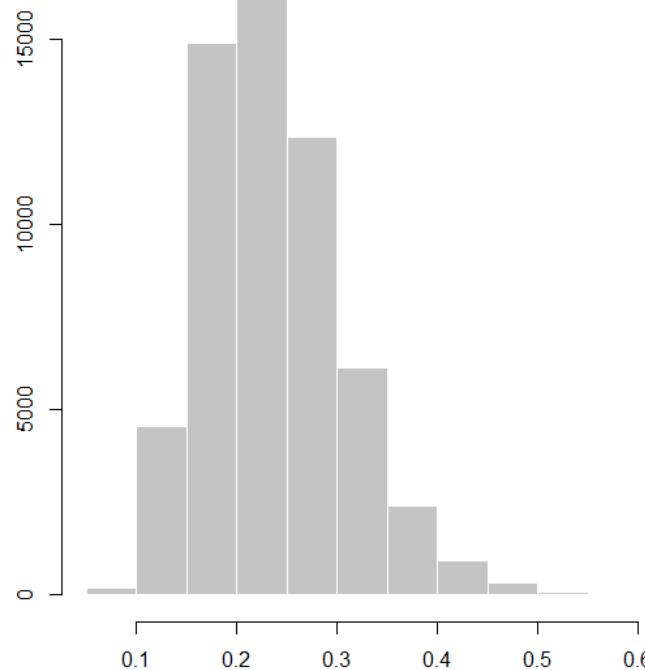
Generando un ráster de costes, lo usamos como covariable de la probabilidad de la ubicación de los centros de actividad



Estima de comunidades completas



... y gestión. Ejemplo: gato asilvestrado



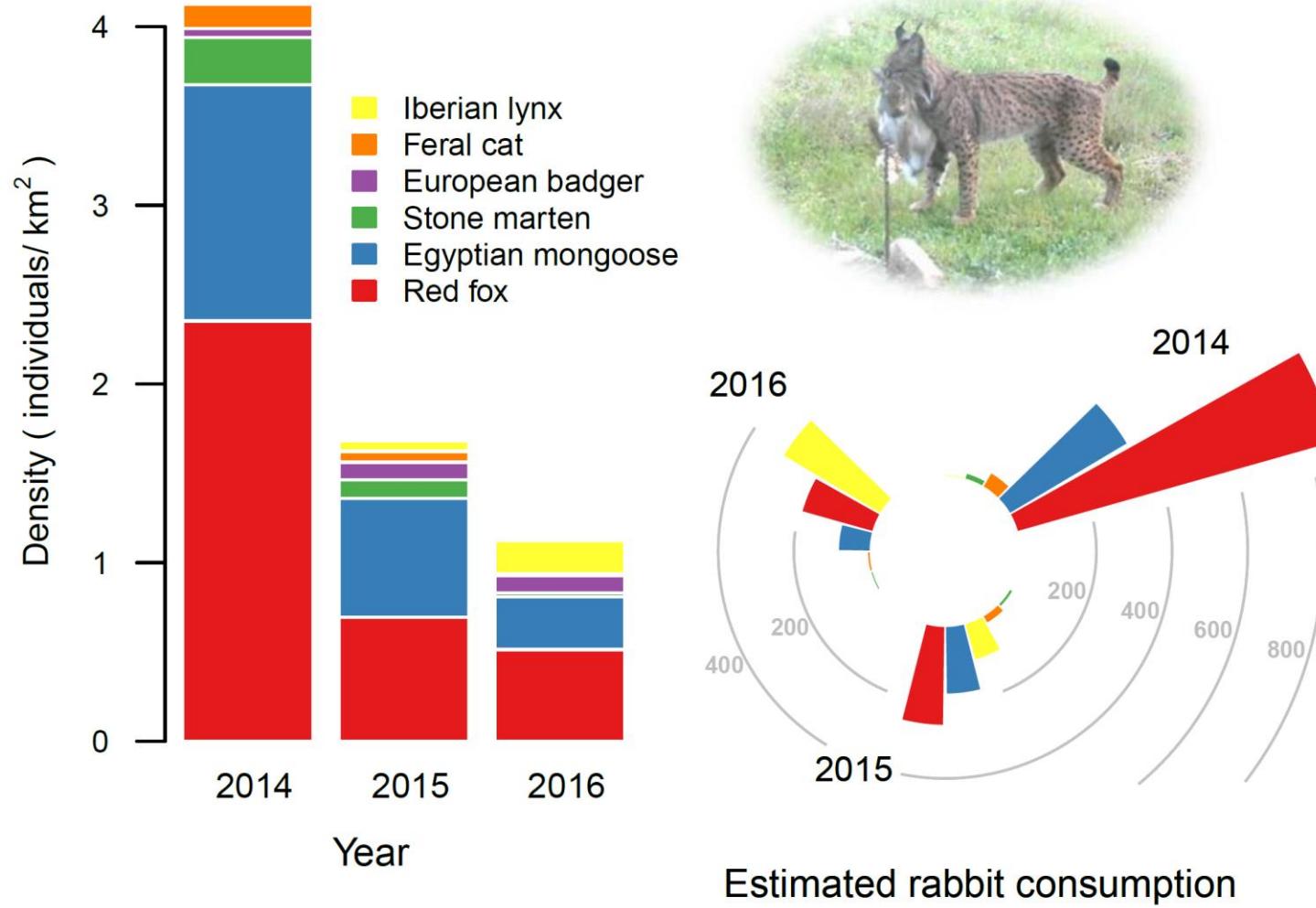
$D=0.234$
área=71.37, entonces
 $N=16.71$

Sí se han capturado 15, sólo quedan 1-2 sin capturar...

Pero... ¿Cuánto se pueden desplazar desde el exterior del espacio de estados?

Si $\sigma=1$, el desplazamiento es de hasta 3 km, y podemos pensar que van a seguir apareciendo

... Ejemplo: respuesta de los mesopredadores al lince



Premisas (y otras cosas...)

Premisas, diseño u otras cosas...

- Los dispositivos de detección deben estar ubicados de forma que se permita la captura de los individuos en más de uno de estos dispositivos. Las capturas deben estar correlacionadas espacialmente
- La población debe ser cerrada, demográfica y geográficamente
- Los individuos deben tener una distribución uniforme en el espacio (o debe modelarse esa distribución no homogénea)
- La detectabilidad entre individuos debe ser independiente (atención al gregarismo, y al movimiento no independiente entre individuos)
- Hay que realizar siempre test de bondad del ajuste. La sobredispersión puede ser abordada mediante el uso de la binomial negativa
- Mucho cuidado en SMR con el **estatus de marcaje desconocido**
- Hay posibilidad de realizar modelos SCR integrados. En ellos, prestad atención a las características de la información a integrar

Variantes

- Todos estos modelos admiten modificaciones o variantes para incorporar:
 - Tipología de la trampa o de los atrayentes
 - Operatividad de los dispositivos
 - Heterogeneidad (en detección) por individuo, por sexo, por tamaño del área de campeo)
 - Evolución temporal en la detectabilidad por los dispositivos
 - Comportamiento global de la población ante los dispositivos
 - Comportamiento local frente a cada tipo de dispositivo
 - Extracción de individuos de la población
 - En el caso de SMR se pueden incorporar:
 - Animales reconocibles por marcas naturales
 - Fracción de población marcada con marcaje no reconocibles (collares con numeración invisible por crecimiento del pelo, por ejemplo)

Modelos SCR

Reconocimiento de todos los individuos



MOULTRIE



26°C 28.26inHg

FCBDH-00002

04 SEP 2015 07:30 pm

```

library(nimble)
## define the model
code <- nimbleCode({

  p0 ~ dunif(0,1)
  sigma ~ dunif(0,5)
  psi ~ dunif(0,1)

  for(i in 1:M){
    z[i] ~ dbern(psi)
    s[i,1] ~ dunif(xlim[1],xlim[2])
    s[i,2] ~ dunif(ylim[1],ylim[2])
    d2[i,1:J] <- pow(s[i,1]-X[1:J,1],2) + pow(s[i,2]-X[1:J,2],2)
    p[i,1:J] <- z[i]*p0*exp(- d2[i,1:J]/(2*sigma^2))

    for(j in 1:J){
      y[i,j] ~ dbin(p[i,j],K)
    }
  }
  N <- sum(z[1:M])
  D <- N/area
  })
}

```

```

library(nimble)
## define the model
code <- nimbleCode({

  p0 ~ dunif(0,1)
  sigma ~ dunif(0,5)
  psi ~ dunif(0,1)

  for(i in 1:M){
    z[i] ~ dbern(psi)
    s[i,1] ~ dunif(xlim[1],xlim[2])
    s[i,2] ~ dunif(ylim[1],ylim[2])
    d2[i,1:J] <- pow(s[i,1]-X[1:J,1],2) + pow(s[i,2]-X[1:J,2],2)
    p[i,1:J] <- z[i]*p0*exp(- d2[i,1:J]/(2*sigma^2))

    for(j in 1:J){
      y[i,j] ~ dbin(p[i,j],K)
    }
  }
  N <- sum(z[1:M])
  D <- N/area
}
)

```

Información *a priori*

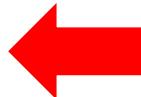
```

library(nimble)
## define the model
code <- nimbleCode({
  p0 ~ dunif(0,1)
  sigma ~ dunif(0,5)
  psi ~ dunif(0,1)

  for(i in 1:M){
    z[i] ~ dbern(psi)
    s[i,1] ~ dunif(xlim[1],xlim[2])
    s[i,2] ~ dunif(ylim[1],ylim[2])
    d2[i,1:J] <- pow(s[i,1]-X[1:J,1],2) + pow(s[i,2]-X[1:J,2],2)
    p[i,1:J] <- z[i]*p0*exp(- d2[i,1:J]/(2*sigma^2))

    for(j in 1:J){
      y[i,j] ~ dbin(p[i,j],K)
    }
  }
  N <- sum(z[1:M])
  D <- N/area
})

```



RATIO BASE DE DETECCIÓN

```

library(nimble)
## define the model
code <- nimbleCode({

  p0 ~ dunif(0,1)
  sigma ~ dunif(0,5)
  psi ~ dunif(0,1)

  for(i in 1:M){
    z[i] ~ dbern(psi)
    s[i,1] ~ dunif(xlim[1],xlim[2])
    s[i,2] ~ dunif(ylim[1],ylim[2])
    d2[i,1:J] <- pow(s[i,1]-X[1:J,1],2) + pow(s[i,2]-X[1:J,2],2)
    p[i,1:J] <- z[i]*p0*exp(- d2[i,1:J]/(2*sigma^2))

    for(j in 1:J){
      y[i,j] ~ dbin(p[i,j],K)
    }
  }
  N <- sum(z[1:M])
  D <- N/area
}
)

```



PARÁMETRO DE
MOVIMIENTO

```

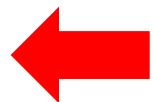
library(nimble)
## define the model
code <- nimbleCode({

  p0 ~ dunif(0,1)
  sigma ~ dunif(0,5)
  psi ~ dunif(0,1)

  for(i in 1:M){
    z[i] ~ dbern(psi)
    s[i,1] ~ dunif(xlim[1],xlim[2])
    s[i,2] ~ dunif(ylim[1],ylim[2])
    d2[i,1:J] <- pow(s[i,1]-X[1:J,1],2) + pow(s[i,2]-X[1:J,2],2)
    p[i,1:J] <- z[i]*p0*exp(- d2[i,1:J]/(2*sigma^2))

    for(j in 1:J){
      y[i,j] ~ dbin(p[i,j],K)
    }
  }
  N <- sum(z[1:M])
  D <- N/area
}
)

```



PARÁMETRO DE AUMENTADO DE DATOS

```

library(nimble)
## define the model
code <- nimbleCode({


  p0 ~ dunif(0,1)
  sigma ~ dunif(0,5)
  psi ~ dunif(0,1)

  for(i in 1:M) {
    z[i] ~ dbin(size = 1, psi)
    s[i,1] ~ dunif(xlim[1],xlim[2])
    s[i,2] ~ dunif(ylim[1],ylim[2])
    d2[i,1:J] <- pow(s[i,1]-X[1:J,1],2) + pow(s[i,2]-X[1:J,2],2)
    p[i,1:J] <- z[i]*p0*exp(- d2[i,1:J]/(2*sigma^2))

    for(j in 1:J) {
      y[i,j] ~ dbin(p[i,j],K)
    }
  }
  N <- sum(z[1:M])
  D <- N/area
}

})

```

**PROCESO
ECOLÓGICO**

```

library(nimble)
## define the model
code <- nimbleCode({

  p0 ~ dunif(0,1)
  sigma ~ dunif(0,5)
  psi ~ dunif(0,1)

  for(i in 1:M){
    z[i] ~ dbin(size = 1, psi)
    s[i,1] ~ dunif(xlim[1],xlim[2])
    s[i,2] ~ dunif(ylim[1],ylim[2]) ← ESTUDIAMOS TODO EL ESPACIO
    d2[i,1:J] <- pow(s[i,1]-X[1:J,1],2) + pow(s[i,2]-X[1:J,2],2)
    p[i,1:J] <- z[i]*p0*exp(- d2[i,1:J]/(2*sigma^2))

    for(j in 1:J){
      y[i,j] ~ dbin(p[i,j],K)
    }
  }
  N <- sum(z[1:M])
  D <- N/area
}
)

```

```

library(nimble)
## define the model
code <- nimbleCode({

  p0 ~ dunif(0,1)
  sigma ~ dunif(0,5)
  psi ~ dunif(0,1)

  for(i in 1:M){
    z[i] ~ dbin(size = 1, psi)
    s[i,1] ~ dunif(xlim[1],xlim[2])
    s[i,2] ~ dunif(ylim[1],ylim[2])
    d2[i,1:J] <- pow(s[i,1]-X[1:J,1],2) + pow(s[i,2]-X[1:J,2],2)
    p[i,1:J] <- z[i]*p0*exp(- d2[i,1:J]/(2*sigma^2))

    for(j in 1:J){
      y[i,j] ~ dbin(p[i,j],K)
    }
  }
  N <- sum(z[1:M])
  D <- N/area
}
)

```

COORDENADAS DE LA CÁMARA-TRAMPA

```

library(nimble)
## define the model
code <- nimbleCode({

  p0 ~ dunif(0,1)
  sigma ~ dunif(0,5)
  psi ~ dunif(0,1)

  for(i in 1:M){
    z[i] ~ dbin(size = 1, psi)
    s[i,1] ~ dunif(xlim[1],xlim[2])
    s[i,2] ~ dunif(ylim[1],ylim[2])
    d2[i,1:J] <- pow(s[i,1]-X[1:J,1],2) + pow(s[i,2]-X[1:J,2],2)
    p[i,1:J] <- z[i]*p0*exp(- d2[i,1:J]/(2*sigma^2))

    for(j in 1:J){
      y[i,j] ~ dbin(p[i,j],K)
    }
  }
  N <- sum(z[1:M])
  D <- N/area
}
)

```

CENTROS DE ACTIVIDAD (LATENTES)

```

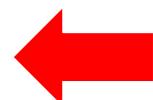
library(nimble)
## define the model
code <- nimbleCode({

  p0 ~ dunif(0,1)
  sigma ~ dunif(0,5)
  psi ~ dunif(0,1)

  for(i in 1:M){
    z[i] ~ dbin(size = 1, psi)
    s[i,1] ~ dunif(xlim[1],xlim[2])
    s[i,2] ~ dunif(ylim[1],ylim[2])
    d2[i,1:J] <- pow(s[i,1]-X[1:J,1],2) + pow(s[i,2]-X[1:J,2],2)
    p[i,1:J] <- z[i]*p0*exp(- d2[i,1:J]/(2*sigma^2))

    for(j in 1:J){
      y[i,j] ~ dbin(p[i,j],K)
    }
  }
  N <- sum(z[1:M])
  D <- N/area
}
)

```

 PROBABILIDAD

$$\lambda_{ijk} = \lambda_0 e^{\left(-\frac{d_{ijk}^2}{2\sigma^2}\right)}$$

```

library(nimble)
## define the model
code <- nimbleCode({

  p0 ~ dunif(0,1)
  sigma ~ dunif(0,5)
  psi ~ dunif(0,1)

  for(i in 1:M){
    z[i] ~ dbin(size = 1, psi)
    s[i,1] ~ dunif(xlim[1],xlim[2])
    s[i,2] ~ dunif(ylim[1],ylim[2])
    d2[i,1:J] <- pow(s[i,1]-X[1:J,1],2) + pow(s[i,2]-X[1:J,2],2)
    p[i,1:J] <- z[i]*p0*exp(- d2[i,1:J]/(2*sigma^2))

    for(j in 1:J){
      y[i,j] ~ dbin(p[i,j],K)
    }
  }
  N <- sum(z[1:M])
  D <- N/area
}
)

```

PROCESO DE OBSERVACIÓN

```

library(nimble)
## define the model
code <- nimbleCode({

  p0 ~ dunif(0,1)
  sigma ~ dunif(0,5)
  psi ~ dunif(0,1)

  for(i in 1:M){
    z[i] ~ dbin(size = 1, psi)
    s[i,1] ~ dunif(xlim[1],xlim[2])
    s[i,2] ~ dunif(ylim[1],ylim[2])
    d2[i,1:J] <- pow(s[i,1]-X[1:J,1],2) + pow(s[i,2]-X[1:J,2],2)
    p[i,1:J] <- z[i]*p0*exp(- d2[i,1:J]/(2*sigma^2))

    for(j in 1:J){
      y[i,j] ~ dbin(p[i,j],K)
    }
  }
  N <- sum(z[1:M])
  D <- N/area
})

```

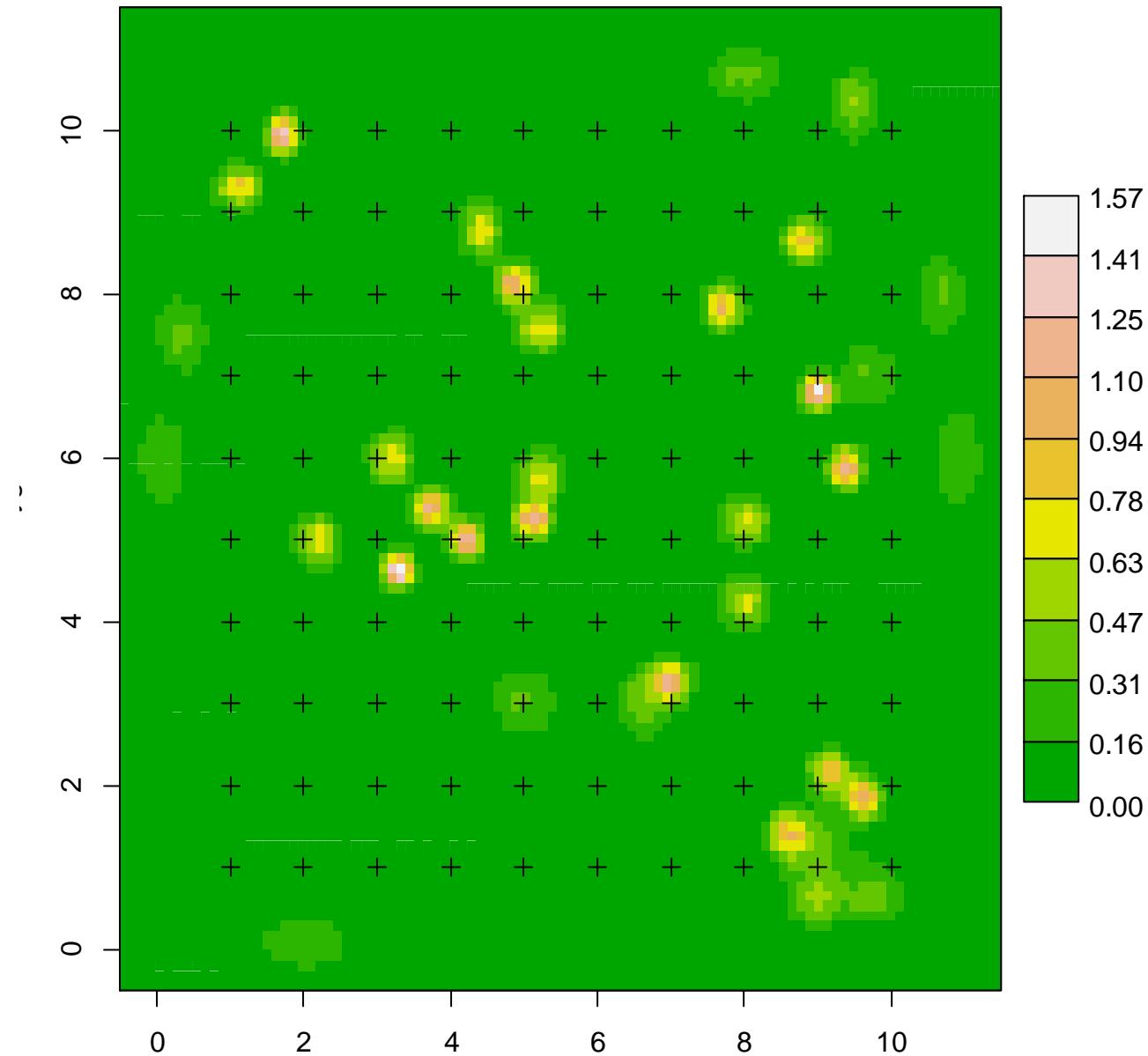
VAMOS A USAR COMO DATOS UNA MATRIZ DE LOS INDIVIDUOS RECONOCIDOS EN CADA TRAMPA Y OCASIÓN, CON LA INFORMACIÓN DE COORDENADAS DE LAS CÁMARAS-TRAMPA

¿Qué datos tenemos del campo?

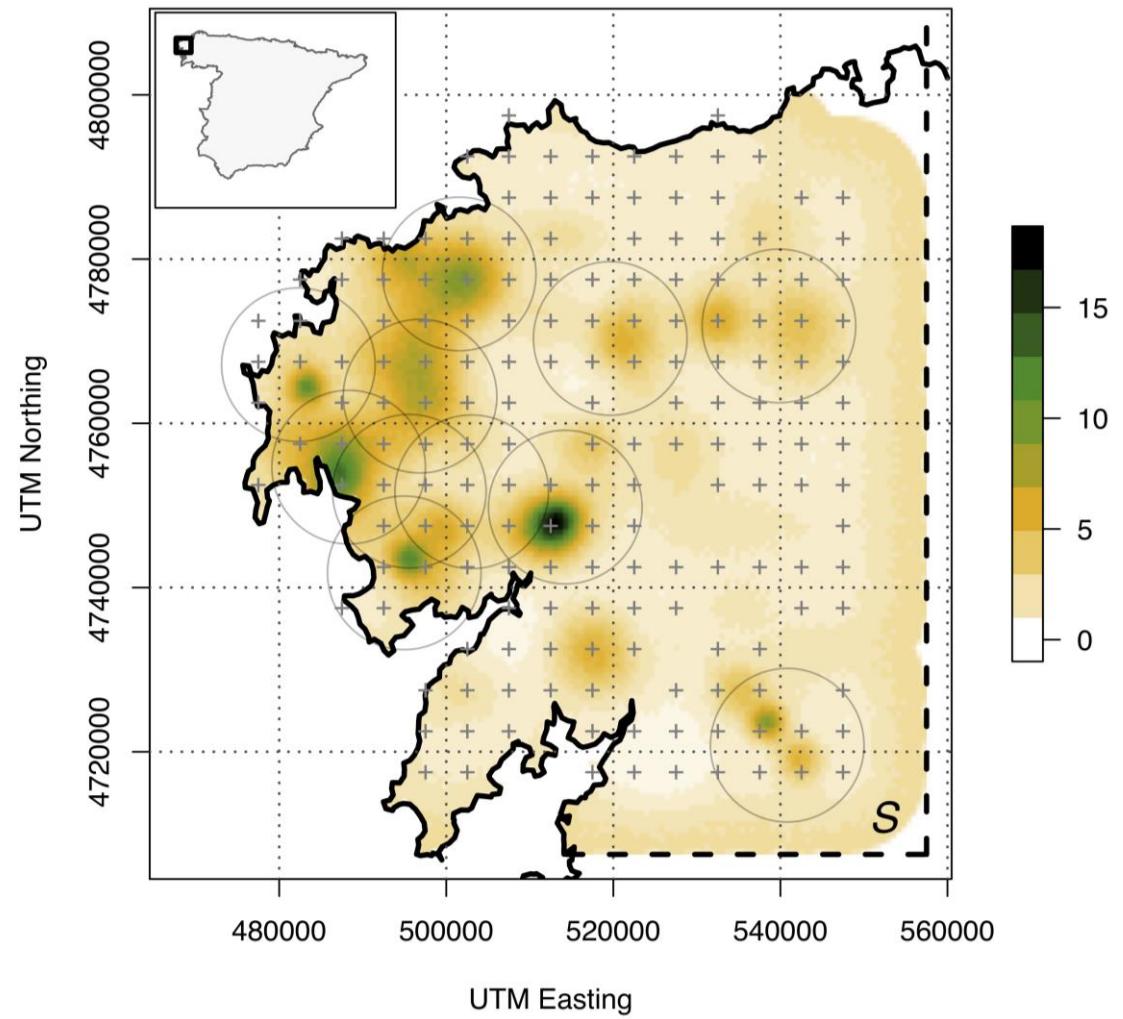
- Pues sólo el historial de capturas por trampa y ocasión:

Individuos	1	2	3	4	5
1	1	0	1	0	1
2	0	1	0	0	0
3	0	1	1	1	0
4	0	0	1	0	1
5	0	1	0	0	0
...

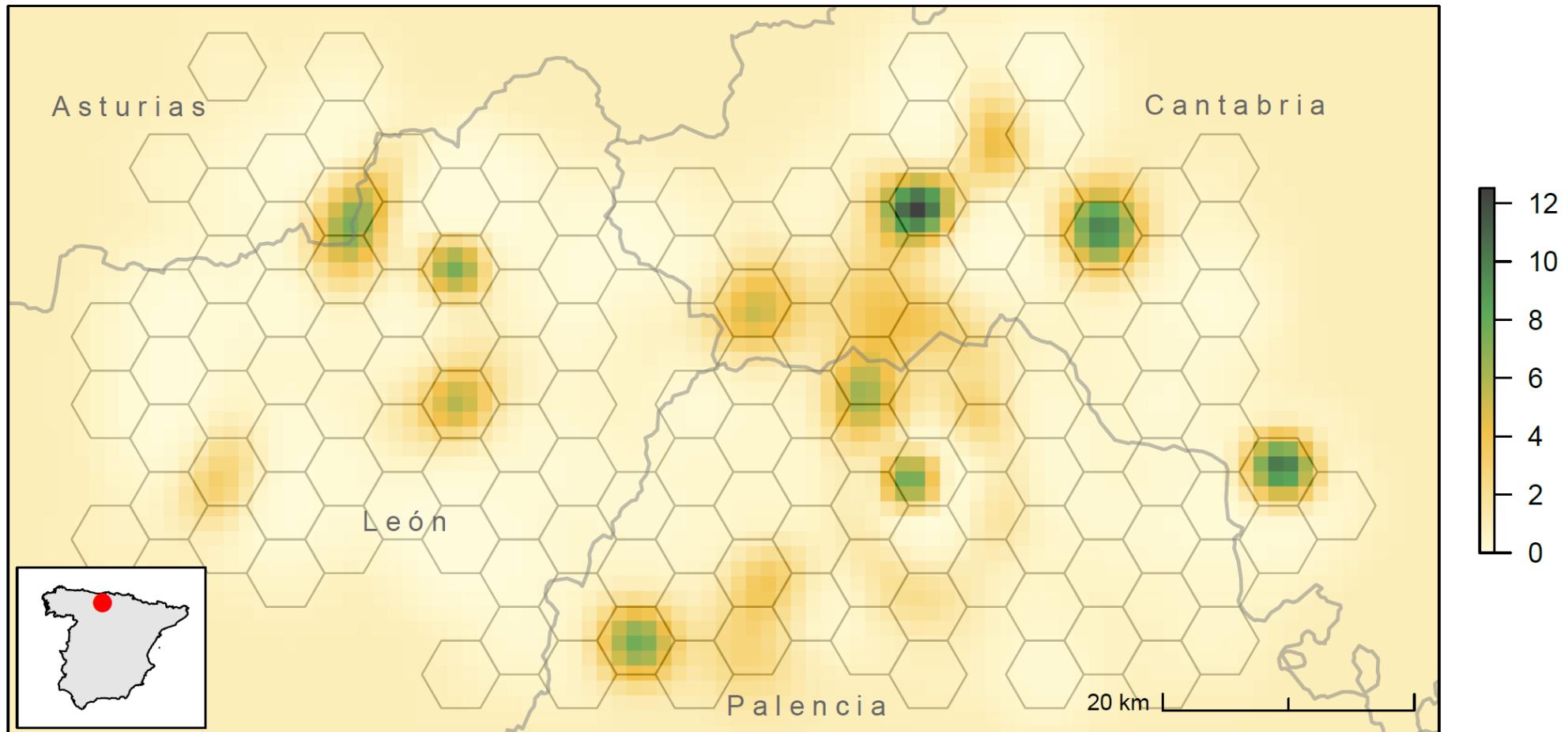
- ...y las coordenadas de las cámaras



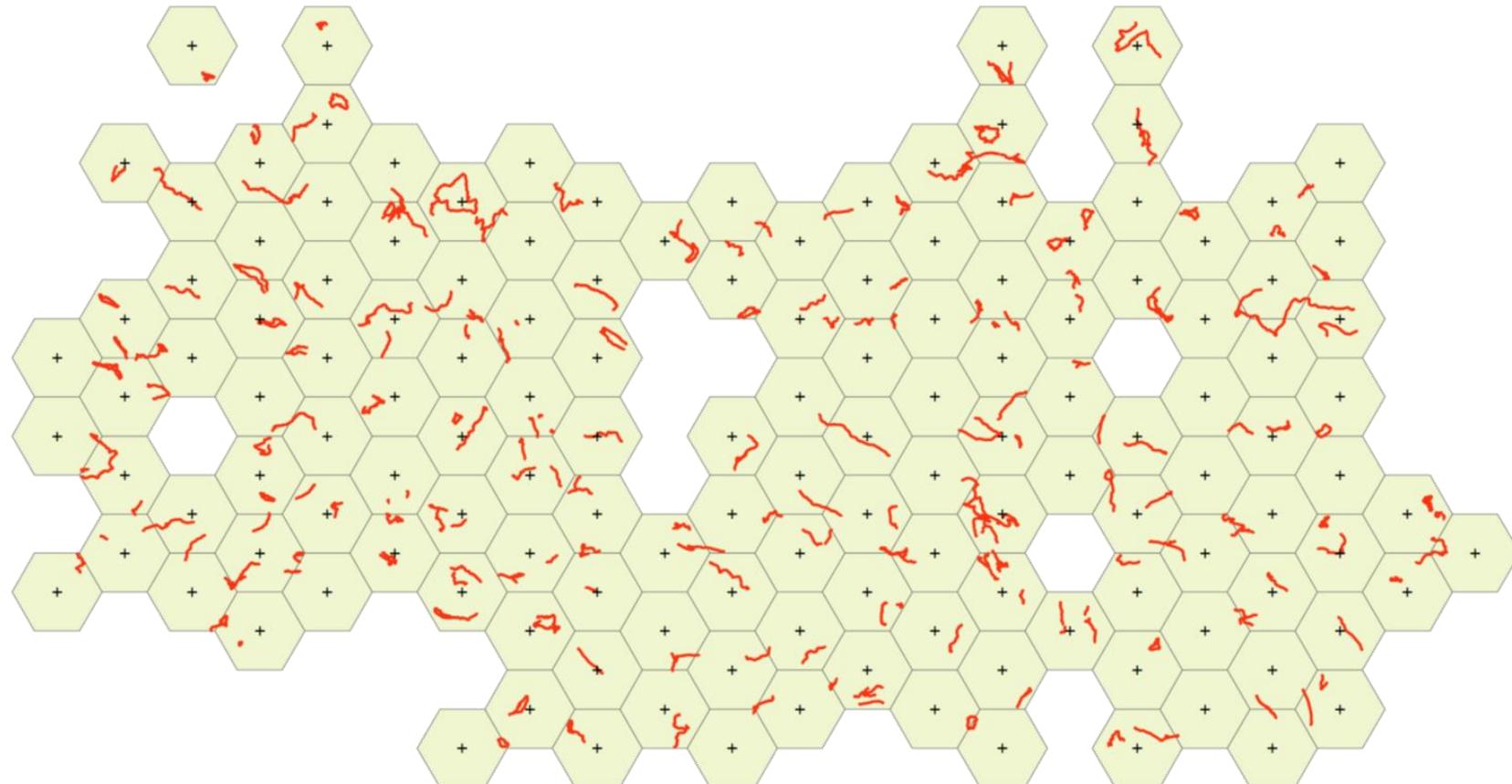
Genotipado



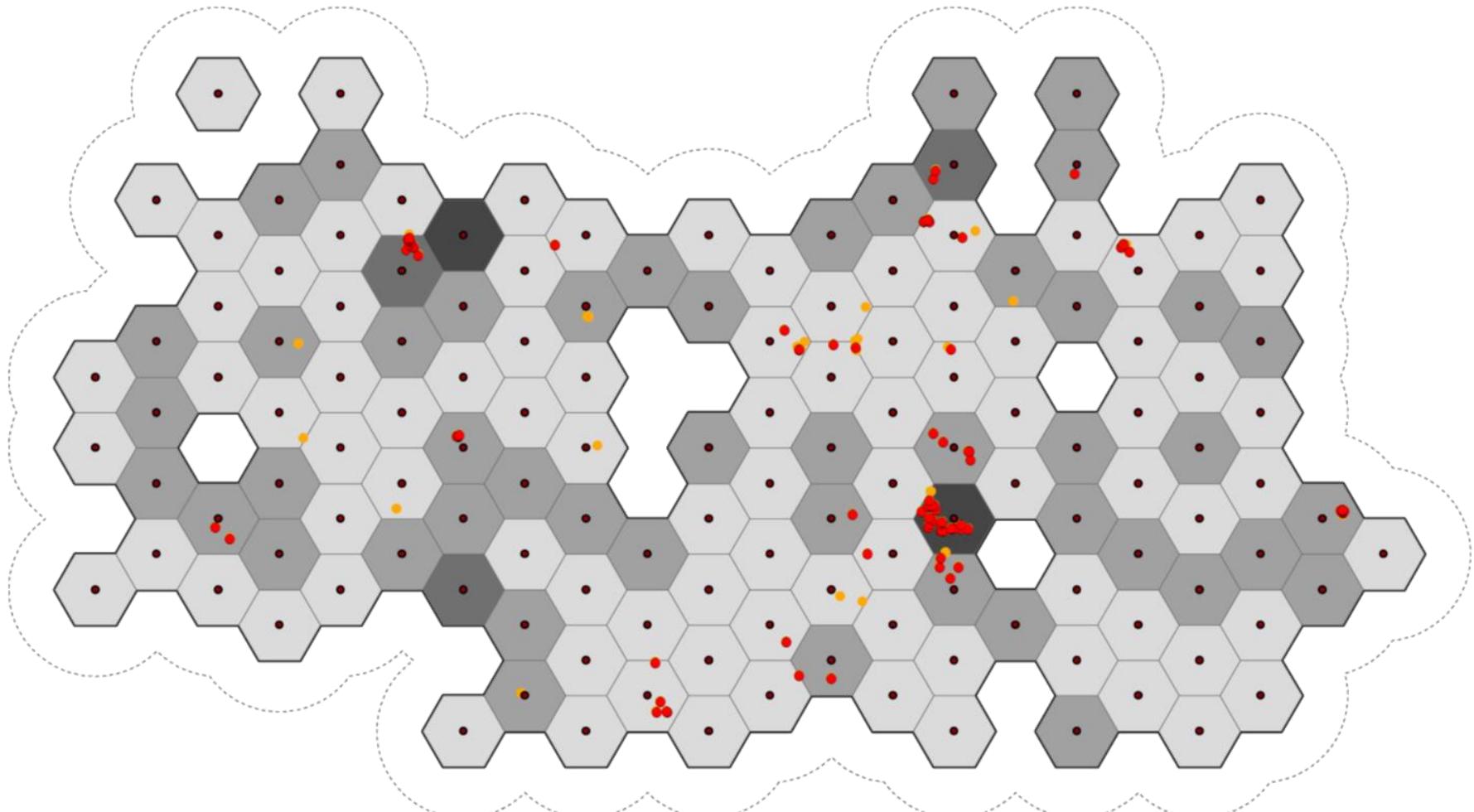
Genotipado



Genotipado



Genotipado



Random thinning-SCR (rtSCR)

- Para utilizar además los eventos no reconocidos se puede emplear rtSCR
- Los eventos no reconocidos pueden ser importantes para mejorar las estimas si:
 - La especie objetivo está en baja densidad
 - No hay solapamiento en las áreas de campeo
 - Hay por bajo porcentaje de reconocidos
- El uso de rtSCR es computacionalmente costoso

Más información en:

Jiménez, J., Augustine, B. C., Linden, D. W., Chandler, R. B., & Royle, J. A. (2021). Spatial capture–recapture with random thinning for unidentified encounters. *Ecology and Evolution*, 11(3), 1187–1198. <https://doi.org/10.1002/ece3.7091>

Modelos SMR

Dispositivos de captura y cámaras-trampa



+



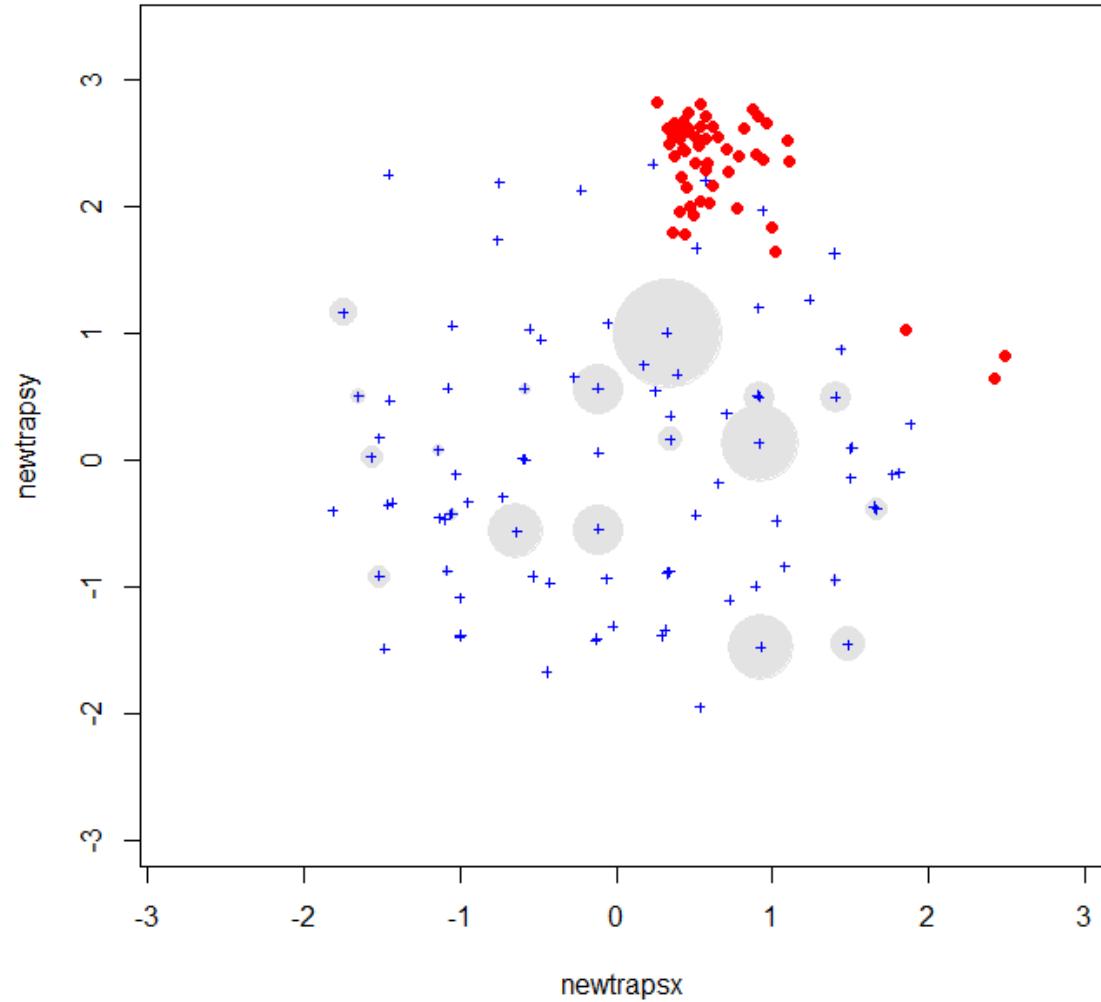
Modelos SMR

- Son modelos mixtos de conteos espaciales (unSCR) y de captura-recaptura espacialmente explícita (SCR)
- Se usan cuando sólo una parte de la población está marcada
 - La fracción marcada suele serlo a partir de capturas previas y marcaje, aunque también se pueden utilizar marcas naturales y/o emplear una máscara temporal de marcaje
 - La estima va ser tanto más precisa, cuanto más animales se marquen (con un 10-20% marcado, la estima ya puede ser aceptable)
- Nosotros vamos a estudiar una tipología avanzada de SMR, los modelos SMR generalizados (gSMR) que incorporan la información del proceso de marcaje. Si no se usa esta extensión, hay que asumir que la detectabilidad de marcados y no marcados es la misma, lo que puede ser difícil
- Puede mejorarse la estima utilizando telemetría de algunos animales marcados. Ello nos va a permitir obtener mayor precisión en los parámetros de movimiento

Para obtener mas precisión en SMR ...

- Captura y marcaje de una fracción de la población
- Maximizar datos de las fracciones marcadas y no marcadas
 - Maximizar las capturas (físicas y de fototrampeo): uso de atrayentes, selección de sitios para los dispositivos de captura, minimizar intrusión...
 - Obtención de datos de calidad (optimización de recursos, uso de tecnologías avanzadas, almacenamiento y gestión de datos)
- Marcaje con telemetría para facilitar la obtención del parámetro de movimiento
- Incorporación de otra información

SMR + telemetría





gSMR-ID

- Es una extensión de gSMR que permite trabajar con marcados no identificados
- Se recomienda usar el algoritmo Metropolis-Hastings de Jiménez et al (2019) en Nimble para optimizar la convergencia

Para más información

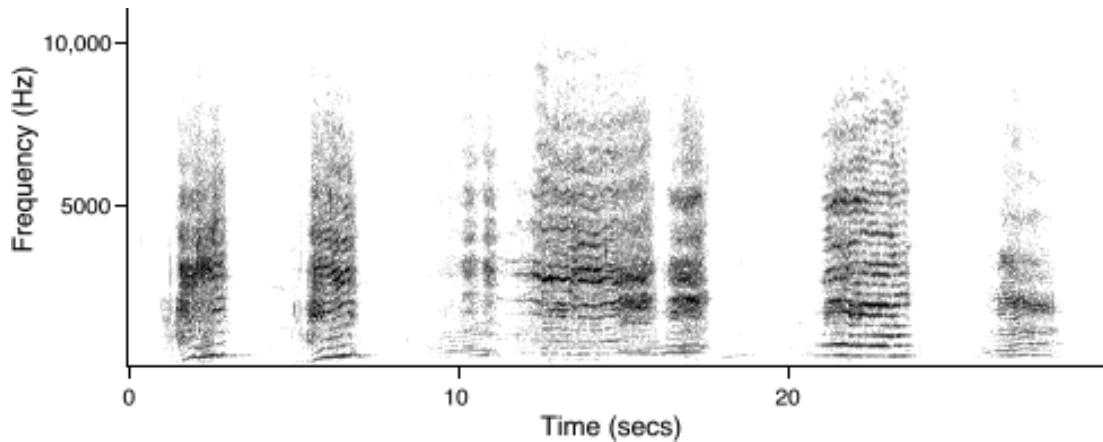
Jiménez, J., Chandler, R. B., Tobajas, J., Descalzo, E., Mateo, R., & Ferreras, P. (2019). Generalized spatial mark–resight models with incomplete identification: An application to red fox density estimates. *Ecology and Evolution*, 9(8), 4739–4748.
<https://doi.org/10.1002/ece3.5077>

Modelos unSCR

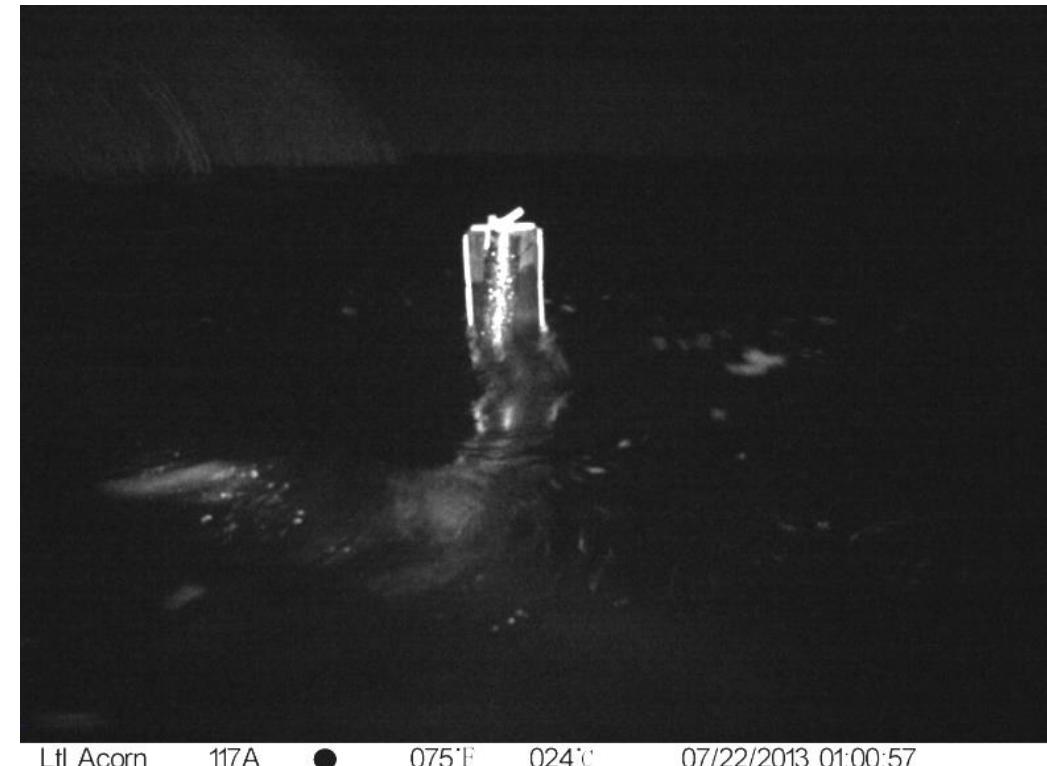
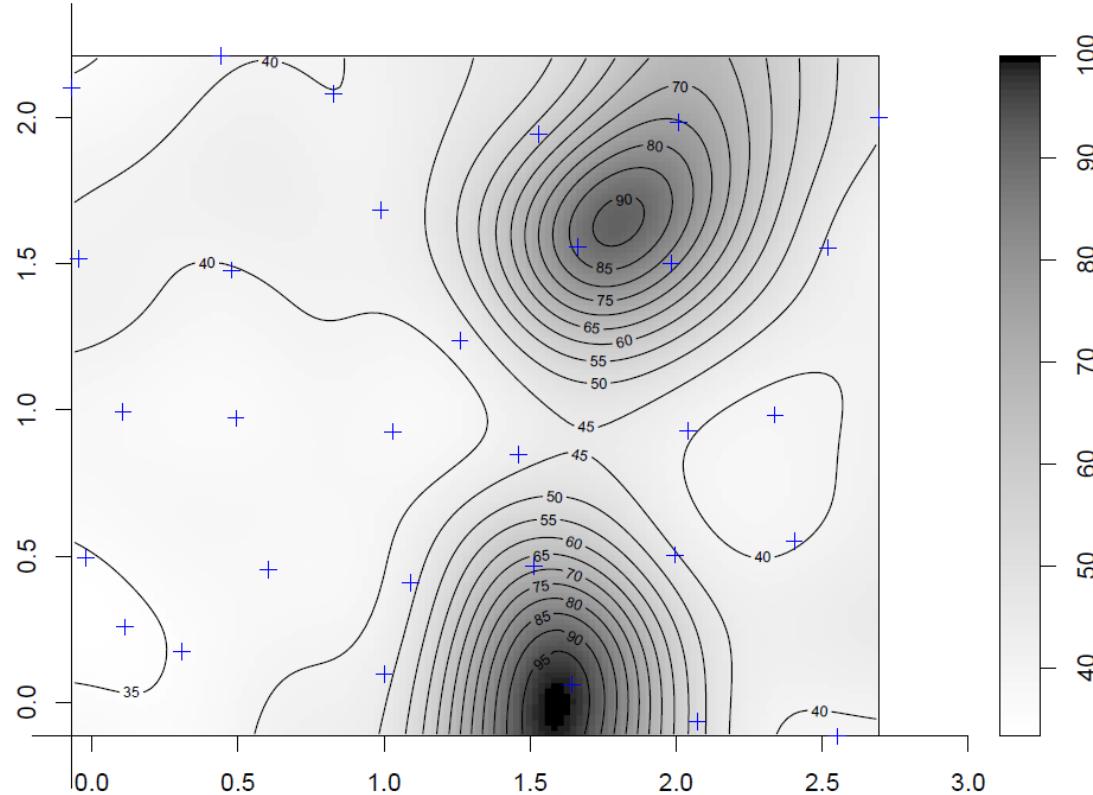
Huellas



... e incluso sonidos



Modelos unSCR



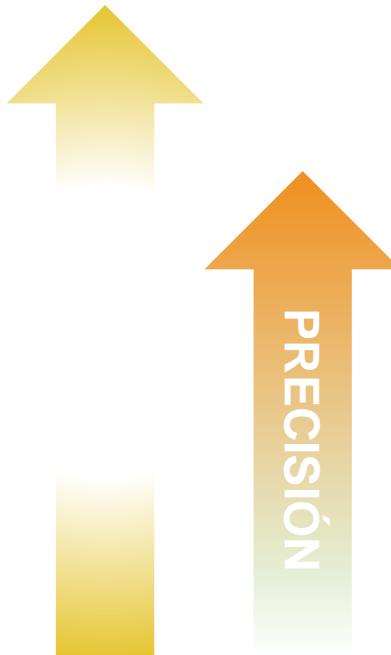
Modelos espaciales

- SCR
- SMR
- SC



Modelos espaciales

- SCR
- SMR
- SC



Modelos espaciales

- SCR

- SMR

- SC



Otros modelos avanzados

- Otros modelos avanzados y de extraordinario interés pueden encontrarse en la web, fundamentalmente referidos a información suplementaria de artículos publicados
- Entre ellos, recomiendo especialmente los desarrollos de Ben Augustine, disponibles en Github: <https://github.com/benaug>
- Para trabajar en ambiente bayesiano con covariables de abundancia, recomiendo los desarrollos de Mike Meredith:
<https://github.com/mikemeredith/makeJAGSmask>

Conclusiones

- Los métodos espaciales requieren:
 - A nivel campo
 - Un nivel muy alto de conocimiento del medio y de las especies
 - Especialización en capturas y manejo de animales
 - Conocimiento y respeto de la normativa
 - Trabajo en equipo
 - Cierta destreza en el uso de herramientas modernas (cámaras trampa, GPS, antenas, etc.)
 - Uso de herramientas informáticas para la gestión de datos
 - En gabinete
 - Uso de herramientas informáticas complejas