

## Módulo 5

# DETECCIÓN IMPERFECTA Y MODELOS DE OCUPACIÓN

Curso de Posgrado: “Modelado y estimación de ocupación para poblaciones y comunidades de especies bajo enfoque Bayesiano”

CCT CONICET Mendoza  
24 - 28 Abril 2023



Instituto Nacional de  
Tecnología Agropecuaria  
Argentina



**GTBA**  
Grupo Transdisciplinario de  
Biodiversidad y Agroecosistemas

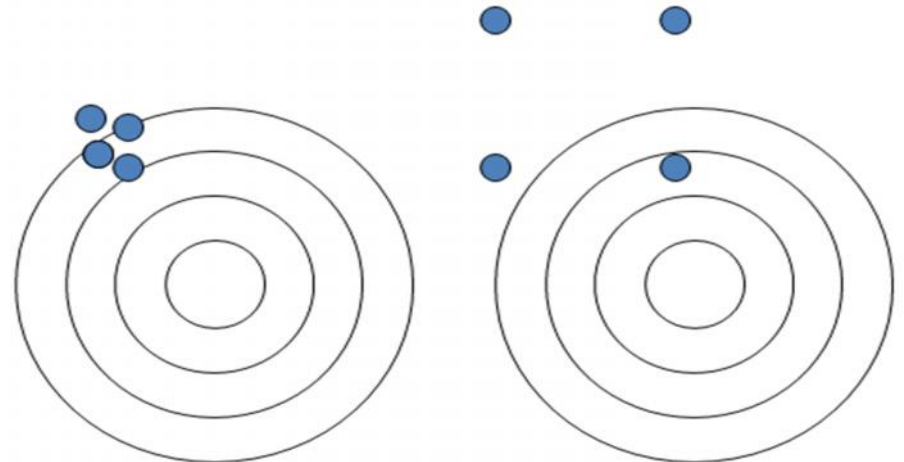


# DETECCIÓN IMPERFECTA

- En prácticamente cualquier estudio es imposible asegurarse que todos los animales presentes sean detectados.
- Asumir detección total es hacer un “censo” de una población (o comunidad)
  - Todos los individuos son registrados sin error.
- Cuando hacemos un muestreo
  - No muestreamos el área completa
  - Perdemos registros de algunos animales presentes

# DETECCIÓN IMPERFECTA

- Desafortunadamente muchos diseños de muestreo en conservación
  - Ignoran la detección incompleta de animales
  - Asumen que la probabilidad de detección es homogénea en espacio y tiempo.
- Ignorarla nos puede llevar a sesgos importantes y conclusiones falsas



# DETECCIÓN IMPERFECTA

*If a tree falls in the forest, but there is no one there to see it, does it make any noise?*

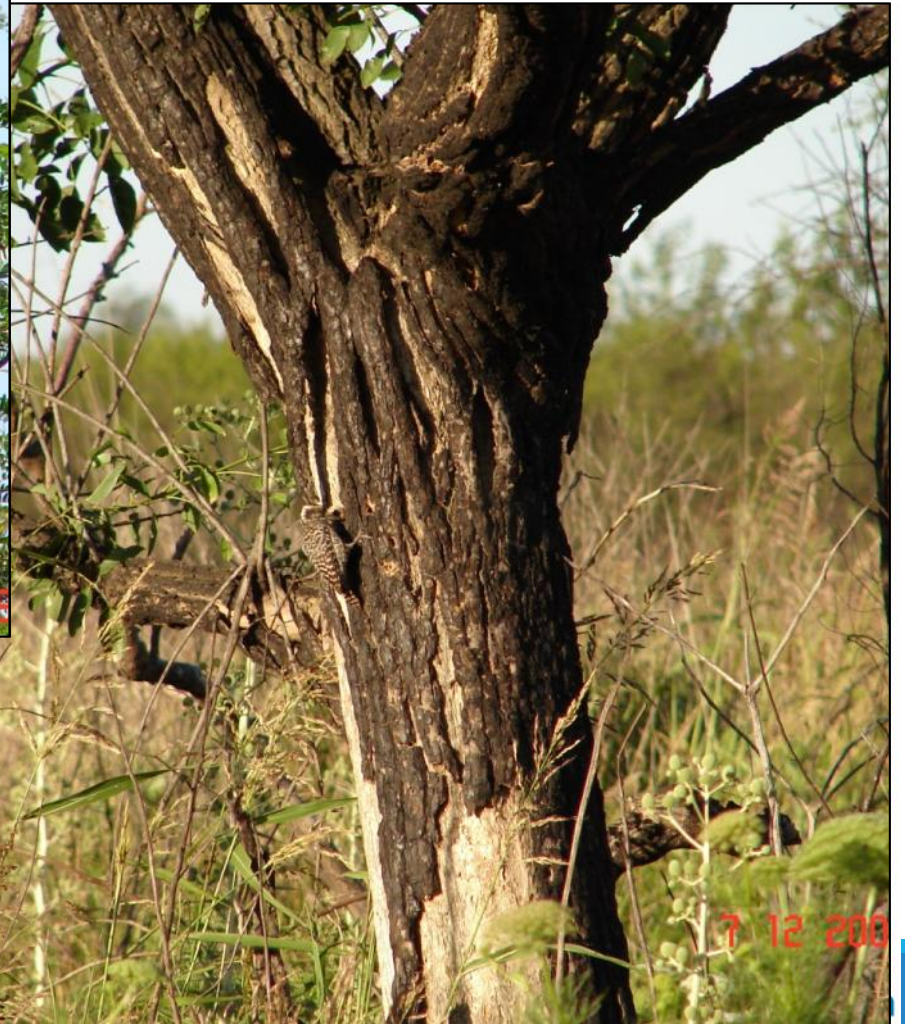
*Zen koan*

*If a bird sings in the forest, but the investigator fails to detect it, is the forest occupied?*

*Evan Cooch*









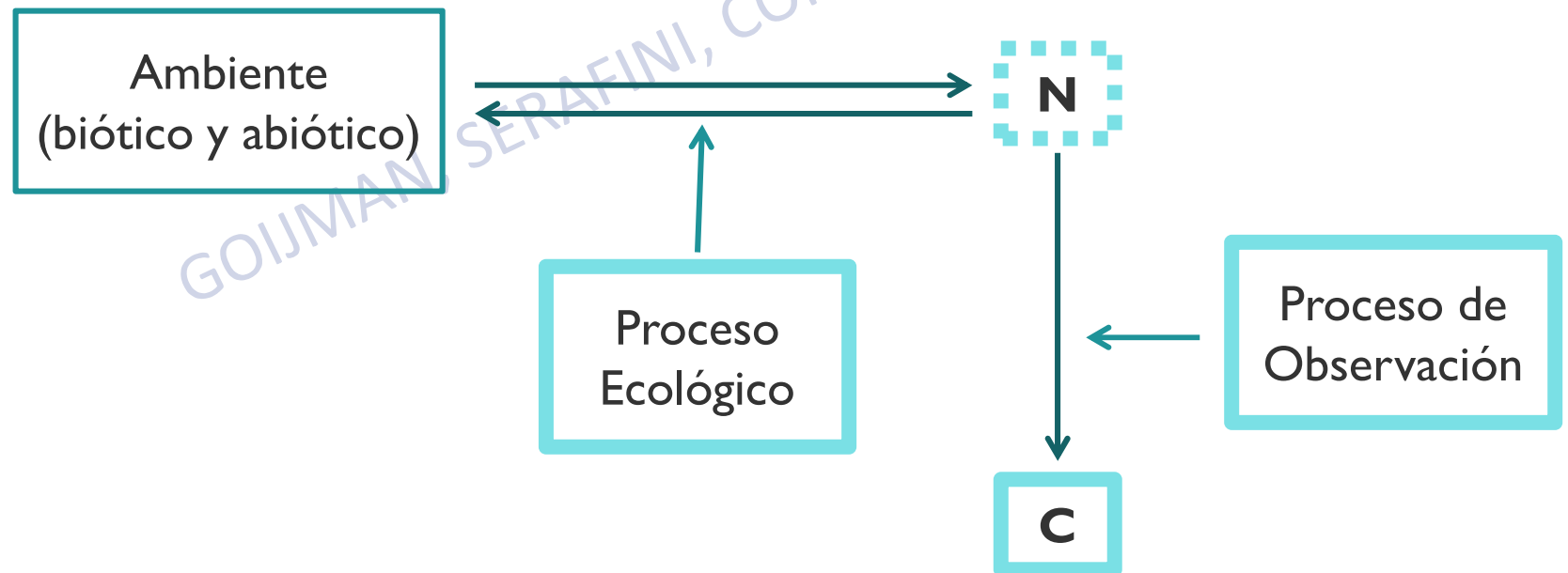


# VISIÓN JERÁRQUICA DE LA ECOLOGÍA

Todas las observaciones son producto de dos procesos relacionados:

1<sup>er</sup> submodelo Ecológico (nuestro interés)

2<sup>do</sup> submodelo Observación (condicionante)



(Royle & Dorazio 2008, Kery & Schaub 2012)

# PROCESO DE OBSERVACIÓN

2 componentes de error en el proceso de observación para conteos:

- “Individuos” no son registrados cuando están presentes
  - FALSOS NEGATIVOS
- “Individuos” identificados incorrectamente/ doble conteo
  - FALSOS POSITIVOS

GOIJMAN, CERAFIN, CONTRERAS 2023



# PROCESO DE OBSERVACIÓN

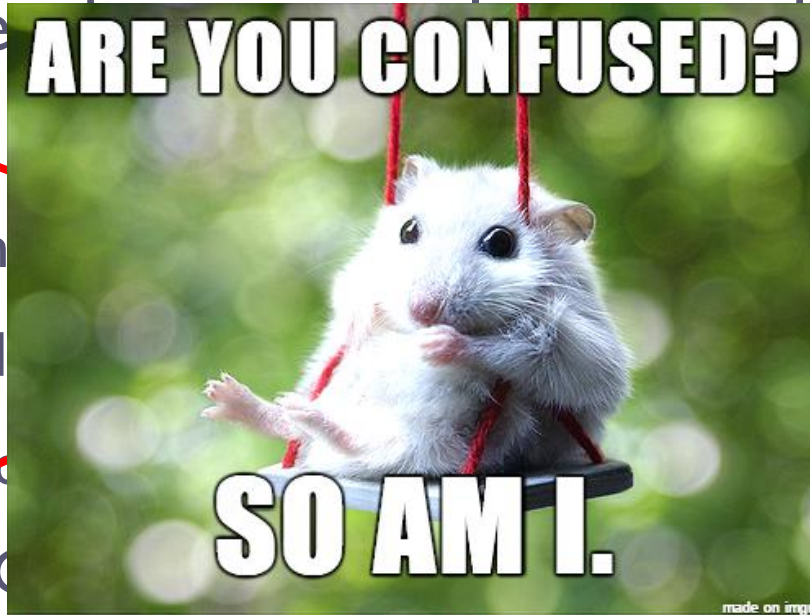
2 componentes de error en el proceso de observación para conteos:

- “Individuos” no son registrados cuando están presentes
  - FALSOS NEGATIVOS
- “Individuos” identificados incorrectamente/ doble conteo
  - FALSOS POSITIVOS
- “No existe”
- “No afecta a nuestro estudio”
- “Los errores se cancelan el uno a otro”

# PROCESO DE OBSERVACIÓN

~~2 componentes de la observación para conteos:~~

- ~~– “Individuos” no presentes~~
  - ~~➤ FALSOS NEGATIVOS~~
- ~~– “Individuos” idóneos para el conteo~~
  - ~~➤ FALSOS POSITIVOS~~



- “No existe”
- “No afecta a nuestro estudio”
- “Los errores se cancelan el uno a otro”

# PROCESO DE OBSERVACIÓN

- “Individuos” no son registrados cuando están presentes

- FALSOS NEGATIVOS

- └─ Modelado teniendo en cuenta la **probabilidad de detección** en los análisis

- “Individuos” identificados incorrectamente/ doble conteo

- FALSOS POSITIVOS

- └─ Controlable con buen diseño/ observadores  
Aunque también puede ser modelado



# ESTUDIOS QUE INCORPORAN PROBABILIDAD DE DETECCIÓN

**Estudios Observacionales:** Por lo general no se identifican individuos

- Registros de sp. (no individuos), rastros, sonidos, etc.
  - Presente y Detectado / Presente y No Detectado/ Ausente y No Detectado / Ausente y Detectado
- Registros de especies, rastros, etc. + Distancias
  - Probabilidad de detección en función de distancias

**Estudios CMR (Captura-Marcado-Recaptura):** Por lo general se identifican individuos

# CLASIFICACIÓN y SELECCIÓN de MODELOS

- Objetivo
  - Distribución
  - Relación con hábitat/ paisaje / recursos
  - Abundancia
  - Supervivencia, otros parámetros demográficos
  - Tiempo
- Organismo
  - Puede ser capturado
  - Puede ser recapturado
  - Puede ser identificado a nivel individual
  - Marcas permanentes
- Disponibilidad de datos

# CLASIFICACIÓN y SELECCIÓN de MODELOS

- POBLACION CERRADA

- Asume abundancia constante durante el estudio

- No hay ganancias ni pérdidas en la población
- Supuesto aproximado

- POBLACION ABIERTA

- Permite cambios en la abundancia durante el estudio

- Pérdidas (muertes o emigraciones) o ganancias (reproducción o inmigración)
- Foco de la estimación en tasas como las de supervivencia, reproducción, y abundancias

$$N(t + 1) = N(t) + B(t) + I(t) - D(t) - E(t)$$



	MÉTODOS POBLACIONES		PARÁMETROS
OBSERVACIÓN	OCUPACIÓN	ESTACION SIMPLE	Ocupación ( $\Psi$ ), Detección ( $p$ )
		ESTACIONES MULTIPLES (POBLAC.ABIERTA)	$\Psi$ , $p$ , Colonización ( ), Extinción ( )
		ROYLE-NICHOLS	$\Psi$ , $p$ , Abundancia ( $N$ )
	MODELOS N- MIXTOS	ESTACION SIMPLE	$N$ , $p$
		ESTACIONES MULTIPLES (POBLAC.ABIERTA)	$N$ , $p$ , etc.
	MUESTREO DE DISTANCIAS	“DISTANCE SAMPLING”	Densidad, $N$
CMR	POBLACIONES CERRADAS		
	POBLACIONES ABIERTAS		

	<b>MÉTODOS POBLACIONES</b>
	<b>MÉTODOS COMUNIDADES</b>
	<b>OCUPACIÓN</b>

GOIJMAN, SERAFIN

Marc Kéry  
J. Andrew Royle



## APPLIED HIERARCHICAL MODELING IN ECOLOGY

Analysis of distribution, abundance and  
species richness in R and BUGS

Volume 1  
Prelude and Static Models



Marc Kéry  
Michael Schaub



## BAYESIAN POPULATION ANALYSIS USING **WinBUGS**

A hierarchical perspective





Marc Kéry  
J. Andrew Royle



## APPLIED HIERARCHICAL MODELING IN ECOLOGY

Analysis of distribution, abundance and  
species richness in R and BUGS

Volume 1  
Prelude and Static Models

Marc Kéry  
Michael Schaub



Marc Kéry  
J. Andrew Royle

## APPLIED HIERARCHICAL MODELING IN ECOLOGY

Analysis of distribution, abundance and  
species richness in R and BUGS

Volume 2  
Dynamic and Advanced Models

ANALYSIS OF DISTRIBUTION  
USING  
BUGS  
perspective



# BASES OCUPACIÓN

- Definida como la proporción de área ocupadas por una especie o unidades de muestreo donde la especie está presente
- Requiere menor esfuerzo que estimación de abundancia (datos de presencia/ausencia)
- Útil en estudios a gran escala
- Útil en especies raras donde la abundancia no puede ser estimada
- No asume que las especies son contadas en cada muestreo (como la abundancia)

# OCUPACIÓN

## **Preguntas ecológicas basadas en datos de ocupación:**

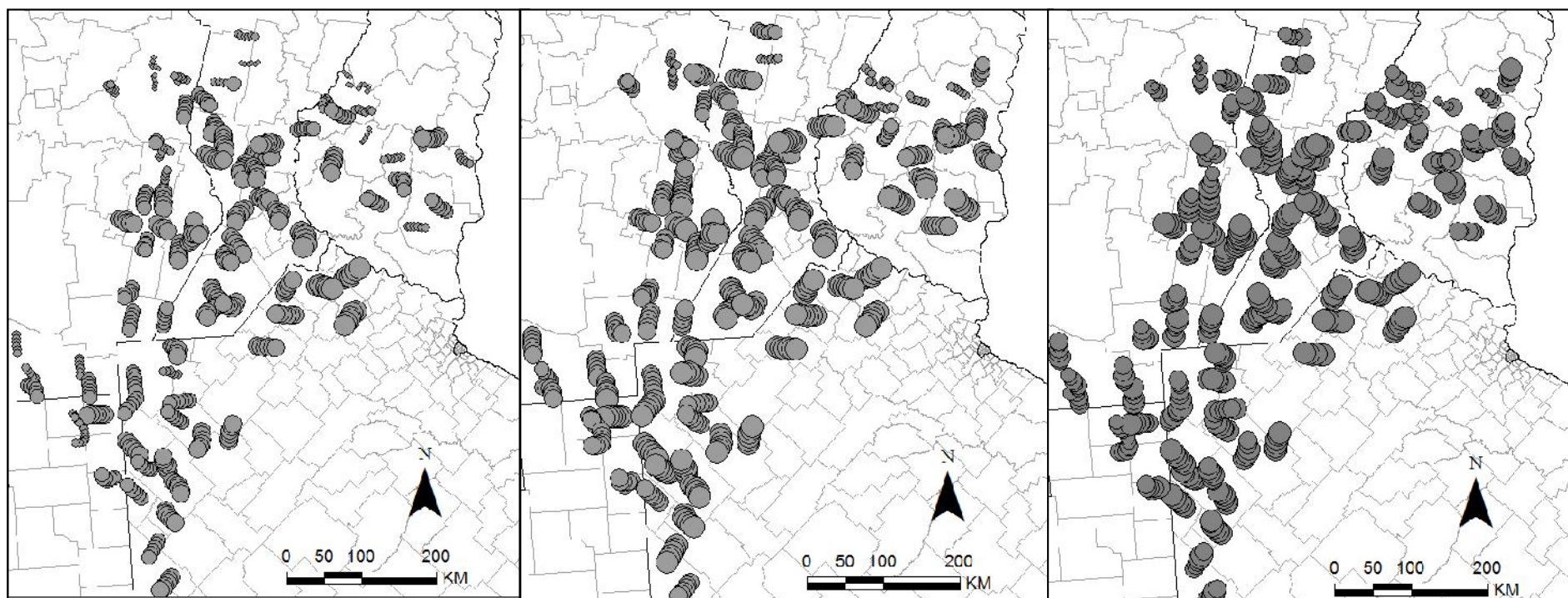
- Dinámica de metapoblaciones
- Estudios de distribución y rangos geográficos
- Relaciones con el hábitat y selección de recursos
- Monitoreos de gran escala
- Interacción entre especies
- Epidemiología
- Etc



# EJ. GRAN ESCALA



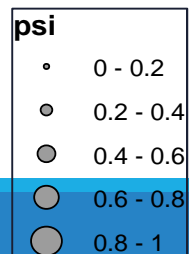
*Columba picazuro*



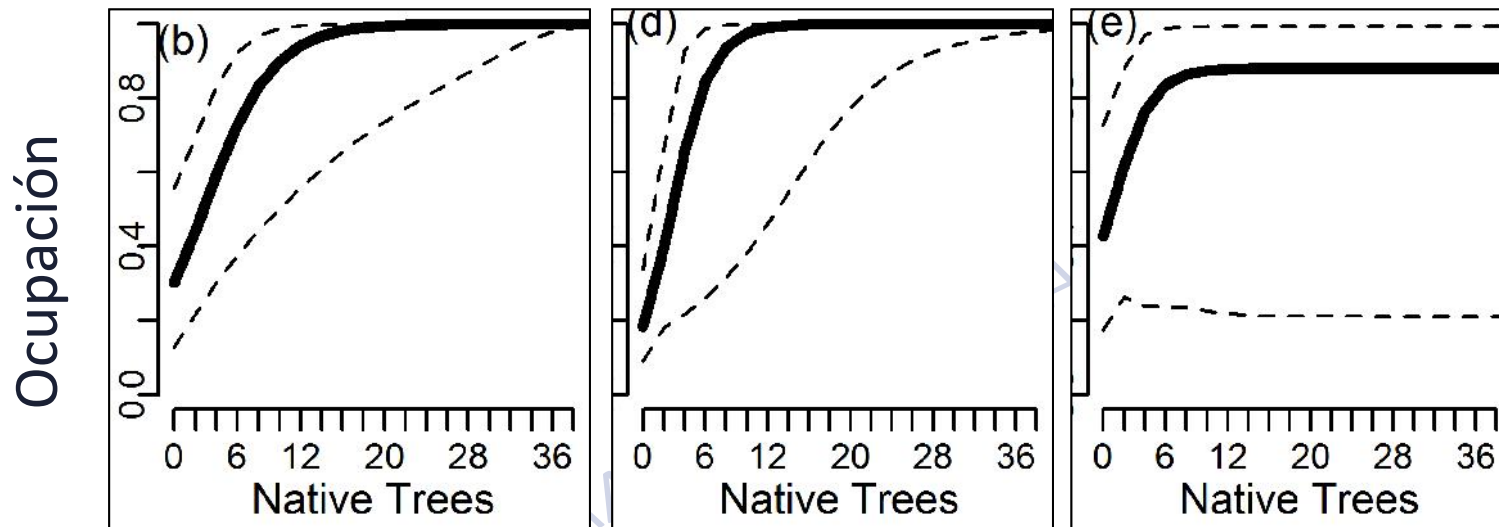
2006

2009

2012



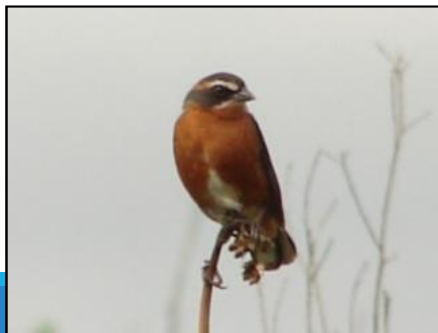
# EJ. HABITAT



Granívoros de  
follaje x espiguelo

Insectívoros de  
follaje x espiguelo

Insectívoros  
aéreos y de  
vuelo elástico



# OCUPACIÓN

## Definiciones

$\psi$  es la probabilidad que un sitio seleccionado al azar, o una unidad de muestreo en un área de interés, esté ocupado por una especie.

$$\hat{\psi} = \frac{\hat{x}}{s}$$

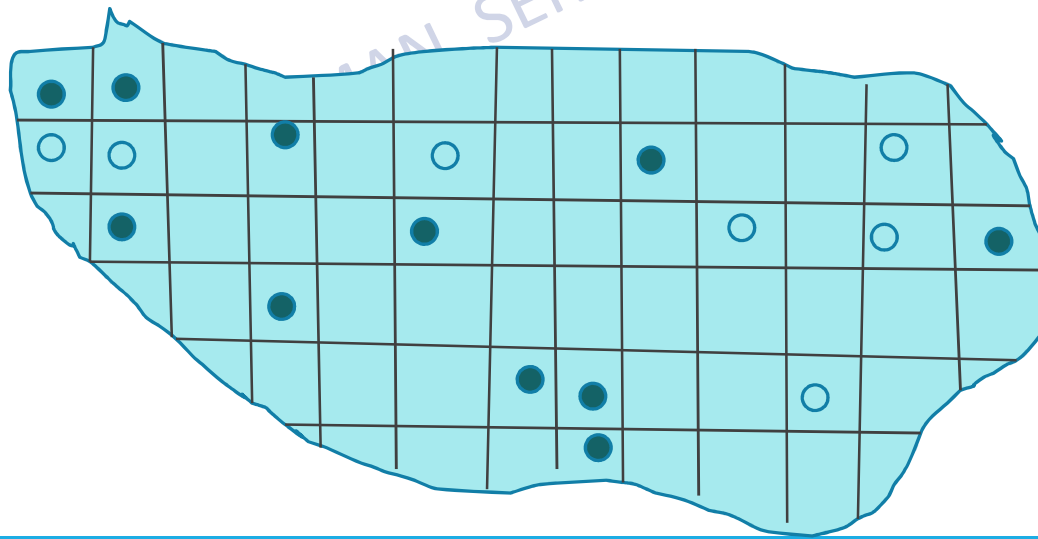
“naive” – subestiman ocupación

$\hat{x}$  es el número de sitios ocupados, pero es estimado, porque número real de sitios “s” ocupados, **no lo vemos realmente**

# OCUPACIÓN

$$\hat{\psi} = \frac{\hat{x}}{s}$$

$\hat{x}$  es el número de sitios ocupados, pero es estimado, porque número real de sitios “s” ocupados, **no lo vemos realmente**



- Ocupado y detectado
- Ocupado y no detectado

# OCUPACIÓN

- El tamaño y naturaleza de la unidad de muestreo puede ser definida natural o arbitrariamente.
- Generalmente nos interesan un número de unidades potenciales, asique la cantidad es una porción de un set más grande de unidades ocupadas.
- Interés puede estar en **la proporción de sitios ocupados o en la probabilidad de que una unidad esté ocupada**

GOIJMAN, SERAFINI, CONTRERAS 2023

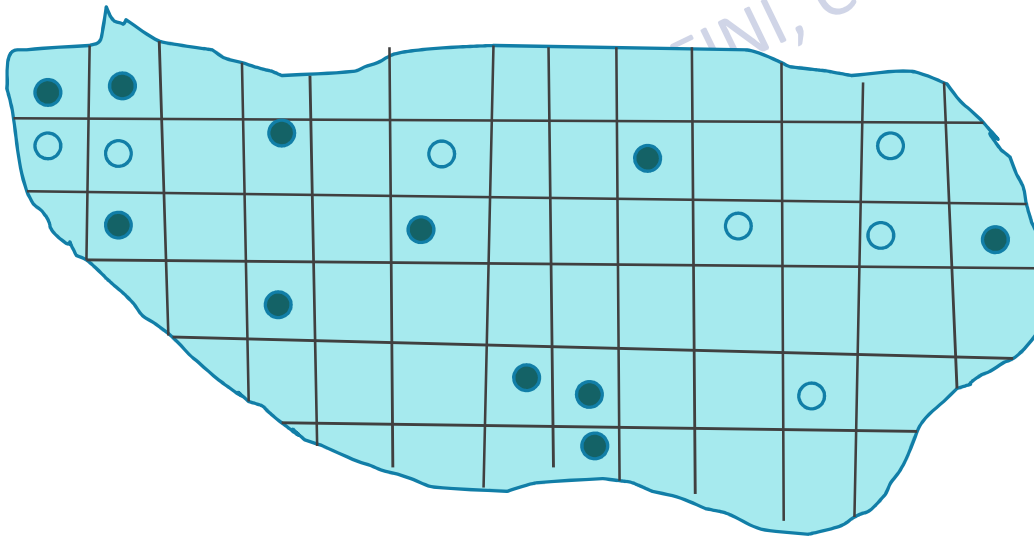


# OCUPACIÓN

Proporción de área ocupada (hecho concreto, realización)

vs.

Probabilidad de ocupación (expectativa *a priori* de que un sitio esté ocupado)



- Ocupado y detectado
- Ocupado y no detectado

# OCUPACIÓN

## **Proporción de área ocupada y probabilidad de ocupación**

*Cómo la probabilidad es desconocida, la proporción observada puede usarse para estimar esta probabilidad, y frecuentemente estos términos se usan indistintamente*

GOIJMAN, SERAFINI, CONTRERAS 2023

# OCUPACIÓN

- El protocolo básico de muestreo consiste simplemente en **revisitar sitios** y pasar tiempo buscando individuos de una especie deseada o evidencias de la presencia de la especie.
- Este tipo de muestreo generalmente es referido como presencia-ausencia (pero es detección-no detección)

- Visual
- Capturas en trampas o redes
- Huellas o rastros
- Vocalizaciones
- Trampas cámara

*Enfoques de muestreo*

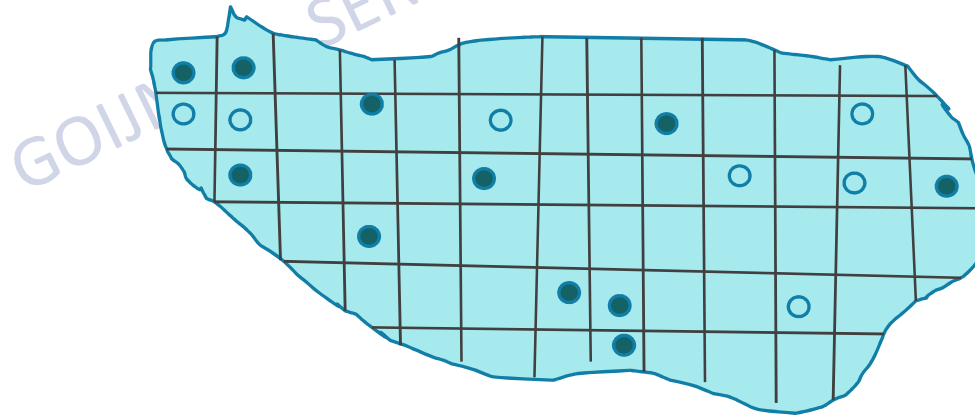
# OCUPACIÓN

- El resultado del muestreo es una lista de unidades “ocupadas” (especie no detectada) o “desocupadas” (especie detectada)
- Historicamente se ha considerado el total de sitios ocupados como proporción de ocupación sobre el total de sitios y esto se tomaba como estimación de ocupación

***¿Cuál es el problema de esto?***

# OCUPACIÓN

- Podríamos no detectar una especie cuando esta se encuentra presente.
- Sitios “ocupados” podrían estar siendo clasificados como “desocupados”





# OCUPACIÓN

## Parámetros

- probabilidad de ocupación
- $p$  probabilidad de detección

## Estimadores

- $\hat{\Psi} = \frac{s_d}{s}$  proporción de sitios con detecciones/sitios  
(detección perfecta)
- $\hat{\Psi} = \frac{s_d}{s\hat{p}}$  proporción de sitios con detecciones/sitios  
(detección imperfecta)

# OCUPACIÓN

## Diseño

- Plantear bien el objetivo
- Pensar que podría estar afectando al ocupación
- La definición del sitio depende del organismo y de la homegeneidad del sitio
- Réplicas por sitio para estimación de detectabilidad
  - En el tiempo
  - Múltiples observadores
  - Replicas espaciales

# OCUPACIÓN

## Número de sitios vs numero de réplicas

TABLE 6.1 Optimum Number of Surveys to Conduct at Each Site ( $K$ ) for a Standard Design Where All Sites Are Surveyed an Equal Number of Times with No Consideration of Survey Costs, for Selected Values of Occupancy ( $\psi$ ) and Detection Probabilities ( $p$ )

$p$	$\psi$								
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	14	15	16	17	18	20	23	26	34
0.2	7	7	8	8	9	10	11	13	16
0.3	5	5	5	5	6	6	7	8	10
0.4	3	4	4	4	4	5	5	6	7
0.5	3	3	3	3	3	3	4	4	5
0.6	2	2	2	2	3	3	3	3	4
0.7	2	2	2	2	2	2	2	3	3
0.8	2	2	2	2	2	2	2	2	2
0.9	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Source: MacKenzie and Royle (2005).

# OCUPACIÓN

## Modelos avanzados

- Estaciones múltiples, dinámicos (Diseños Robustos)
- Abundancia
- Multi-estado
- Multi-escala
- Multi-especies

# OCUPACIÓN

Historia de detección/sitio	Probabilidad
101	$p_1(1-p_2)p_3$
111	$p_1p_2p_3$
100	$p_1(1-p_2)(1-p_3)$
110	$p_1p_2(1-p_3)$
...	
000	$(1-p_1)(1-p_2)(1-p_3) + (1- )$

La historia de detección se construye por sitios, y no por individuo



# OCUPACIÓN

- Sabemos cuantos sitios existen
- Queremos saber cuantos están ocupados
- Modelo del binomial inflado por ceros (Zero Inflated Binomial)

$$P[\{x_i\} | \Psi, p] = \prod_{i=1}^s \left[ \Psi_i \binom{k_i}{x_i} p^{x_i} (1-p)^{k_i-x_i} + (1-\Psi_i) I(x_i = 0) \right]$$

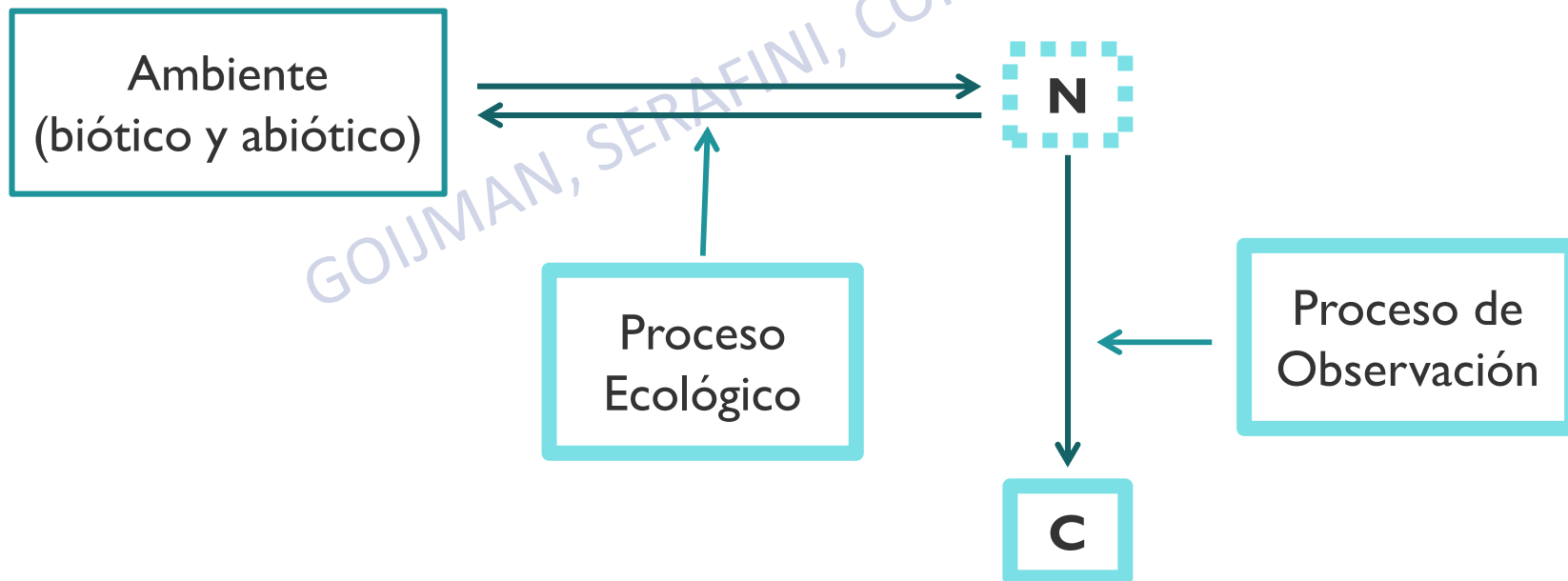
LIKELIHOOD

# VISIÓN JERARQUICA DE LA ECOLOGÍA

Todas las observaciones son producto de dos procesos relacionados:

1<sup>er</sup> submodelo Ecológico (nuestro interés)

2<sup>do</sup> submodelo Observación (condicionante)



(Royle & Dorazio 2008, Kery & Schaub 2012)

# MODELOS JERÁRQUICOS (“*State-Space*”)

Conteos en el tiempo

Proceso de estado

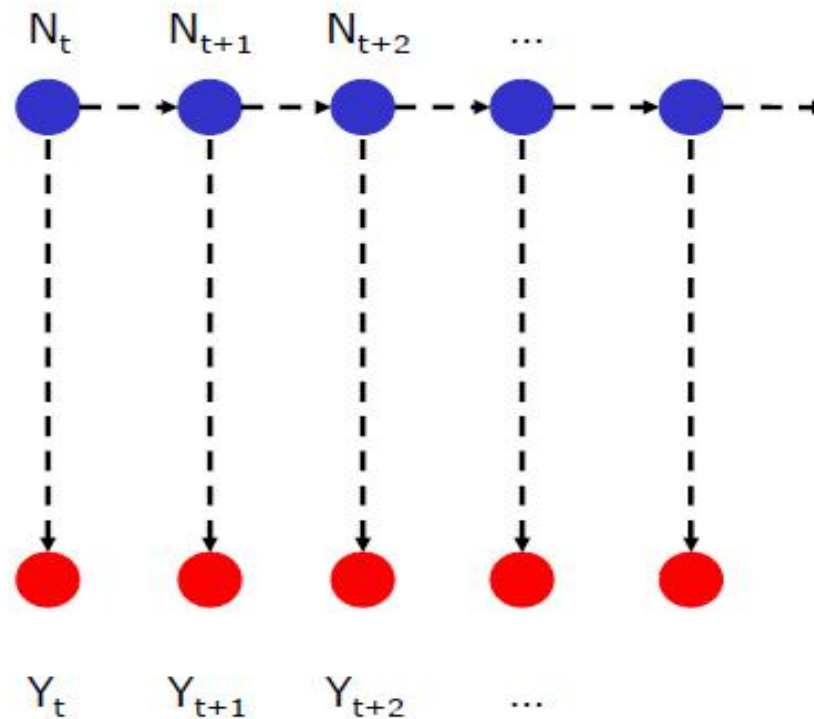
*State process*

**True population size**

Proceso de observación

*Observation process*

**Observed count**



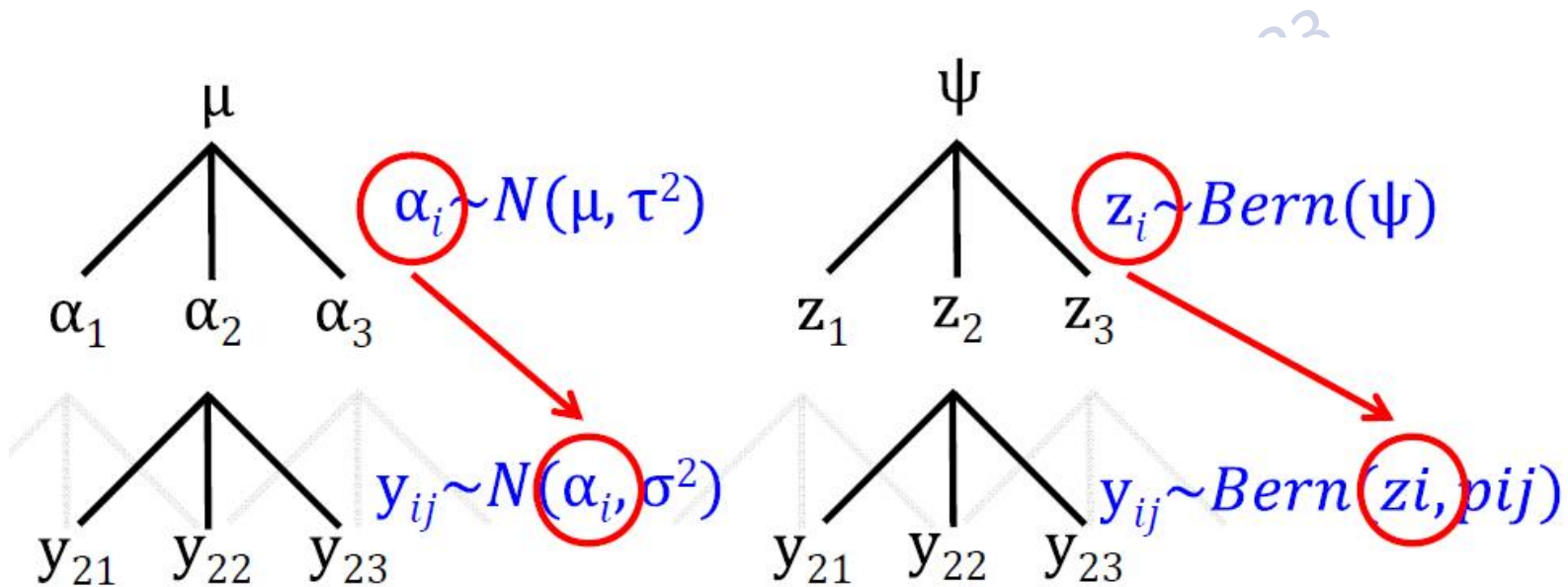
# MODELOS JERÁRQUICOS (“*State-Space*”)

Compuesto de 2 sets de ecuaciones:

- Ecuación de estado: describe el estado real de un sistema
- Ecuación de observación: relaciona el el estado real a la observación
- Marco muy general y flexible
  - Datos de Captura-recaptura
  - Datos de Ocupación

# MODELOS JERÁRQUICOS

- Secuencia dependiente de variables aleatorias (observadas y no observadas)





# Ocupación como Modelo Jerárquico

Esencialmente los modelos de ocupación de sitio (vistos como “*site-occupancy models*”) son **modelos de regresión logística jerárquicos** que modelan en conjunto la probabilidad de detección y ocupación de animales o plantas.

# Ocupación – el caso más simple

Una especie  
Estación simple

Probabilidad que un sitio seleccionado al azar en un área esté ocupado por una especie

$z = 1$  Sitio está ocupado

$z = 0$  Sitio no ocupado

$z_i \sim \text{Bernoulli}(\psi)$

Proceso ecológico

$y_{ij} | z_i \sim \text{Bernoulli}(z_i * p)$

Proceso de observación

$y = \text{datos}$

$p = \text{probabilidad de detección}$

sitio  $i$ , réplica  $j$

# OCUPACIÓN

## *Una especie – Estación simple*

### Supuestos

- **El estado de ocupación de los sitios no cambia durante el período de muestreo (población cerrada - “closure assumption”)**

Durante la duración de los muestreos, el estado de ocurrencia en un sitio no cambia. Un sitio está ocupado o desocupado, no puede cambiar (no hay colonización o extinción). El período de tiempo considerado cerrado dependerá de la especie.

Si hay emigraciones temporarias durante el período, tampoco es “desastrozo”. Se debe considerar la ocupación como “*probabilidad de uso durante un período de tiempo*” durante el periodo de estudio.

También se puede modelar (multi-escala, diseño robusto, ocupación dinámica)

# OCUPACIÓN

## *Una especie – Estación simple*

### Supuestos

- **No hay falsos positivos**

La especie, cuando es detectada, es detectada con certeza (también puede modelarse)

- **La ocurrencia y la detección de una especie son independientes** (“*independence assumption*”)

- La probabilidad de ocupación de un sitio es independiente de la de otro sitio (se puede explicar con covariables)
- La probabilidad de detección es independiente en sucesivas visitas a un mismo sitio (puede ser modelado)

- **La detección es homogénea** (puede ser modelado)

# OCUPACIÓN

## *Incorporación de covariables*

- La pb. de ocupación es igual para todos los sitios
  - La pb. de detectar una sp. en el muestreo, dado que está presente, es igual para todos los sitios
- En realidad ésto no siempre es probable, de hecho, muchas veces, es es mismo foco de estudio:
- “¿Cómo varía la ocupación de una especie en distintos sitios dado x condiciones?”*
- “¿Varía la detectabilidad de la especie?”*

# Características biológicas de las especies

---

Detectabilidad

Movimiento

Densidad

Comportamiento de los grupos

Sistema social

Edad

Sexo

Hora del día

Cambios estacionales



# Características del hábitat

Estructura de la vegetación

Composición de la vegetación

Topología del paisaje

Ruidos

---

## Factores meteorológicos

Precipitaciones

Vientos

Temperatura

Niebla

Nieve

Humedad relativa



# RECORDEMOS - GLM Binomial

**Binomial**

$$\varphi_i \sim \text{Binomial}(N_i, p_i)$$

$$\text{logit}(p_i) = \alpha + \beta * x_i$$

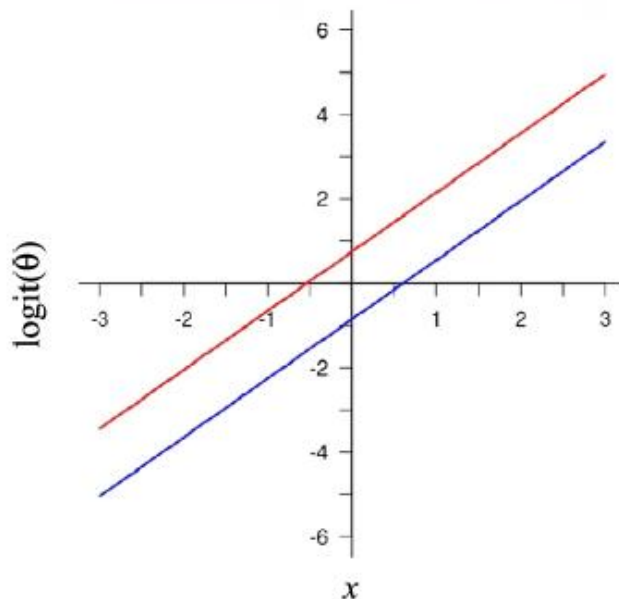
**Función logit**

$$\text{logit}(p_i) = \log\left(\frac{p_i}{1 - p_i}\right)$$

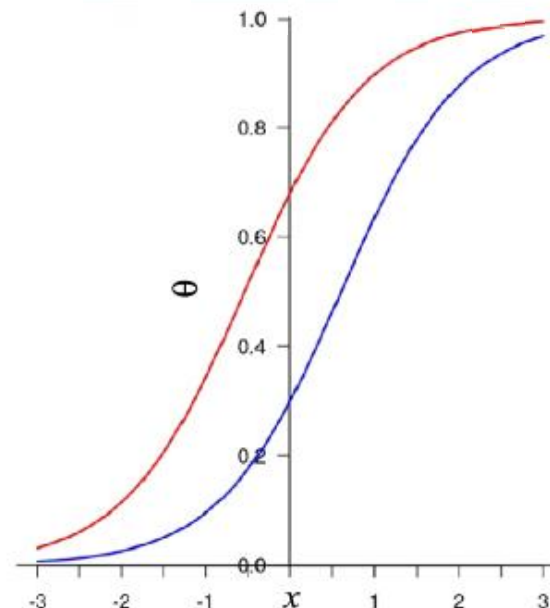
$N_i$  es el número de intentos

$p_i$  probabilidad de éxito (sólo dos eventos)

$$\text{logit}(\theta_i) = \alpha + \beta * x_i$$



$$\theta_i = \exp(\alpha + \beta * x_i)$$



# OCUPACIÓN

## *Incorporación de covariables*

- Covariables de detección
  - Pueden variar entre ocasiones para un mismo sitio
  - Características de la ocasión (ej. Variables climáticas, observador), o del sitio (ej. vegetación que afecta la detectabilidad)
- Covariables de ocupación
  - Constantes por sitio, dentro de una estación
  - Características del sitio (ej. habitat)

# OCUPACIÓN

## *Incorporación de covariables*

$z_i \sim \text{Bernoulli}(\psi)$

Proceso ecológico

$y_{ij} | z_i \sim \text{Bernoulli}(z_i * p)$

Proceso de observación

$$\text{logit}(\psi_i) = \alpha_{\text{psi}} + \beta_{x1} * x1_i$$

$$\text{logit}(p_{ij}) = \alpha_p + \beta_{x2} * x2_{ij}$$

# OCUPACIÓN

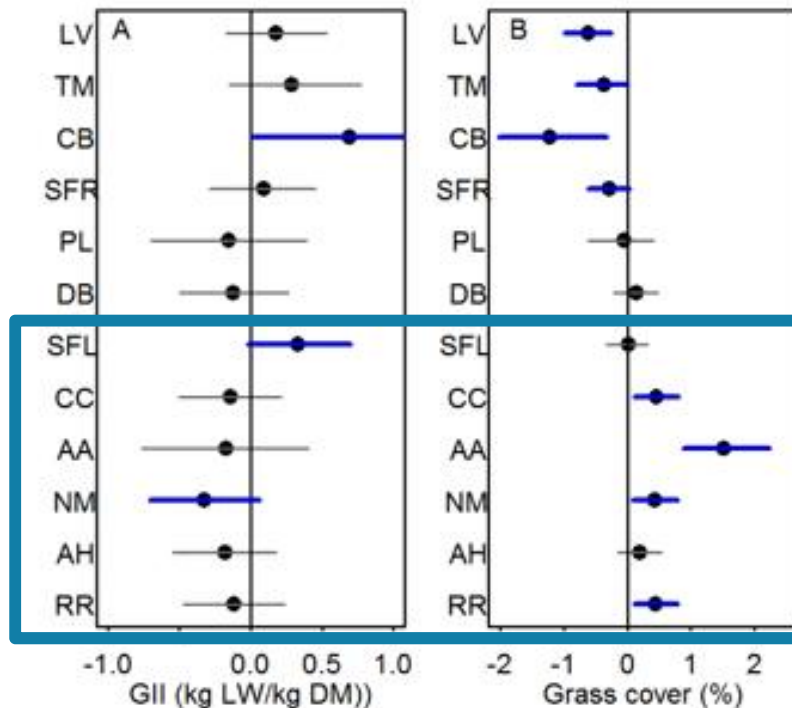
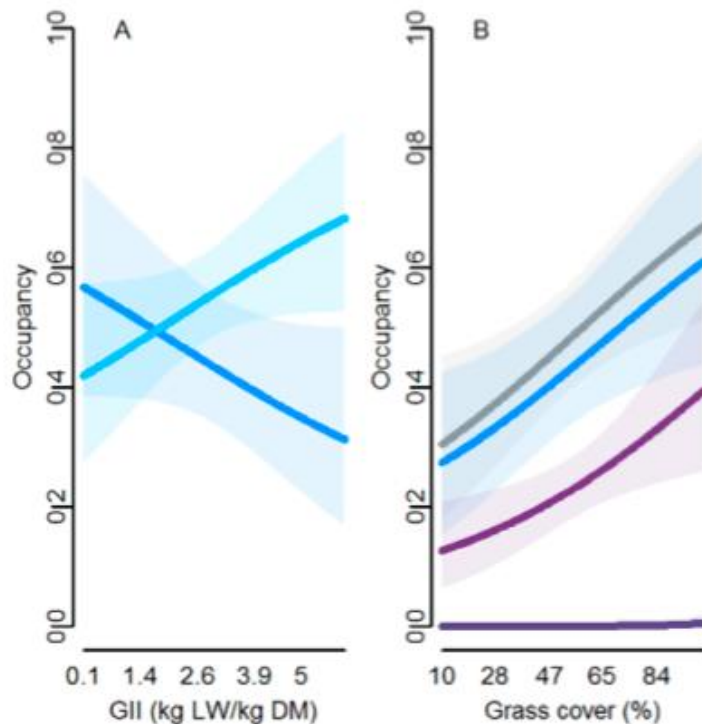
## *Incorporación de covariables*

- Regresión logística

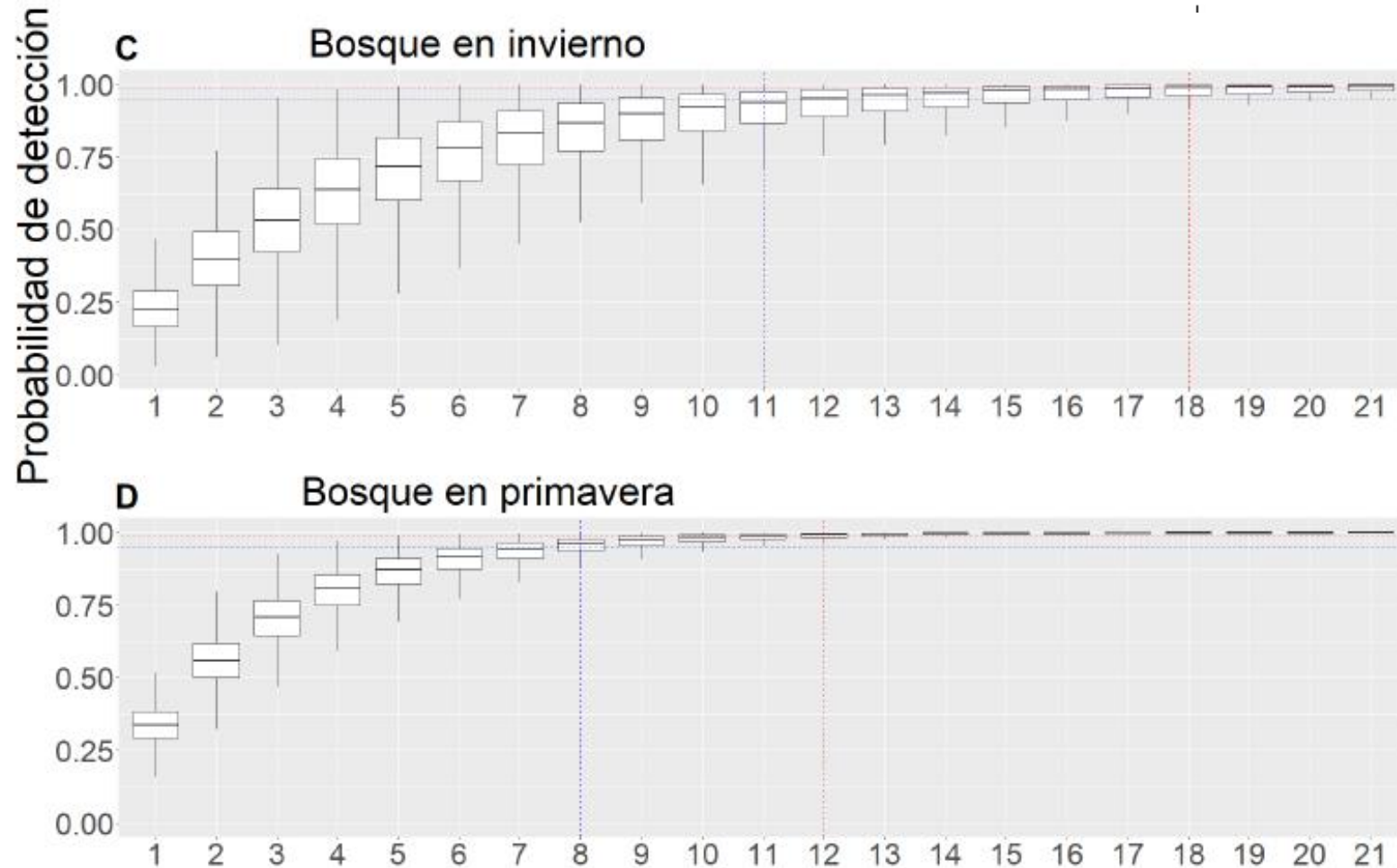
$$\text{logit}(\psi_i) = \alpha_{\text{psi}} + \beta_{x1} * x1_i$$

$$\text{logit}(p_{ij}) = \alpha_p + \beta_{x2} * x2_{ij}$$

(Dardanelli et al. 2022)



$$P^* = 1 - (1 - p)^n$$



**Figura III-4.** Probabilidad de detección según esfuerzo de muestreo (medido en cámaras-noche) con CRI95%. Las líneas punteadas horizontales marcan un valor  $\alpha=0,01$  (roja) y  $\alpha=0,05$  (azul). Las líneas segmentadas verticales indican el número de cámaras-noche necesarias para que la probabilidad de no detectar castores si es que están presentes sea al valor  $\alpha$  correspondiente al color. Figuras **A-D** corresponden a ambiente de bosque y figura **E** al ambiente de ecotono.

(Jusim 2022)



```
model {
```

### **# Priors**

```
psi ~ dunif(0, 1)
```

```
p ~ dunif(0, 1)
```

### **# Likelihood**

#### **# Modelo Ecológico para ocurrencia real**

```
for (i in 1:R) {
```

```
z[i] ~ dbern(psi)
```

#### **# Modelo de Observación para observaciones replicadas detección/no detección**

```
for (j in 1:T) {
```

```
y[i,j] ~ dbern(z[i] * p ) # y condicional a z=1 (observac condicional a la presencia)
```

```
  } #j repeticiones
```

```
} #i sitios
```

GOIJMAN, SERAFINI, CONTRERAS 2023

```
model {
```

### **# Priors**

```
alpha.occ ~ dunif(-10, 10)
```

```
beta.occ ~ dunif(-10, 10)
```

```
p ~ dunif(0, 1)
```

### **# Likelihood**

#### **# Modelo Ecológico para ocurrencia real**

```
for (i in 1:R) {
```

```
logit(psi[i]) <- alpha.occ + beta.occ * COV[i]
```

```
z[i] ~ dbern(psi[i])
```

#### **# Modelo de Observación para observaciones replicadas detección/no detección**

```
for (j in 1:T) {
```

```
y[i,j] ~ dbern(z[i] * p) # y condicional a z=1 (observac condicional a la presencia)
```

```
  } #j repeticiones
```

```
} #i sitios
```

## REFERENCIAS

- <http://www.vogelwarte.ch/de/projekte/publikationen/bpa/>
- Dardanelli, S., Calamari, N. C., Canavelli, S. B., Barzan, F. R., Goijman, A. P., & Lezana, L. (2022). Vegetation structure and livestock grazing intensity affect ground-foraging birds in xerophytic forests of Central-East Argentina. *Forest Ecology and Management*, 521, 120439.
- Jusim 2022. Ocupación y detección. Su aplicación en el manejo de una especie invasora, el castor canadiense, en Tierra del Fuego. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires
- Kery, M. 2009. Introduction to WinBUGS for Ecologists. Academic Press.
- Kéry, M., and M. Schaub. 2012. Bayesian population analysis using WinBUGS: a hierarchical perspective. Access Online via Elsevier.
- Link, W.A. and Richard J. Barker. 2010. Bayesian Inference with Ecological Applications. Academic Press.
- Mackenzie, D. I., and J.A. Royle. 2005. Designing occupancy studies: general advice and allocating survey effort. *Journal of Applied Ecology* 42: 1105–1114.
- MacKenzie, D. I., J. D. Nichols, A. R. Royle, K. H. Pollock, L. L. Bailey, and J. E. Hines. 2006. Occupancy estimation and modeling : inferring patterns and dynamics of species occurrence. Elsevier/Academic Press, Burlington, MA.
- MacKenzie, D. I., J. D. Nichols, G. B. Lachman, S. Droege, J. Andrew Royle, and C.A. Langtimm. 2002. Estimating site occupancy rates when detection probabilities are less than one. *Ecology* 83:2248–2255.
- MacKenzie, D. I., Nichols, J. D., Royle, J.A., Pollock, K. H., Bailey, L. L., & Hines, J. E. 2017. Occupancy estimation and modeling: inferring patterns and dynamics of species occurrence. Elsevier.
- Royle, J.A., and M. Kery. 2016. Applied Hierarchical Modeling in Ecology: Analysis of distribution, abundance and species richness in R and BUGS: Volume 1: Prelude and Static Models Books. Academic Press.
- Royle, J.A., and R. M. Dorazio. 2008. Hierarchical modeling and inference in ecology: the analysis of data from populations, metapopulations and communities. Academic Press.
- Tyre, A. J., B. Tenhumberg, S.A. Field, D. Niejalke, K. Parris, and H. P. Possingham. 2003. Improving Precision and Reducing Bias in Biological Surveys: Estimating False-Negative Error Rates. *Ecological Applications* 13:1790–1801.
- Williams, B., J. Nichols, and M. Conroy. 2002. Analysis and Management of Animal Populations: Modeling, Estimation, and Decision Making. Academic Press, San Diego, CA.