

APLICACIONES REALES DE MODELOS BIOINSPIRADOS

Tema 7: Estudio de especies en peligro de extinción

David Orellana Martín
Mario de J. Pérez Jiménez

Grupo de investigación en Computación Natural
Dpto. Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial
Universidad de Sevilla

Máster Universitario en Lógica, Computación e Inteligencia Artificial

Curso 2023-2024



Objetivos

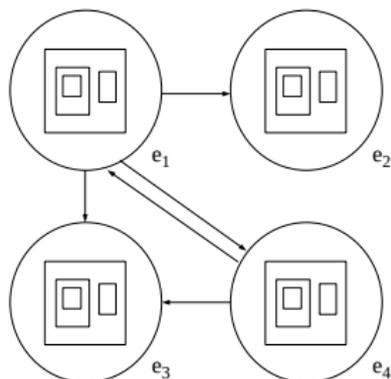
Diseñar modelos computacionales, basados en Membrane Computing, de **ecosistemas reales**, relacionados con **especies en peligro de extinción**.

- ★ El **quebrantahuesos** en la zona pirenaico-catalana.
- ★ El **panda gigante** en cautividad (en el **Giant Panda Breeding Base**, Chengdu, China).

El marco de modelización computacional

Sistemas P multientorno

Orientación PROBABILÍSTICA



- Motor de inferencia: algoritmo BBB¹, algoritmo DNDP² y algoritmo DCBA³.

¹ M. Cardona, M.A. Colomer, A. Margalida, A. Palau, I. Pérez-Hurtado, M.J. Pérez-Jiménez, D. Sanuy. A computational modeling for real ecosystems based on P systems. *Natural Computing*, 10, 1 (2011), 39-53.

² M.A. Martínez, I. Pérez-Hurtado, M.J. Pérez-Jiménez, A. Riscos, M.A. Colomer. A new simulation algorithm for multienvironment probabilistic P systems. In K. Li, Z. Tang, R. Li, A.K. Nagar, R. Thamburaj (eds.) *Proceedings 2010 IEEE Fifth International Conference on Bio-inspired Computing: Theories and Applications*, IEEE Press, Volume 1, September 23-26, 2010, Changsha, China, pp. 59-68.

³ M.A. Martínez, I. Pérez, M. García-Quismondo, L.F. Macías, L. Valencia, A. Romero, C. Graciani, A. Riscos, M.A. Colomer, M.J. Pérez-Jiménez. DCBA: Simulating population dynamics P systems with proportional objects distribution. *Lecture Notes in Computer Science*, 7762 (2013), 257-276

Sistemas PDP

Sistema PDP de orden (m, q) : conjunto de m entornos e_1, \dots, e_m interconectados por los arcos de un grafo dirigido G tales que cada entorno contiene un único sistema de membranas “ordinario” (todos con el mismo esqueleto).

- Cada entorno e_j sólo puede contener símbolos del alfabeto Σ y, además, un único sistema de membranas $\Pi_k = (\Gamma, \mu, \mathcal{M}_1, \dots, \mathcal{M}_q, \mathcal{R}, i_{in})$, tal que:
 - (a) Los multiconjuntos iniciales de Π_k dependen del entorno e_j .
 - (b) Las funciones de probabilidad asociadas a las reglas de Π_k dependen del entorno e_j .
- Las funciones de probabilidad asociadas a las reglas del entorno e_j dependen de e_j .

Semántica de los sistemas PDP: se implementa mediante algoritmos de simulación:

BBB, DNDP, DCBA.

El quebrantahuesos en la zona pirenaico catalana

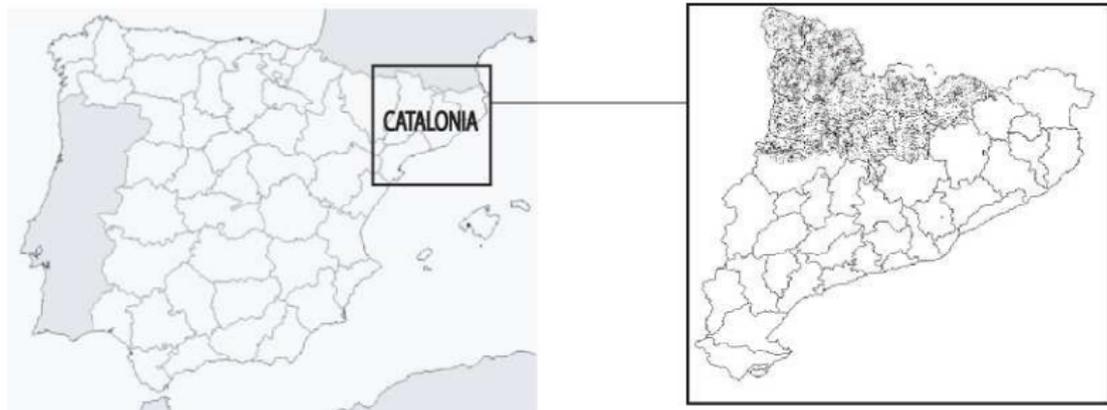


- Especie en peligro de extinción.
- Zona pirenaico-catalana (datos desde 1994 hasta 2008)⁴ ⁵

⁴ M. Cardona, M.A. Colomer, M.J. Pérez-Jiménez, D. Sanuy, A. Margalida. Modelling ecosystem using P systems: The bearded vulture, a case study. *Lecture Notes in Computer Science*, 5391 (2009), 137–156.

⁵ M. Cardona, M.A. Colomer, M.J. Pérez, D. Sanuy, A. Margalida. A bio-inspired computing model as a new tool for modeling ecosystems: The avian scavengers as a case study. *Ecological Modelling*, 222, 1 (2011), 33–47.

El ecosistema real a modelizar está situado en el Pirineo Catalán.



Distribución regional del Quebrantahuesos en el Pirineo Catalán

La vida de distintas especies animales están interrelacionadas a través de dependencias en términos de comida, territorios, etc.

En los ecosistemas montañosos existe una relación tradicional entre **ungulados salvajes** y sus **predadores** (alterada por la presencia de **animales domésticos**).

El abandono de animales muertos es una fuente de comida de animales necrófagos.

- ★ Es el caso de los **quebrantahuesos** (*bearded vultures*, *Gypaetus barbatus*)
 - Especie que se alimenta de los huesos de animales domésticos y ungulados salvajes.

Puntos de interés para el **conservacionismo** de especies animales:

- * Estudio de la interacción de las especies entre sí y con el entorno.
- * Necesidad de usar modelos matemáticos/computacionales:
 - ★ Representar, analizar y formular medidas que ayude al desarrollo sostenible del ecosistema objeto de estudio.

Vamos a diseñar un modelo computacional (basado en sistemas PDPs) que estudia la evolución de un ecosistema localizado en la zona pirenaico-catalana.

- ★ El quebrantahuesos: especie en peligro de extinción.

El quebrantahuesos (I)

Especie carroñera (habitat usual: montañas de Europa, Asia y Africa).

En 2007 había contabilizadas unas 150 parejas en todo el mundo.

- Tienen una vida media de 21.4 años.
- Edad media de la primera reproducción: 8.1 años.
- La tasa de fertilidad (en Cataluña) se estima en el 38%.
- Los huevos se incuban desde diciembre a febrero y los polluelos nacen tras 52–54 días de incubación.
 - ★ Usualmente ponen dos huevos, pero sólo un polluelo sobrevive.
- A los 120 días abandonan el nido para llevar una vida nómada (durante 8 años).
 - ★ En ese periodo, la superficie media recorrida por jóvenes monitorizados fue de 4932 km^2 .
- A los 8 años ocupan un territorio fijo.
- Son los únicos vertebrados que se alimentan casi exclusivamente de huesos.
- Una pareja necesita en torno a 341 kgs. de huesos cada año

El quebrantahuesos (II)

En nuestro estudio, se van a considerar 5 especies de bóvidos (**ciervo**, **rebeco**, **gamo**, **corzo** y **oveja**), todas ellas tienen unos elementos básicos similares:

- ★ Todos son herbívoros.
- ★ Alcanzan su tamaño adulto a la edad de 1 año.
- ★ Alcanzan su madurez sexual a los 2 años.
- ★ La tasa de mortalidad de las especies son parecidas:
 - Durante el primer año de vida: en torno al 50 %.
 - El resto, en torno al 6 %.
- ★ Los **ciervos machos** son muy apreciados por los cazadores:
 - En el modelo se distinguirán entre machos y hembras (tasa de mortalidad).
- ★ Estas 5 especies proporcionan el 67% de la comida que necesitan los quebrantahuesos.
- ★ En 2008, existían, en Cataluña, 7 estaciones de alimentación que proporcionan artificialmente unos 10500 kgs de huesos por año.

El quebrantahuesos (III)

- Cuando un bóvido muere en el ecosistema, sus huesos estarán disponibles para comida de los quebrantahuesos.

Specie	Weigh Male kg	Weigh Female kg	Percentage Female	Average weigh kg	Biomass: bone adult kg	Biomass: bone young kg	Kg accessible by B. Vulture (adult/young)
Bearded Vulture	5	6.5	60	5.75	-	-	-
Chamois	28	32	50	30	6	3	6/3
Red Deer Female	-	75	100	75	15	7.5	15/7.5
Red Deer Male	120	-	-	120	24	12	24/12
Fallow Deer	63	42	80	46	9	4.5	2/1
Roe Deer	27	23	66	24	5	2.5	1/0.5
Sheep	42	35	97	35.2	7	3.5	7/3.5

Variables descriptivas usadas para modelizar el ecosistema

Primer modelo computacional del quebrantahuesos, basado en MC

- * Fue presentado en Edinburgh (U.K.), a finales de julio de 2008⁶
- * En este modelo preliminar, sólo se consideró:
 - ★ Una especie carroñera: el propio **quebrantahuesos**.
 - ★ Cuatro tipos de bóvidos salvajes: **rebeco**, **ciervo**, **gamo** y **corzo**).
 - ★ Un bóvido “doméstico” (**oveja**).
- * Además,
 - ★ Los quebrantahuesos se analizan a partir de los 8 años (la unidad será la **pareja**).
 - ★ Los bóvidos (hacen de “presas”) tienen comida suficiente.
 - ★ No se modelizó la fuente artificial de alimento del quebrantahuesos.
 - ★ **No se contempló** la regulación de la densidad de la población (**capacidad de carga**).
- ★ Modelo estructurado en cuatro módulos que completan un ciclo equivalente a un año.

⁶ M. Cardona, M.A. Colomer, M.J. Pérez-Jiménez, D. Sanuy, A. Margalida. Modelling ecosystem using P systems: The bearded vulture, a case study. In P. Frisco, D.W. Corne, Gh. Paun (eds.). *Proceedings of the 9th Workshop on Membrane Computing*, Edinburgh (UK), July 28-31, 2008, pp. 95-116.

Especies del ecosistema objeto de estudio:

- **Quebrantahuesos**
(Bearded Vulture: *Gypaetus barbatus*).
- **Rebeco**
(Pyrenean Chamois: *Rupicapra pyrenaica*).
- **Ciervo**
(Red Deer: *Cervus elaphus*).
- **Gamo**
(Fallow Deer: *Dama dama*).
- **Corzo**
(Roe Deer: *Capreolus capreolus*).
- **Oveja**
(Sheep: *Ovis capra*).

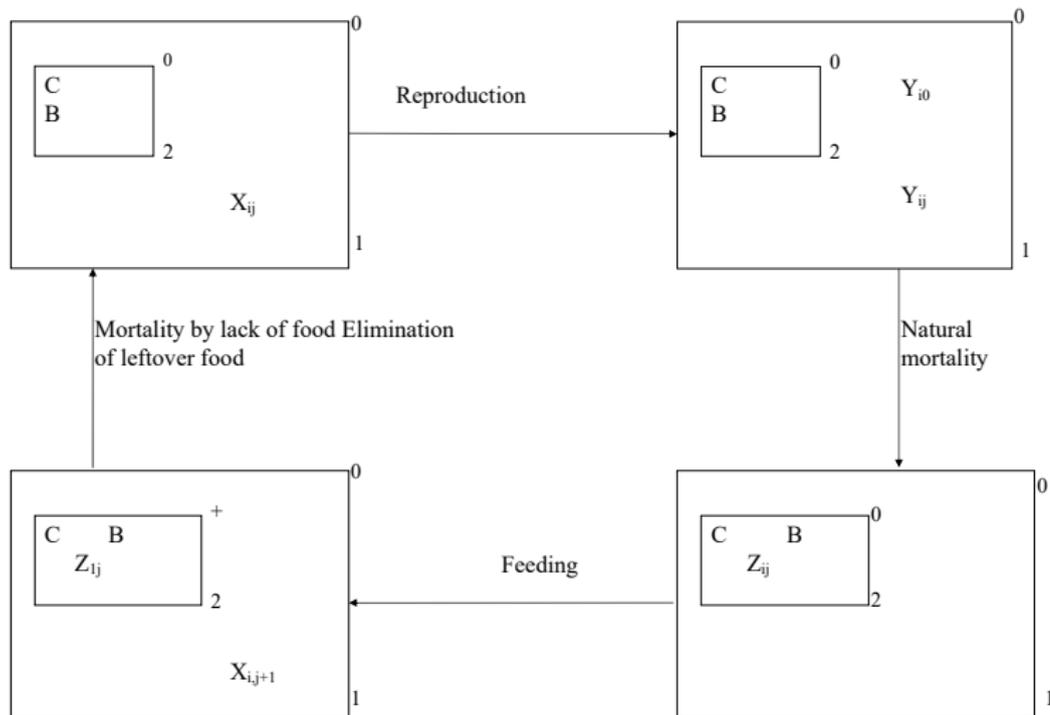


Familia de los **bóvidos**:

- Herbívoros
(principal fuente de alimentación del quebrant.)



Módulos del diseño



Un sistema PDP que modeliza un **ecosistema real** (I)

Un sistema PDP de grado (2, 1):

$$(G, \Gamma, \Sigma, \mathcal{R}_\Pi, \mathcal{R}_E, \{f_r : r \in \mathcal{R}_\Pi\}, \mathcal{M}_1, \mathcal{M}_2)$$

- * $G = (V, E)$ con $V = \{e_1\}$ y $E = \emptyset$
- * $\Sigma = \emptyset$ y $\Gamma = \{X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j} : 1 \leq i \leq 7, 0 \leq j \leq k_{i,4}\} \cup \{B, C\}$
 - $X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}$ representan el mismo animal pero en diferentes “estados”.
 - El índice i está asociado a la especie ($i = 1$: quebrantahuesos) y j está asociado a la edad.
 - B represent 0.5 kgs de huesos y el objeto C es usado por razones técnicas.



- * $\mathcal{R}_E = \emptyset$.

Un sistema PDP que modeliza un **ecosistema real** (II)

* $\Pi = (\Gamma, \mu, \mathcal{M}_1, \mathcal{M}_2, \mathcal{R}_\Pi)$:

• Estructura de membranas: $\mu = [[]_2]_1$:

★ Membrana piel: los animales evolucionan siguiendo reglas de **reproducción**, “**crecimiento**” y **mortalidad natural**.

★ Membrana interna: los animales evolucionan siguiendo reglas de **alimentación** y “**balance**”.

• $\mathcal{M}_1 = \{X_{i,j}^{q_{i,j}} : 1 \leq i \leq 7, 0 \leq j \leq k_{i,4}\}$, $q_{i,j}$: n^0 animales de especie i , edad j .

• $\mathcal{M}_2 = \{C, B^\alpha\}$, donde $\alpha = \lceil \sum_{j=1}^{21} q_{1j} \cdot 1.10 \cdot 682 \rceil$

★ α representa la contribución externa de comida (añadida durante el primer año de estudio a fin de que los quebrantahuesos sobrevivan).

★ La constante 1.10 permite garantizar suficiente comida para un crecimiento de la población del 10% (se estima que el crecimiento está en torno a un 4%, pero a fin de evitar problemas, el primer año se hace una sobre-estimación del crecimiento hasta el 10%).

★ La constante 682 indica la cantidad de comida anual (expresada en 1/2 kg) que una pareja de quebrantahuesos necesita para sobrevivir.

Reglas de Reproducción

Regulan la reproducción de los animales del ecosistema que **no son** el quebrantahuesos.

Machos adultos:

$$\star r_0 \equiv [X_{i,j} \xrightarrow{1-k_{i,13}} Y_{i,j}]_1, \quad 2 \leq i \leq 7, k_{i,2} \leq j \leq k_{i,4} \quad (k_{i,13}: \text{ratio de hembras}).$$

Hembras adultas que se reproducen:

$$\star r_1 \equiv [X_{i,j} \xrightarrow{k_{i,5} \cdot k_{i,13}} Y_{i,j} Y_{i0}]_1, \quad 2 \leq i \leq 7, k_{i,2} \leq j < k_{i,3} \quad (k_{i,5}: \text{ratio de fertilidad}).$$

Hembras adultas fértiles que no se reproducen:

$$\star r_2 \equiv [X_{i,j} \xrightarrow{(1-k_{i,5}) \cdot k_{i,13}} Y_{i,j}]_1, \quad 2 \leq i \leq 7, k_{i,2} \leq j < k_{i,3}.$$

Hembras adultas no fértiles:

$$\star r_3 \equiv [X_{i,j} \xrightarrow{k_{i,13}} Y_{i,j}]_1, \quad 2 \leq i \leq 7, k_{i,3} \leq j \leq k_{i,4}.$$

Animales jóvenes que no se reproducen:

$$\star r_4 \equiv [X_{i,j} \longrightarrow Y_{i,j}]_1, \quad 2 \leq i \leq 7, 0 \leq j < k_{i,2}.$$

Reglas de “Crecimiento”

Regulan la “reproducción” de los quebrantahuesos.

- * En nuestro modelo, el crecimiento de la población del quebrantahuesos depende de la población flotante y del entorno.

La tasa de crecimiento anual ⁷ ha sido obtenida experimentalmente.

Quebrantahuesos que no han llegado a su esperanza de vida:

- * $r_5 \equiv [X_{1,j} \xrightarrow{k_{1,6} \cdot (1-k_{1,10})} Y_{1,k_{1,2}} Y_{1,j}]_1, k_{1,2} \leq j < k_{1,4}$ ($k_{1,6}$: ratio crecimiento población)
($k_{1,10}$: ratio mortalidad adultos)
- * $r_6 \equiv [X_{1,j} \xrightarrow{(1-k_{1,6}) \cdot (1-k_{1,10})} Y_{1,j}]_1, k_{1,2} \leq j < k_{1,4}$.

Quebrantahuesos que han llegado a su esperanza de vida:

- * $r_7 \equiv [X_{1,j} \xrightarrow{k_{1,6}} Y_{1,k_{1,2}} Y_{1,j}]_1, j = k_{1,4}$.
- * $r_8 \equiv [X_{1,j} \xrightarrow{1-k_{1,6}} Y_{1,j}]_1, j = k_{1,4}$.

⁷R. Heredia. Status y distribución del quebrantahuesos en España y diagnóstico de la situación de la población en la UE. En A. Margalida, R. Heredia (eds). *Biología de la conservación del quebrantahuesos Gypaetus barbatus en España*, Organismo Autónomo, Parques Nacionales, Madrid (2005)

Reglas de Mortalidad Natural

Regulan la mortalidad de los animales que intervienen en el ecosistema.

(a) Animales jóvenes.

Los que sobreviven:

$$\star r_9 \equiv Y_{i,j}[]_2 \xrightarrow{1-k_{i,7}-k_{i,8}} [Z_{i,j}]_2 : 1 \leq i \leq 7, 0 \leq j < k_{i,1} \quad (k_{i,7}: \text{ratio jóvenes retirados}) \\ (k_{i,8}: \text{ratio mortalidad jóvenes})$$

Los que mueren:

$$\star r_{10} \equiv Y_{i,j}[]_2 \xrightarrow{k_{i,8}} [B^{k_{i,11}}]_2 : 1 \leq i \leq 7, 0 \leq j < k_{i,1}.$$

Los que son retirados del ecosistema:

$$\star r_{11} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{k_{i,7}} \lambda]_1 : 1 \leq i \leq 7, 0 \leq j < k_{i,1}.$$

(b) Animales adultos que no llegan a su esperanza de vida:

Los que sobreviven:

$$\star r_{12} \equiv Y_{i,j}[]_2 \xrightarrow{1-k_{i,10}} [Z_{i,j}]_2 : 1 \leq i \leq 7, k_{i,1} \leq j < k_{i,4} \quad (k_{i,10}: \text{ratio mortalidad adultos})$$

Los que mueren:

$$\star r_{13} \equiv Y_{i,j}[]_2 \xrightarrow{k_{i,10}} [B^{k_{i,12}}]_2 : 1 \leq i \leq 7, k_{i,1} \leq j < k_{i,4}.$$

Reglas de Mortalidad

(c) Animales que llegan a su esperanza de vida:

Aquellos animales que no son quebrantahuesos y mueren en el ecosistema:

$$\star r_{14} \equiv Y_{i,j} []_2 \xrightarrow{k_{i,9} + (1-k_{i,9}) \cdot k_{i,10}} [B^{k_{i,12}}]_2 : 2 \leq i \leq 7, j = k_{i,4}$$

($k_{i,9}$: ratio mortalidad jóvenes; $k_{i,10}$: ratio mortalidad adultos)

Aquellos animales que no son quebrantahuesos y son retirados del ecosistema:

$$\star r_{15} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{(1-k_{i,9}) \cdot (1-k_{i,10})} \lambda]_1 : 2 \leq i \leq 7, j = k_{i,4}.$$

Aquellos para los que el crecimiento de la población no depende de la tasa de fertilidad (los quebrantahuesos):

$$\star r_{16} \equiv Y_{1,j} []_2 \longrightarrow [Z_{1,k_{1,2}}]_2 : j = k_{i,4}.$$

Reglas de Alimentación

Regulan el paso al “siguiente” ciclo, de aquellos animales que se han alimentado, suficientemente (un objeto $Z_{i,j}$ pasará a ser un objeto $X_{i,j+1}$).

Para los bovidos que han llegado hasta aquí, no hay problema de comida.

En cambio, de los quebrantahuesos, sólo sobrevivirán aquellos que se hayan alimentado, adecuadamente.

$$\star r_{17} \equiv [Z_{i,j} B^{k_{i,14}}]_2 \rightarrow X_{i,j+1} []_2^+ : 1 \leq i \leq 7, 0 \leq j \leq k_{i,4}.$$

Nota 1: $k_{1,14}$ es la ratio de comida necesaria para una pareja de quebrantahuesos.

Nota 2: Si $2 \leq i \leq 7$ entonces $k_{i,14} = 0$. Luego, en estos casos, la regla r_{17} se aplicará siempre, para todos los objetos $Z_{i,j}$, proporcionando objetos $X_{i,j+1}$.

Reglas de hacer balance al final del ciclo

Regulan el número de quebrantahuesos, según haya comido adecuadamente o no

- ★ Los objetos $Z_{1,j}$ que hayan “llegado” hasta aquí, representan quebrantahuesos que no han comido suficiente.

Además, los posibles huesos sobrantes se degradan con el tiempo y hay que eliminarlos del ecosistema.

Eliminación de los huesos restantes:

- ★ $r_{18} \equiv [B]_2^+ \rightarrow []_2$.

Animales adultos que mueren por falta de comida:

- ★ $r_{19} \equiv [Z_{1,j}]_2^+ \rightarrow [\lambda]_2 : k_{i,1} \leq j \leq k_{i,4}$

(“*quebrantahueso no come hueso de quebrantahueso*”)

Animales jóvenes que mueren por falta de comida:

- ★ $r_{20} \equiv [Z_{1,j}]_2^+ \rightarrow [\lambda]_2 : j < k_{i,1}$

Si la comida existente es suficiente, entonces el objeto C cambia la polarización:

- ★ $r_{21} \equiv [C]_2^+ \rightarrow [C]_2$.

Constantes asociadas a las reglas

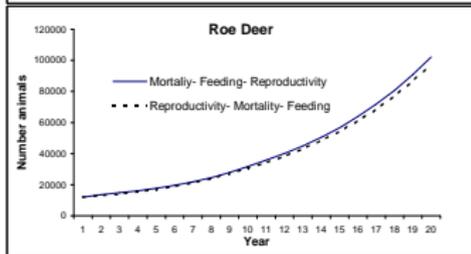
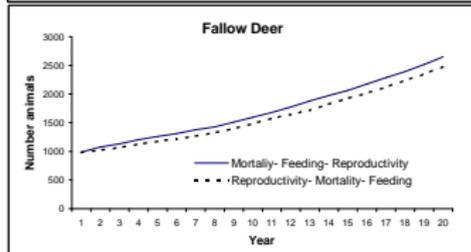
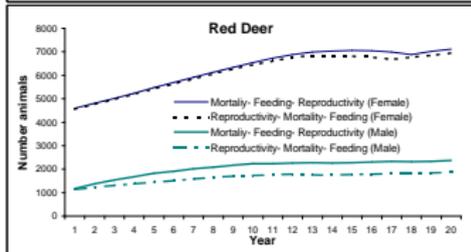
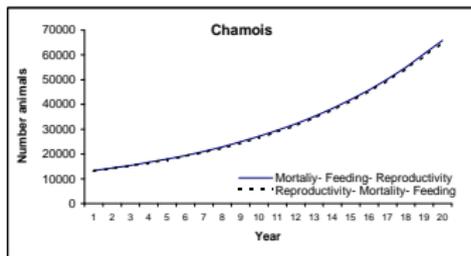
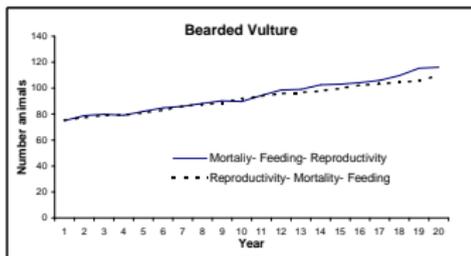
- $k_{i,1}$: age at which adult size is reached (age at which the animal consumes food as an adult does, and at which, if the animal dies, the amount of biomass it leaves behind is similar to the total left by an adult).
- $k_{i,2}$: age at which it starts to be fertile.
- $k_{i,3}$: age at which it stops being fertile.
- $k_{i,4}$: average life expectancy in the ecosystem.
- $k_{i,5}$: fertility ratio (this quantity is expressed in terms of 1).
- $k_{i,6}$: population growth (this quantity is expressed in terms of 1).
- $k_{i,7}$: young animals retired from the ecosystem (this quantity is expressed in terms of 1).
- $k_{i,8}$: natural mortality ratio in young animals (this quantity is expressed in terms of 1).
- $k_{i,9}$: 0 if the live animals are retired at age $k_{i,4}$, 1 otherwise.
- $k_{i,10}$: mortality ratio in adult animals (this quantity is expressed in terms of 1).
- $k_{i,11}$: amount of bones from young animals.
- $k_{i,12}$: amount of bones from adult animals.
- $k_{i,13}$: proportion of females in the population (this quantity is expressed in terms of 1).
- $k_{i,14}$: if $i = 1$ is the amount of food necessary per year and breeding pair (1 unit is equal to 0'5 kgs of bones), if $i \neq 1$, then $k_{i,14} = 0$.

Valores de las constantes $k_{i,j}$ usadas en nuestro modelo

	$k_{i,1}$	$k_{i,2}$	$k_{i,3}$	$k_{i,4}$	$k_{i,5}$	$k_{i,6}$	$k_{i,7}$	$k_{i,8}$
B.V.	1	8	20	21	0.38	0.04	0	0.06
P.Ch.	1	2	18	18	0.75	0	0	0.60
R.D.F.	1	2	17	17	0.75	0	0	0.34
R.D.M.	1	2	0	20	0	0	0	0.34
F.D.	1	2	12	12	0.55	0	0	0.50
R.D.	1	1	10	10	1.00	0	0	0.58
Sh.	1	2	8	8	0.75	0	0.57	0.15

	$k_{i,9}$	$k_{i,10}$	$k_{i,11}$	$k_{i,12}$	$k_{i,13}$	$k_{i,14}$
B.V.	1	0.12	0	0	0.50	682
P.Ch.	1	0.06	6	12	0.55	0
R.D.F.	1	0.06	15	30	1.00	0
R.D.M.	1	0.36	24	48	0	0
F.D.	1	0.06	2	4	0.75	0
R.D.	1	0.06	1	2	0.67	0
Sh.	0	0.03	7	14	0.96	0

Discusión y Resultados (I)



Robustez del modelo

Estimación del número de animales en 1994

Age	Bearded Vulture	Chamois	Red deer female	Red deer male	Fallow deer	Roe deer	Sheep
1	0	741	167	58	83	121	20832
2	0	740	133	44	73	121	20208
3	0	668	107	35	69	121	19601
4	0	667	85	28	63	121	19014
5	0	667	68	23	59	109	18443
6	0	596	41	14	55	108	17890
7	0	594	33	11	51	108	17353
8	2	518	26	9	47	96	16659
9	2	517	21	7	35	96	0
10	2	444	17	5	33	0	0
11	2	444	13	5	30	0	0
12	2	444	11	4	0	0	0
13	2	373	9	3	0	0	0
14	1	373	7	2	0	0	0
15	1	372	5	2	0	0	0
16	1	296	4	1	0	0	0
17	1	296	3	1	0	0	0
18	1	252	0	0	0	0	0
19	1	0	0	0	0	0	0
20	1	0	0	0	0	0	0
21	1	0	0	0	0	0	0

Estimación del número de animales en 2008

Age	Bearded Vulture	Chamois	Red deer female	Red deer male	Fallow deer	Roe deer	Sheep
1	0	988	978	254	125	1210	27776
2	0	987	780	192	110	1207	26944
3	0	890	625	154	103	1207	26135
4	0	889	500	124	95	1207	25352
5	0	889	400	99	89	1085	24591
6	0	795	240	60	83	1083	23854
7	0	792	195	48	77	1083	23137
8	6	690	155	38	71	959	22212
9	6	689	123	30	52	959	0
10	6	592	97	24	50	0	0
11	6	592	78	20	45	0	0
12	5	592	62	16	0	0	0
13	5	497	50	12	0	0	0
14	5	497	40	10	0	0	0
15	5	496	32	8	0	0	0
16	5	395	25	6	0	0	0
17	5	394	20	5	0	0	0
18	5	336	0	0	0	0	0
19	5	0	0	0	0	0	0
20	5	0	0	0	0	0	0
21	5	0	0	0	0	0	0

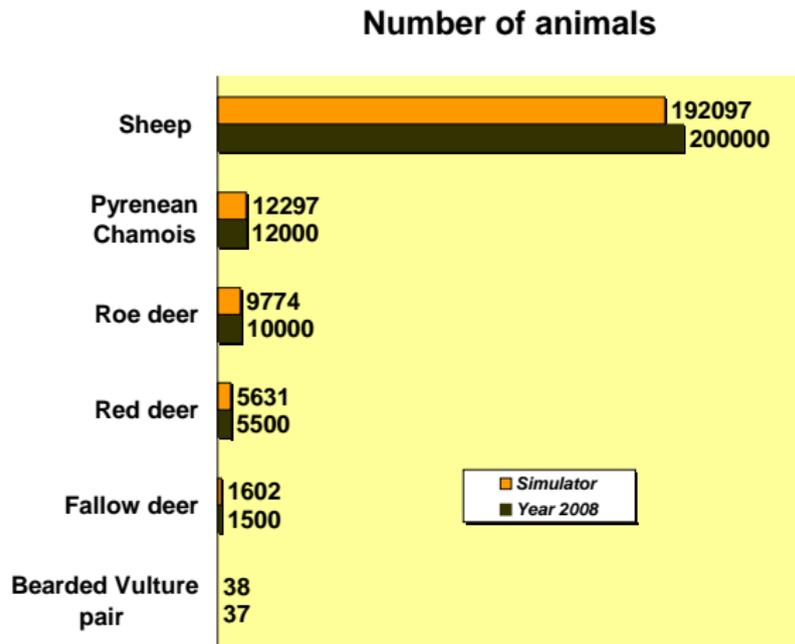
Resultados proporcionados por el modelo

Year	Bearded Vulture	Pyrenean Chamois	Pyrenean Chamois	Red deer	Fallow deer	Roe Deer	Sheep
1994	20	9000		1000	600	1000	150000
1995	21	9541		1115	667	1213	152074
1996	21	10023		1263	710	1371	153951
1997	22	10590		1432	758	1568	156183
1998	23	11121		1617	808	1812	158571
1999	24	11718		1834	859	2106	161318
2000	25	12366		2087	908	2469	164391
2001	27	13032		2368	967	2906	167914
2002	28	13767		2705	1032	3459	171940
2003	29	14597		3067	1111	4132	174713
2004	31	15488	10000	3470	1202	4969	177973
2005	33	16468	10594	3917	1297	5883	181300
2006	35	17508	11133	4437	1399	6974	184790
2007	36	18647	11709	5004	1495	8272	188357
2008	38	19866	12297	5631	1602	9774	192097

Nota importante:

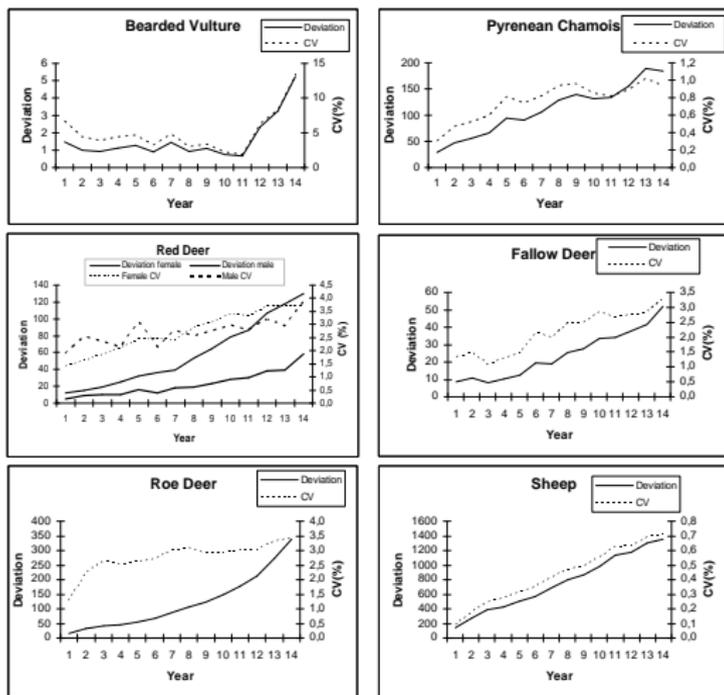
- ★ Poco antes de 2004, la población de rebecos estuvo afectada por una enfermedad (causada por unos pestivirus) que hizo decrecer la población hasta 10.000 individuos, en 2004.
- ★ En la tercera columna, aparecen los resultados proporcionados por el modelo, sin tener en cuenta este hecho.
- ★ En la cuarta columna, sí se tuvo en cuenta.

Discusión y Resultados (II)



Average number of animals simulator vs census estimated in 2008

Discusión y Resultados (III)



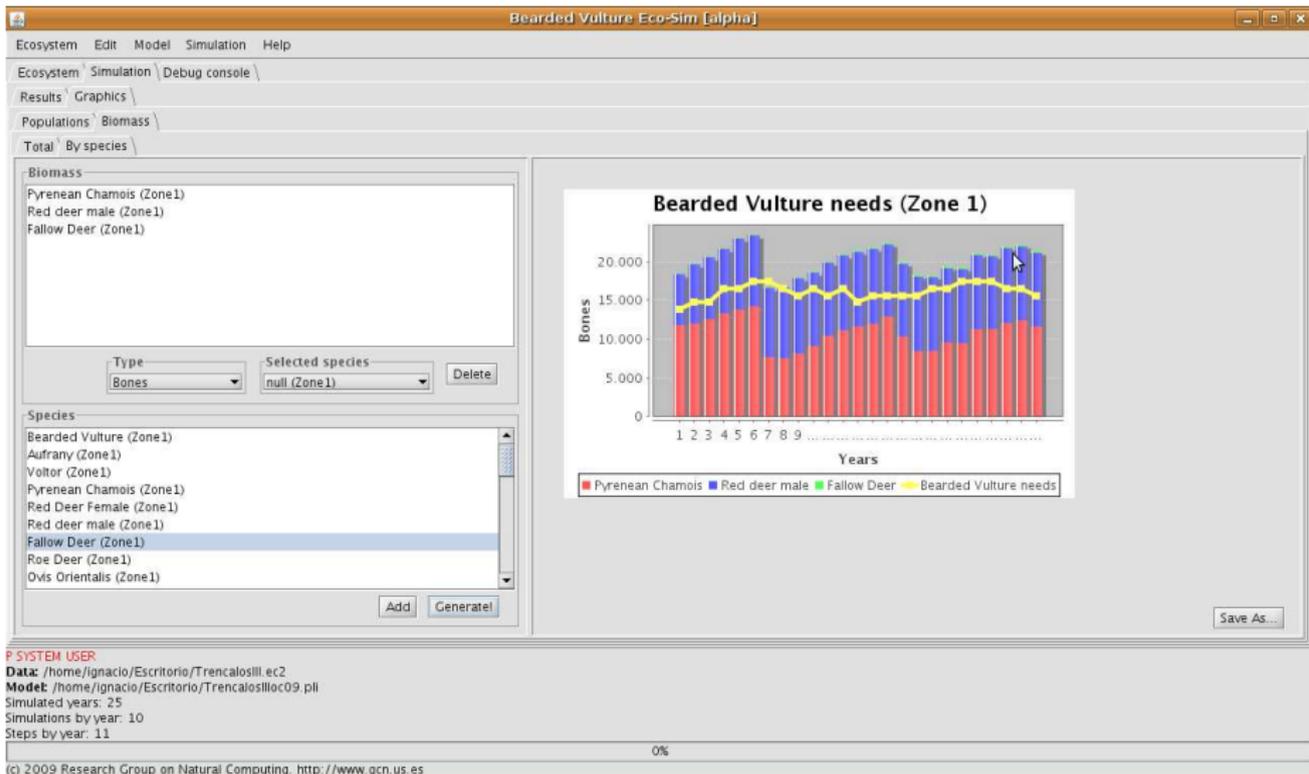
Desviación y coeficiente de variación

Coefficiente de variación (porcentaje de desviación de la media) en las especies durante los 14 años:

- Para el quebrantahuesos, no excede del 14%.
- Para el resto de las especies, no excede del 5%.
- Debido al bajo número de parejas de quebrantahuesos, su coeficiente de variación es mayor.

Análisis de viabilidad de la población

Probabilidad de que una especie se extinga al cabo de un número de años.



Idea general para incorporar la regulación de la población

Parámetros nuevos:

- ★ $d_{i,1}$: capacidad de carga de la especie i .
- ★ $d_{i,2}$: número de animales de la especie i que sobrevivirán tras la regulación.

Objetos específicos que se añaden:

- ★ D_i : chequear si se ha alcanzado la capacidad de carga de la especie i .
- ★ a_i : implementar la capacidad de carga de la especie i , a fin de regular la población.
- ★ d_i : generar los a_j .
- ★ e_i : incorporar aleatoriedad en la capacidad de carga de la especie i .

En la configuración inicial debería aparecer

$$\mathcal{M}_1 = \{X_{i,j}^{q_{i,j}}, d_i \mid 1 \leq i \leq 7, 0 \leq j \leq k_{i,4}\}$$

Idea general para incorporar la regulación de la población

Y se añadirán las reglas

$$\star d_i []_2 \longrightarrow [d_i a_i^{0.9 \cdot d_{i,1}} e_i^{0.2 \cdot d_{i,1}}]_2$$

$$\star [e_i]_2 \xrightarrow{0.5} [a_i]_2^+$$

$$\star [e_i]_2 \xrightarrow{0.5} [\#]_2^+$$

En las **reglas de mortalidad natural**, cada vez que sobreviva un animal de la especie i , añadiremos un objeto D_i .

Por ejemplo, en la regla de supervivencia de jóvenes:

$$\star r_9 \equiv Y_{i,j} []_2 \xrightarrow{1-k_{i,7}-k_{j,8}} [Z_{i,j}]_2 : 1 \leq i \leq 7, 0 \leq j < k_{i,1}.$$

escribiremos:

$$\star r'_9 \equiv Y_{i,j} []_2 \xrightarrow{1-k_{i,7}-k_{j,8}} [Z_{i,j} D_i]_2 : 1 \leq i \leq 7, 0 \leq j < k_{i,1}.$$

Idea general para incorporar la regulación de la población

Antes de las **reglas de alimentación** se ejecutarán las **reglas de regulación** de la población. Para ello, hemos de “cargarnos” a $d_{i,1} - d_{i,2}$ ejemplares de la especie i .

$$\star [D_i^{d_{i,1}} a_i^{d_{i,1}-d_{i,2}} \rightarrow \#]_2^+ : 1 \leq i \leq 7.$$

Tras ejecutar la regla anterior, la multiplicidad de a_i representará el número de animales de la especie i que han superado la regulación de la población. Sólo a esos se les permitira alimentarse.

Por ello, por ejemplo, la regla

$$\star r_{17} \equiv [Z_{i,j} B^{k_i,14}]_2 \rightarrow X_{i,j+1} []_2^+ : 1 \leq i \leq 7, 0 \leq j \leq k_{i,4}.$$

será sustituida por esta otra:

$$\star r'_{17} \equiv [Z_{i,j} a_i B^{k_i,14}]_2 \rightarrow X_{i,j+1} []_2^+ : 1 \leq i \leq 7, 0 \leq j \leq k_{i,4}.$$

Idea general para incorporar la regulación de la población

En el balance de fin de ciclo, los restantes objetos a_i, D_i se eliminarán, mientras que un objeto d_i continuará para reiniciar el ciclo:

- * $[a_i]_2^+ \rightarrow []_2 : 1 \leq i \leq 7.$
- * $[D_i]_2^+ \rightarrow []_2 : 1 \leq i \leq 7.$
- * $[d_i]_2^+ \rightarrow d_i []_2 : 1 \leq i \leq 7.$



Los pandas gigantes en cautividad (Chengdu, China)



Pandas gigantes versus pandas rojos



Pandas gigantes (*Ailuropoda melanoleuca*)

- ★ Especie de **mamifero** del orden de los **carnívoros** y se engloba entre los miembros de la familia de los osos (Ursidae), siendo el **oso de anteojos** su pariente más cercano.



Pandas gigantes

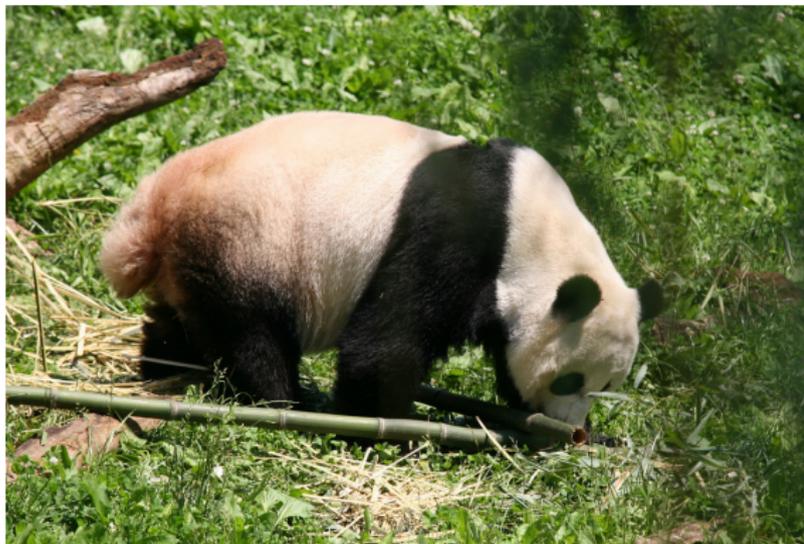
- ★ Si bien pertenecen al orden de los carnívoros, los ancestros del panda gigante eran omnívoros, algo que se refleja también en su dentición.



- ★ En un extremo se sitúa el oso polar, puramente carnívoro, mientras que el panda parece haber completado una transición evolutiva hacia la alimentación herbívora.

Pandas gigantes

- ★ Miden unos 150 cms de largo, más unos 10 – 15 cms de cola.



- ★ Un panda adulto puede llegar a pesar hasta 150 kg, siendo los machos un 10% más voluminosos y un 20% más pesados que las hembras.

Pandas gigantes

- ★ Normalmente viven en el suelo, pero tienen la habilidad para trepar a los árboles.



Pandas gigantes

- ★ Son animales solitarios, condicionados por su dieta alimenticia.
- ★ Cada adulto tiene muy bien definido su espacio vital en el que se mueve regularmente. No son territoriales pero las hembras no toleran a otras hembras en su espacio ni a otros pandas adultos.



- ★ Los pandas se comunican con frecuencia a través de la voz o la demarcación del territorio: marcan su camino dejando rastros de orina, hincando sus uñas en los troncos de los árboles o frotándose.

Pandas gigantes

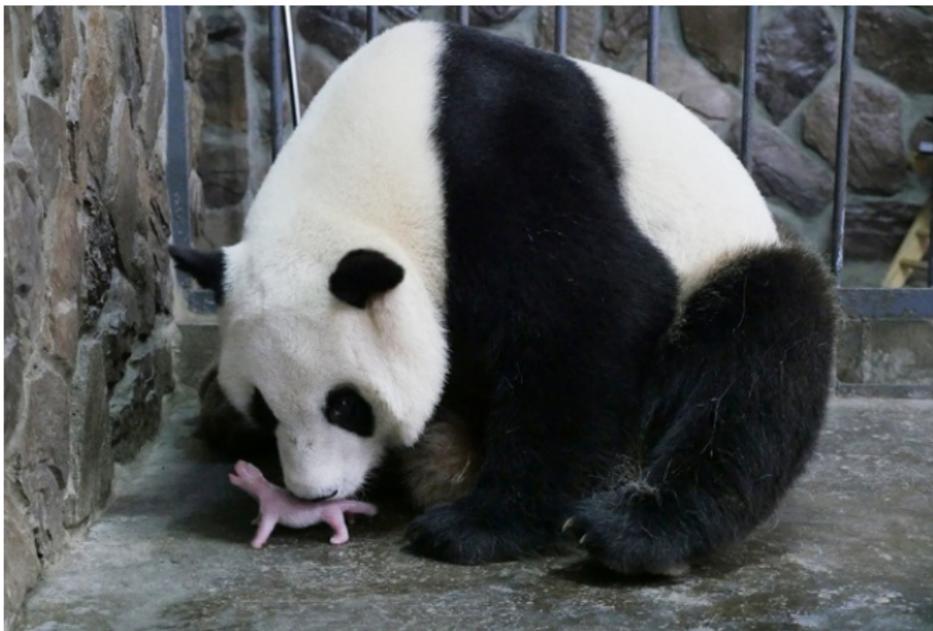
- ★ Alcanzan la madurez sexual entre los 5'5 años y los 6'5 años.
- ★ Una hembra puede aparearse con varios machos, que compiten entre ellos. Por su parte los machos buscan distintas hembras en celo.



- ★ El periodo de gestación oscila entre 97 y 163 días (los bebés están en el útero entre 3 y 5 meses).
- ★ Los pandas presentan una tasa de reproducción notoriamente baja.

Pandas gigantes

- ★ Normalmente dan a luz a una sola cria.



Pandas gigantes

- ★ El caso de los gemelos se suele dar en cautividad, cuando se utiliza inseminación asistida.



- ★ La tasa reproductiva es de una cría cada dos años.

Pandas gigantes

- ★ Un panda recién nacido pesa sólo entre 90 y 130grs. Su peso medio es sólo 1/900 del peso de su madre y miden en torno a 15 cms.
- ★ Tiene el tamaño de una barra de mantequilla. Son ciegos, rosados y con un pelaje muy fino.



- ★ Tasa de supervivencia del bebé en cautividad: en torno al 90% (en 1960 la tasa estaba en torno al 30%).

Pandas gigantes

- ★ Los pandas dependen de sus madres durante los primeros meses de vida y dejan de ser amamantados a los 8-9-10 meses. La mayoría dejan a sus madres cuando éstas vuelven a concebir, alrededor de los 18 meses.



Pandas gigantes

- ★ Durante los dos primeros meses, los bebés generalmente sólo se alimentan de leche.



- ★ A los tres meses pueden caminar hasta un metro, pero tambaleando y, a veces, cayéndose. Pesan alrededor de 5-6 kgs.



Pandas gigantes

- ★ A los cuatro meses comienzan a correr pocos pasos y les gusta rodar en el suelo.



- ★ A los seis meses comienzan a comer bambú.



Pandas gigantes

- ★ El periodo de lactancia dura unos diez meses.



El habitat

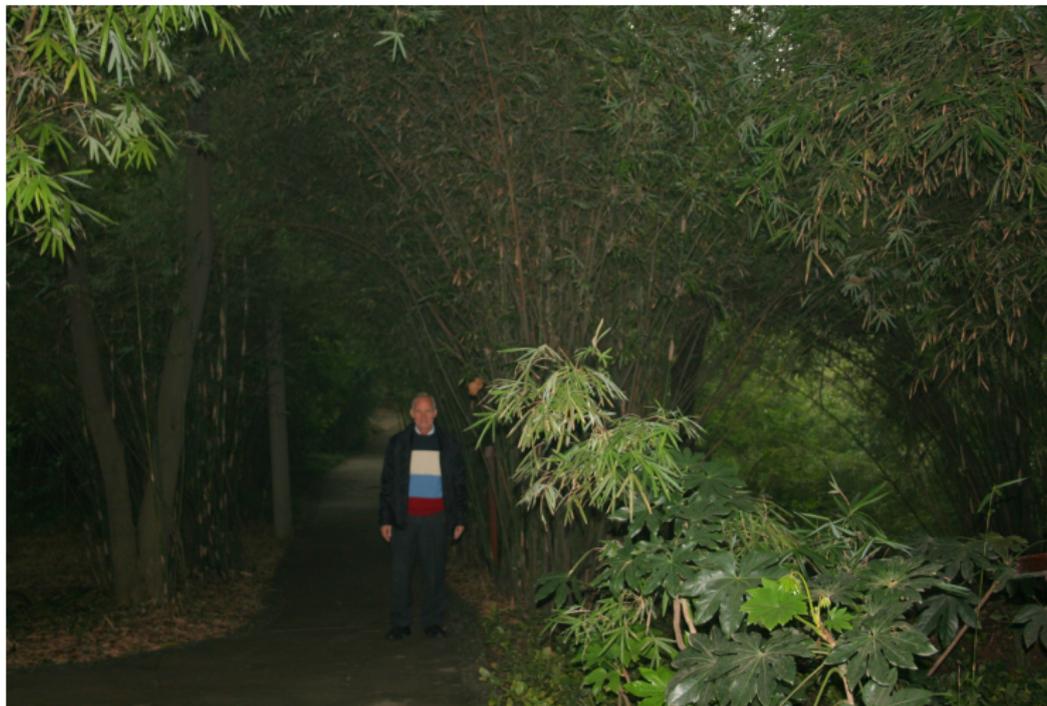
- ★ Un tercio de los bosques de bambú en los que habitan las pandas podrían desaparecer durante los próximos 80 años.



- ★ Las pandas gigante tienen una alimentación basada en plantas especiales de bambú (99 % de la dieta) .
- ★ La deforestación, la invasión humana, la construcción de carreteras y la agricultura ha provocado la división de los hábitats de las pandas en pequeñas secciones (proceso conocido como **fragmentación**).

Fuerte dependencia del habitat donde se produce ese tipo de bambú:

- ★ Es una especie de caña que puede alcanzar los 40 m. de altura.
- ★ Ese bambú crece en altitudes entre 500 m. y 3000 m.
- ★ Tarda unos 20 años en crecer y algo más en florecer.



Habitat del panda gigante en estado salvaje:

- ★ Está bastante fragmentado: Existen 33 subpoblaciones, de las que 18 constan de menos de 10 ejemplares.
- ★ Esta fragmentación aumenta la vulnerabilidad de la población.
- ★ La divergencia poblacional es producto de diversos factores: cambio climático, barreras naturales y actividad humana.
- ★ Se está realizando un esfuerzo importante para “conectar” subpoblaciones.

Estado salvaje versus cautividad:

- ★ Los esfuerzos en la conservación de los pandas en China, ha permitido pasar de los **1596** ejemplares en estado salvaje en 1999, a los **1864** en enero de 2018, según cifras de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN).
- ★ Los pandas gigantes en estado salvaje sólo se encuentran en algunas zonas montañosas de China.
- ★ Esta recuperación hizo que en 2016, dejaran de estar en la categoría de “**en peligro**” para ocupar la menos preocupante situación de “**vulnerables**” en la Lista Roja elaborada por la IUCN.
- ★ Parece ser que la tasa de fertilidad en estado **salvaje** es más alta que en **cautividad**.

Esperanza de vida:

- ★ En estado **salvaje**: aproximadamente hasta **poco más de veinte años**.
- ★ En **cautividad**: hasta poco **más de treinta años**.

Durante el año 2017 se han contabilizado 520 pandas gigantes en cautividad.

- ★ Nacieron 63 ejemplares (China, , Francia, Estados Unidos, Japón, España, Bélgica y Austria).
- ★ Sobrevivieron 58 ejemplares.



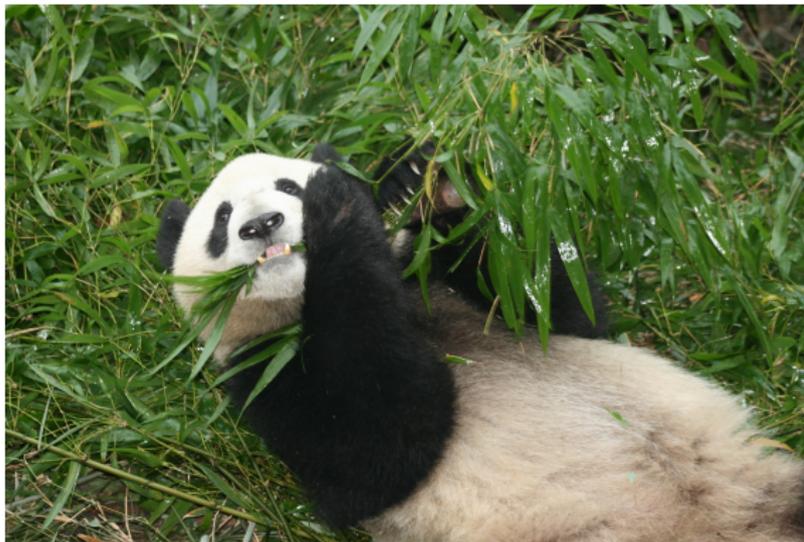
Genoma de los pandas gigantes (secuenciado en 2009)

- ★ Tienen unos 21.000 genes (poco más que un perro común).
- ★ Tiene todos los componentes genéticos necesarios para ser un animal carnívoro.
 - * Carece de los genes específicos para la digestión de la celulosa.
 - * El hecho de ser animales herbívoros se debe más bien a sus microorganismos intestinales.
- ★ Los animales herbívoros suelen tener los intestinos más largos para ayudar en la digestión del material fibroso, un rasgo que los panda no tienen.
- ★ Faltan en su genoma algunos de los genes necesarios para la completa digestión del bambú.
- ★ La clave de las inusuales restricciones dietéticas podrían radicar en la flora microbiana de su intestino pero ... los microbios de su intestino son también típicos de los animales carnívoros.
- ★ Los cinco componentes básicos del sabor son: dulce, salado, ácido, amargo y **umami** (algo parecido a "**sabroso**": está asociado al *gusto por la carne* y a los alimentos ricos en proteínas animales).
- ★ Carece de un tipo de papilas gustativas especializadas en detectar el sabor **umami**.
- ★ Parece ser que **hace miles de años** se produjo una **mutación** del gen responsable del sabor **umami**.
- ★ Las pandas hembras suelen estar en celo entre 2 y 3 semanas al año y ser fértiles entre 2 y 3 días al año.
- ★ No se han detectado pérdidas de funcionalidad en los genes responsables de la reproducción que justifiquen la **bajísima tasa de fertilidad**.

- ★ En su evolución, el panda gigante ha "fabricado" un sexto "dedo", un falso pulgar (hueso modificado para agarrar el bambú) que le ayuda a sostener, romper y comer el bambú.



- ★ Por ello, extraña que a lo largo de dos millones de años, su metabolismo no haya evolucionado de acuerdo a su dieta.
- ★ Los pandas no tienen un estómago diseñado para la dieta de bambú (bajo aporte energético), que supone un consumo muy bajo en nutrientes y un porcentaje alto de celulosa.
- ★ Todo lo anterior explica otro hecho: la enorme voracidad de los pandas.
 - Pasan hasta 14 horas diarias consumiendo entre 12 y 38 kgs de hojas y tallos de bambú.
 - Sólo digieren en torno al 17% de todo lo que ingieren, y el resto lo expulsan tal cual lo comieron.



- ★ Su lenta digestión es la razón por la que los osos panda conservan tanto su energía.
- ★ El gasto energético diario de los pandas gigantes es sólo el 38% de la totalidad de la energía que gasta un mamífero terrestre de similar masa corporal. Tienen un ritmo de vida muy parecido al de los osos perezosos.



Hace unos 6.000 años (durante el Holoceno), se redujo sustancialmente el número de hembras de la especie

- ★ Pérdida importante de la diversidad genética (clave para explicar la gran vulnerabilidad de los pandas).
- ★ Con ello, poca derivación génica, su capacidad de evolucionar y de responder a variables ambientales cambiantes, disminuye ostensiblemente.

CHENGDU RESEARCH OF GIANT PANDA BREEDING.

- ★ Principal núcleo de pandas en cautividad.
- ★ Programa de investigación centrado en la gestión de la derivación génica de los pandas gigantes.
- ★ Programa de reinserción de pandas en cautividad al estado salvaje.
- ★ Controla **todos** los pandas situados en cualquier zoológico del mundo.
- ★ **Todos los pandas del mundo** son propiedad de la R.P. China: **régimen de alquiler**.

GIANT PANDA BREEDING BASE: GPBB

Visitando el **GPBB** ...



Anuncio de bienvenida a los pandas nacidos durante el año 2013.



Pandas gigantes en el **Giant Panda Breeding Base (GPBB)**



Pandas gigantes en el Giant Panda Breeding Base (GPBB)

Censo de la Administración Forestal Estatal de China: la **población total** de pandas gigantes (salvaje + cautividad) pasó de **1596** individuos (en 2003) a **1864** (en 2014).

Se trata de estudiar, desde un punto de vista computacional, la evolución de la población de los PGs **en cautividad** en el **Giant Panda Breeding Base (GPBB)**.

- * La investigación sobre dinámica de poblaciones puede proporcionar herramientas interesantes para conseguir que la población del GPBB, sea **más saludable**.
 - * Encontrar una proporción adecuada de machos y hembras, por una parte, y de individuos según la edad, por otra.
 - * Potenciar el flujo genético para alcanzar una apropiada **diversidad génica**.
 - * Incrementar el porcentaje de PGs en edad reproductiva.

Analizar cuantitativamente la influencia de diversos factores (causas biológicas, ambientales y antrópicas) a la dinámica de la población del GPBB.

Un modelo computacional basado en sistemas PDP

Se va a diseñar un sistema PDP que modeliza la población de pandas gigantes en cautividad, en el GPBB (en la que **se incluyen** los PGs que están dispersos en zoológicos a lo largo de **todo el mundo**, que son propiedad de China).

- ★ Los procesos que se estudian son intrínsecamente **estocásticos**: variabilidad de los parámetros involucrados y numerosos factores que afectan a la población (salud, alimentación, mortalidad, reproducción, etc.)

El modelo que vamos a presentar dispone de unas ventajas innegables respecto de otras aproximaciones analíticas y/o continuas:

- ★ **Paralelismo distribuido** y **Modularidad**.

Se han usado datos completos de 10 años (2005-2014), facilitados por los expertos del GPBB.

Hacia finales de 2013 había 375 pandas gigantes en cautividad

Individuos de la población y comida

En el modelo, los PGs se dividirán en **seis** grupos, acordes con su edad (los criterios serán distintos según sean macho o hembra):

- ★ **Infancia.**
- ★ **Subadulto.**
- ★ **Adulto joven.**
- ★ **Adulto medio.**
- ★ **Anciano hasta 26 años (de 17 a 26 años).**
- ★ **Anciano a partir de 27 años (de 27 a 35 años).**

En el modelo, se consideran **tres** tipos de comida para los PGs:

- ★ **Brotos de bambú.**
- ★ **Bambú.**
- ★ **Otros alimentos** (manzanas, carne, leche, ...).

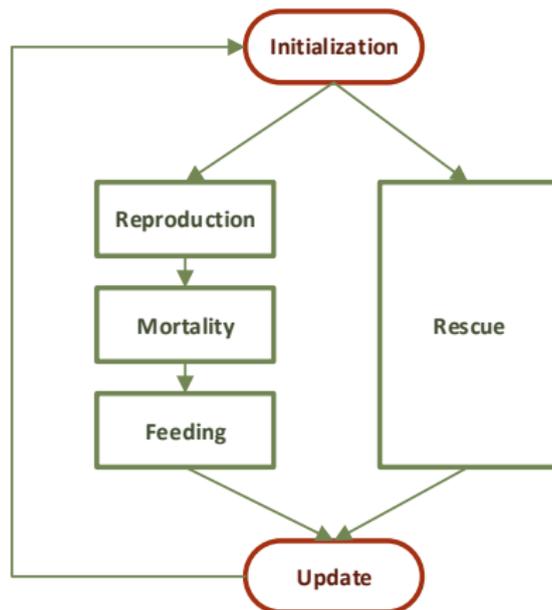
Módulos del diseño: RMF

Se modelizarán los siguientes procesos:

- ★ **Reproducción**, **Mortalidad**, **Alimentación** y **Rescate**.

Estos procesos se materializarán a través de sendos módulos:

- ★ **Reproducción**, **Mortalidad** y **Alimentación** se ejecutarán **secuencialmente**.
- ★ El módulo de **Rescate** se ejecutará en **paralelo** con los anteriores.



El modelo que se presenta ...

Un **sistema PDP** de grado (2, 1): Un entorno que contiene a un sistema P básico con 2 membranas.

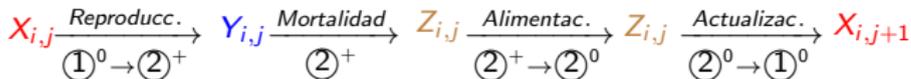
$$(G, \Gamma, \Sigma, \mathcal{R}_\Pi, \mathcal{R}_E, \{f_r : r \in \mathcal{R}_\Pi\}, M_1, M_2)$$

- * $G = (V, E)$ con $V = \{e_1\}$ y $E = \emptyset$
- * $\Sigma = \emptyset$ y $\mathcal{R}_E = \emptyset$.
- * $\Gamma = \{X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}, C_i, C_{i,j} \mid 1 \leq i \leq 2, 0 \leq j \leq k_{i,5}\} \cup \{F, N, A, C\}$
 - $X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}$ representan el mismo PG pero en diferentes "estados" (el índice i está asociado al género, macho= 1, hembra = 2, y j a la edad).
 - $C_i, C_{i,j}$ representan PGs rescatados, del género i con edad j .
 - Los objetos F, N, A, C son usados por razones técnicas.
 - ★ El objeto F se usa para suministrar suficiente comida para el nuevo ciclo.
 - ★ El objeto N se usa para gestionar a los recién nacidos.
 - ★ Los objetos A y C se usan para gestionar el proceso que se ocupa de los PGs rescatados.

$$\Pi = (\Gamma, \mu, \mathcal{M}_1, \mathcal{M}_2, \mathcal{R}_\Pi)$$

* Estructura de membranas: $\mu = [[]_2]_1$:

- ★ Membrana piel: Aquí están, al principio de cada ciclo, los PGs como objetos $X_{i,j}$, y aquí se ejecutan las reglas de **reproducción**.
- ★ Membrana interna: Tras esa ejecución, $X_{i,j}$ pasan a $Y_{i,j}$, y la polaridad de la membrana pasa a positiva. Entonces, se aplican las reglas de **mortalidad** produciendo objetos $Z_{i,j}$ (supervivientes) que por las reglas de **alimentación**, pasan a ser $W_{i,j}$ cambiando la polaridad a neutra. Finalmente, en el "balance" de fin de ciclo, los $W_{i,j}$ producen objetos $X_{i,j+1}$ en la membrana piel.

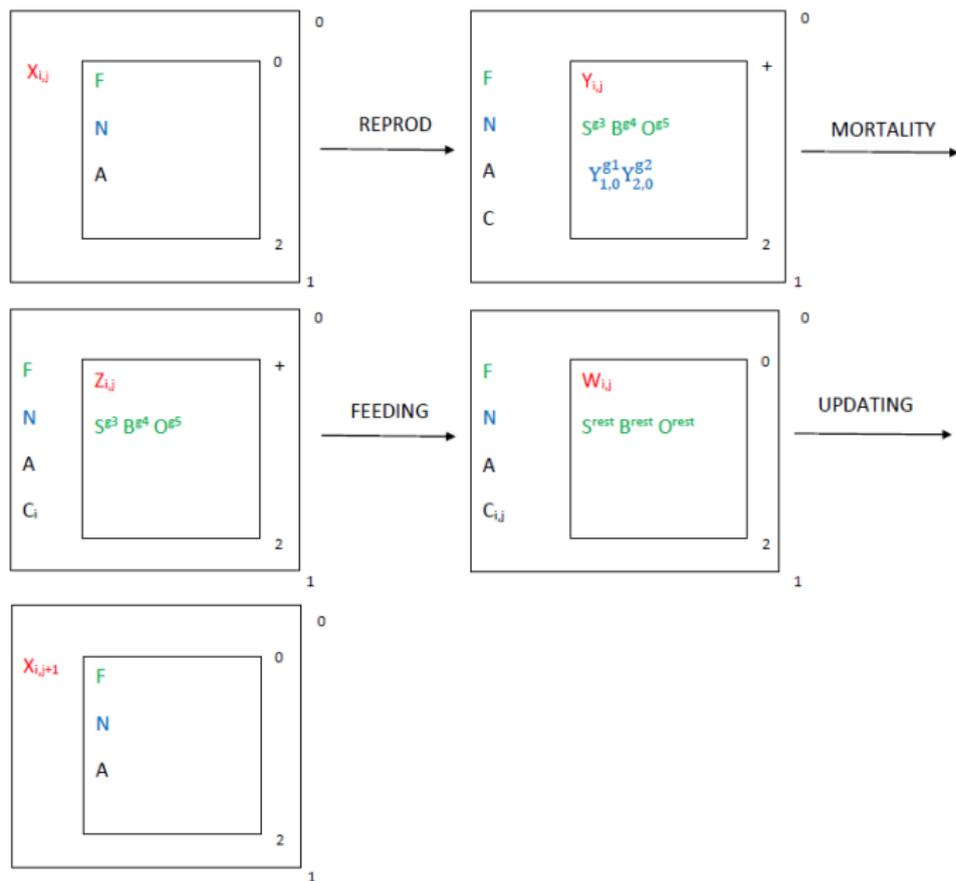


* Multiconjunto iniciales:

$$\mathcal{M}_1 = \{X_{i,j}^{q_{i,j}} : 1 \leq i \leq 2, 1 \leq j \leq k_{i,5}\}, \quad \mathcal{M}_2 = \{F, N, A\}.$$

- ★ $q_{i,j}$ representa el número de PGs de género i y edad j .

Evolución de los elementos del sistema en la simulación de un ciclo



Regla de Inicialización

Regula la generación de comida suficiente para la subsistencia durante el primer año del ciclo.

$$\star r_1 \equiv [F]_2^0 \longrightarrow F [S^{g_3} B^{g_4} O^{g_5}]_2^+$$

(g_3 : **brotos de bambú** anual producido en el GPBB).

(g_4 : **bambú** producido en el GPBB en 1 año).

(g_5 : **otra comida** producidos en el GPBB en 1 año).

Reglas de Reproducción

Regulan el proceso de “incorporación” de nuevos individuos al ecosistema del GPBB.

Recién nacidos:

$$\star r_2 \equiv [N]_2^0 \longrightarrow N [Y_{1,0}^{g_1} Y_{2,0}^{g_2}]_2^+ \quad \begin{array}{l} (g_1: \text{número descendientes machos por año}). \\ (g_2: \text{número descendientes hembras por año}). \end{array}$$

“Crecimiento”:

$$\star r_3 \equiv [X_{i,j}]_2^0 \longrightarrow [Y_{i,j}]_2^+; \quad 1 \leq i \leq 2 \wedge 1 \leq j \leq k_{i,5}. \quad (k_{i,5}: \text{esperanza de vida}).$$

Rescatados:

– Rescate de c individuos (p_{cc} : probabilidad de rescatar c individuos por año).

$$\star r_4 \equiv [A]_2^0 \xrightarrow{p_{cc}} A C^c []_2^+; \quad c_{min} \leq c \leq c_{max}$$

– Rescate de PGs de género i (pg_i : probabilidad de rescatar un PG de género i).

$$\star r_5 \equiv [C] \xrightarrow{pg_i} [C_i]_1^0; \quad 1 \leq i \leq 2$$

– Rescate de PGs de edad j (pg_j : probabilidad de rescatar un PG de edad j).

$$\star r_6 \equiv [C_i] \xrightarrow{pg_j} [C_{i,j+1+\lfloor \frac{j}{3} \rfloor}]_1^0; \quad 1 \leq i \leq 2 \wedge 0 \leq j < c_{maxage}$$

Reglas de Mortalidad (I)

Regulan el proceso de mortalidad y supervivencia en el GPBB.

PGs que sobreviven durante la INFANCIA:

$$\star r_7 \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{1-k_{i,6}} Z_{i,j}]_2^+ ; \begin{cases} 1 \leq i \leq 2 \\ 0 \leq j < k_{i,1} \end{cases} \quad (k_{i,6}: \text{ tasa mortalidad infancia}).$$

($k_{i,1}$: se llega a subadulto).

PGs que mueren durante la INFANCIA:

$$\star r_8 \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{k_{i,6}} \lambda]_2^+ ; \begin{cases} 1 \leq i \leq 2 \\ 0 \leq j < k_{i,1} \end{cases}$$

PGs que sobreviven siendo SUBADULTOS :

$$\star r_9 \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{1-k_{i,7}} Z_{i,j}]_2^+ ; \begin{cases} 1 \leq i \leq 2 \\ k_{i,1} \leq j < k_{i,2} \end{cases} \quad (k_{i,7}: \text{ tasa mortalidad subadultos}).$$

($k_{i,2}$: se llega a adulto joven).

PGs que mueren siendo SUBADULTOS:

$$\star r_{10} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{k_{i,7}} \lambda]_2^+ ; \begin{cases} 1 \leq i \leq 2 \\ k_{i,1} \leq j < k_{i,2} \end{cases}$$

Reglas de Mortalidad (II)

PGs que sobreviven siendo ADULTOS JÓVENES:

$$\star r_{11} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{1-k_{i,8}} Z_{i,j}]_2^+ ; \left\{ \begin{array}{l} 1 \leq i \leq 2 \\ k_{i,2} \leq j < k_{i,3} \end{array} \right.$$

($k_{i,8}$: tasa mortalidad adultos jóvenes).
($k_{i,2}$: se llega a adulto joven).
($k_{i,3}$: se llega a adulto medio).

PGs que mueren siendo ADULTOS JÓVENES:

$$\star r_{12} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{k_{i,8}} \lambda]_2^+ ; \left\{ \begin{array}{l} 1 \leq i \leq 2 \\ k_{i,2} \leq j < k_{i,3} \end{array} \right.$$

PGs que sobreviven siendo ADULTOS MEDIOS:

$$\star r_{13} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{1-k_{i,9}} Z_{i,j}]_2^+ ; \left\{ \begin{array}{l} 1 \leq i \leq 2 \\ k_{i,3} \leq j < k_{i,4,1} \end{array} \right.$$

($k_{i,9}$: tasa mortalidad adultos medios).
($k_{i,4,1}$: se llega a anciano hasta 26).

PGs que mueren siendo ADULTOS MEDIOS:

$$\star r_{14} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{k_{i,9}} \lambda]_2^+ ; \left\{ \begin{array}{l} 1 \leq i \leq 2 \\ k_{i,3} \leq j < k_{i,4,1} \end{array} \right.$$

Reglas de Mortalidad (III)

PGs que sobreviven siendo ANCIANOS HASTA 26 años:

$$\star r_{15} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{1-k_{i,10}} Z_{i,j}]_2^+ ; \begin{cases} 1 \leq i \leq 2 \\ k_{i,4,1} \leq j < k_{i,4,2} \end{cases} \begin{array}{l} (k_{i,10}: \text{tasa mortalidad ancianos} \leq 26). \\ (k_{i,4,1} = 17: \text{se llega a anciano hasta } 26). \\ (k_{i,4,2} = 27: \text{se llega a anciano de } 27). \end{array}$$

PGs que mueren siendo ANCIANOS HASTA 26 años:

$$\star r_{16} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{k_{i,10}} \lambda]_2^+ ; \begin{cases} 1 \leq i \leq 2 \\ k_{i,4,1} \leq j < k_{i,4,2} \end{cases}$$

PGs que sobreviven siendo ANCIANOS A PARTIR DE 27 años:

$$\star r_{17} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{1-k_{i,11}} Z_{i,j}]_2^+ ; \begin{cases} 1 \leq i \leq 2 \\ k_{i,4,2} \leq j < k_{i,5} \end{cases} \begin{array}{l} (k_{i,11}: \text{tasa mortalidad ancianos} \geq 27). \\ (k_{i,4,2} = 27: \text{se llega a anciano de } 27). \\ (k_{i,5}: \text{esperanza de vida}). \end{array}$$

PGs que mueren siendo ANCIANOS A PARTIR DE 27 años:

$$\star r_{18} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{k_{i,11}} \lambda]_2^+ ; \begin{cases} 1 \leq i \leq 2 \\ k_{i,4,2} \leq j < k_{i,5} \end{cases}$$

PGs que alcanzan la máxima esperanza de vida:

$$\star r_{19} \equiv [Y_{i,k_{i,5}} \longrightarrow \lambda]_2^+ ; 1 \leq i \leq 2 \quad (k_{i,5}: \text{esperanza de vida}).$$

Reglas de Alimentación (I)

Regulan la alimentación de los individuos en el GPBB.

Alimentación de los PGs durante su INFANCIA:

$$\star r_{20} \equiv [Z_{i,j} S^{f_{i,1}} B^{f_{i,2}} O^{f_{i,3}}]_2^+ \longrightarrow [W_{i,j}]_2^0 ; \begin{cases} 1 \leq i \leq 2 \\ 0 \leq j < k_{i,1} \end{cases}$$

($f_{i,1}$: cantidad de **brotes de bambú** que, cada año, necesita un PG durante su infancia).

($f_{i,2}$: cantidad de **bambú** que, cada año, necesita un PG durante su infancia).

($f_{i,3}$: cantidad de **otros tipos de comida** que, cada año, necesita un PG durante su infancia).

($k_{i,1}$: edad en la que un PG llega a ser subadulto).

Alimentación de los PGs siendo SUBADULTOS:

$$\star r_{21} \equiv [Z_{i,j} S^{f_{i,4}} B^{f_{i,5}} O^{f_{i,6}}]_2^+ \longrightarrow [W_{i,j}]_2^0, \text{ for } \begin{cases} 1 \leq i \leq 2 \\ k_{i,1} \leq j < k_{i,2} \end{cases}$$

($f_{i,4}$: cantidad de **brotes de bambú** que, cada año, necesita un PG siendo subadulto).

($f_{i,5}$: cantidad de **bambú** que, cada año, necesita un PG siendo subadulto).

($f_{i,6}$: cantidad de **otros tipos de comida** que, cada año, necesita un PG siendo subadulto).

($k_{i,2}$: edad en la que un PG llega a ser adulto joven).

Reglas de Alimentación (II)

Regulan la alimentación de los individuos en el GPBB.

Alimentación de los PGs siendo ADULTOS o ANCIANOS:

$$\star r_{22} \equiv [Z_{i,j} S^{f_{i,7}} B^{f_{i,8}} O^{f_{i,9}}]_2^+ \longrightarrow [W_{i,j}]_2^0, \text{ for } \begin{cases} 1 \leq i \leq 2 \\ k_{i,2} \leq j < k_{i,5} \end{cases}$$

($f_{i,7}$: cantidad de **brotes de bambú** que, cada año, necesita un PG siendo adulto o anciano).

($f_{i,8}$: cantidad de **bambú** que, cada año, necesita un PG siendo adulto o anciano).

($f_{i,9}$: cantidad de **otros tipos de comida** que, cada año, necesita un PG siendo adulto o anciano).

($k_{i,2}$: edad en la que un PG llega a ser adulto joven).

($k_{i,5}$: esperanza de vida de un PG).

Nota: Si tras aplicar las reglas de alimentación, queda algún objeto $Z_{i,j}$ en la membrana interna, entonces dicho objeto representaría un panda gigante que **no ha comido lo suficiente** y, por tanto, debería ser **eliminado** del ecosistema (ver regla r_{28}).

Reglas de Actualización

Regulan el balance de fin de ciclo, a fin de comenzar uno nuevo.

Eliminación de la comida sobrante:

- ★ $r_{23} \equiv [S \longrightarrow \lambda]_2^0$
- ★ $r_{24} \equiv [B \longrightarrow \lambda]_2^0$
- ★ $r_{25} \equiv [O \longrightarrow \lambda]_2^0$

Preparación para el comienzo de un nuevo ciclo:

- ★ $r_{26} \equiv [W_{i,j}]_2^0 \longrightarrow X_{i,j+1} []_2^0 ; \left\{ \begin{array}{l} 1 \leq i \leq 2 \\ 0 \leq j < k_{i,5} \end{array} \right. \quad (k_{i,5}: \text{esperanza de vida de un PG}).$
- ★ $r_{27} \equiv C_{i,j} []_2^0 \longrightarrow X_{i,j+1} []_2^0 ; \left\{ \begin{array}{l} 1 \leq i \leq 2 \\ 0 \leq j < k_{i,5} \end{array} \right. \quad \text{Incorporación de los rescatados al GPBB.}$
- ★ $r_{28} \equiv [Z_{i,j} \longrightarrow \lambda]_2^0 ; \left\{ \begin{array}{l} 1 \leq i \leq 2 \\ 0 \leq j < k_{i,5} \end{array} \right. \quad (\text{Eliminación de los PGs que no han comido})$
- ★ $r_{29} \equiv F []_2^0 \longrightarrow [F]_2^0$ (Ubicar el objeto F en la membrana interna y comenzar el nuevo ciclo)
- ★ $r_{30} \equiv N []_2^0 \longrightarrow [N]_2^0$ (Ubicar el objeto N en la membrana interna y comenzar el nuevo ciclo)
- ★ $r_{31} \equiv A []_2^0 \longrightarrow [A]_2^0$: (Ubicar el objeto A en la membrana interna y comenzar el nuevo ciclo)

Parámetros del sistema (I)

Pandas gigantes: machos ($i = 1$) y hembras ($i = 2$):

- ★ $k_{i,1}$: edad a la que se llega a ser **subadulto**.
- ★ $k_{i,2}$: edad a la que se llega a ser **adulto joven**.
- ★ $k_{i,3}$: edad a la que se llega a ser **adulto medio**.
- ★ $k_{i,4,1}$: edad a la que se llega a ser **anciano hasta los 26** (desde 17 hasta los 26 años, $k_{i,4,1} = 17$).
- ★ $k_{i,4,2}$: edad a la que se llega a ser **anciano a partir de los 27** (desde 27 hasta los 35 años, $k_{i,4,2} = 27$).
- ★ $k_{i,5}$: máxima **esperanza de vida** (bajo las condiciones de alimentación en el ecosistema).
- ★ $k_{i,6}$: tasa de **mortalidad** del PG durante su **infancia**.
- ★ $k_{i,7}$: tasa de **mortalidad** del PG siendo **subadulto**.
- ★ $k_{i,8}$: tasa de **mortalidad** del PG siendo un **adulto joven**.
- ★ $k_{i,9}$: tasa de **mortalidad** del PG siendo un **adulto medio**.
- ★ $k_{i,10}$: tasa de **mortalidad** del PG siendo un **anciano (de 17 a 26 años)**.
- ★ $k_{i,11}$: tasa de **mortalidad** del PG siendo un **anciano (de 27 a 35 años)**.
- ★ g_1 : número de **descendientes machos** por año.
- ★ g_2 : número de **descendientes hembras** por año.
- ★ g_3 : cantidad de **brotos de bambú** (en Kgs) suministrada en el GPBB durante un año.
- ★ g_4 : cantidad de **bambú** (en Kgs) suministrada en el GPBB durante un año.
- ★ g_5 : cantidad de **otra comida** (en Kgs) suministrada en el GPBB durante un año.

Parámetros del sistema (II)

Pandas gigantes: machos ($i = 1$) y hembras ($i = 2$):

- ★ $f_{i,1}$: cantidad de **brotes de bambú** (en Kgs) necesaria por año para alimentar a un PG durante su **infancia**.
- ★ $f_{i,2}$: cantidad de **bambú** (en Kgs) necesaria por año para alimentar a un PG durante su **infancia**.
- ★ $f_{i,3}$: cantidad de **otras comidas** (en Kgs) necesaria por año para alimentar a un PG durante su **infancia**.
- ★ $f_{i,4}$: cantidad de **brotes de bambú** (en Kgs) necesaria por año para alimentar a un PG siendo **subadulto**.
- ★ $f_{i,5}$: cantidad de **bambú** (en Kgs) necesaria por año para alimentar a un PG siendo **subadulto**.
- ★ $f_{i,6}$: cantidad de **otras comidas** (en Kgs) necesaria por año para alimentar a un PG siendo **subadulto**.
- ★ $f_{i,7}$: cantidad de **brotes de bambú** (en Kgs) necesaria por año para alimentar a un PG siendo **anciano** total.
- ★ $f_{i,8}$: cantidad de **bambú** (en Kgs) necesaria por año para alimentar a un PG siendo **anciano** "total".
- ★ $f_{i,9}$: cantidad de **otras comidas** (en Kgs) necesaria por año para alimentar a un PG siendo **anciano** "total".
- ★ cm_{in} : mínimo número de PGs **capturados/rescatados** durante un año.
- ★ cm_{ax} : máximo número de PGs **capturados/rescatados** durante un año.
- ★ cm_{axage} : máxima de edad de un PG **capturado/rescatado**.
- ★ p_{cC} : probabilidad de **capturar/rescatar** c individuos.
- ★ p_{g_i} : probabilidad de que un PG **capturado/rescatado** sea del género i .
- ★ p_{a_j} : probabilidad de que un PG **capturado/rescatado** tenga edad j .

Robustez del modelo diseñado

El diseño del modelo se organizó en una estructura de módulos:

- * Tres de ellos, **R**, **M** y **F** ejecutados secuencialmente.
- * Mientras que el cuarto módulo, **RESCATE**, se ejecuta en paralelo con los anteriores.

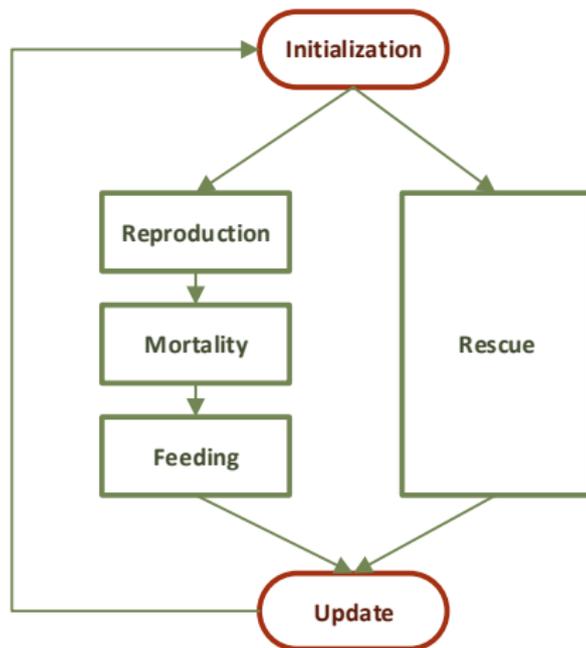
En ese contexto, se ha de probar que los resultados obtenidos son similares cuando se altera el orden en los módulos a ejecutar secuencialmente.

- * **RFM**; **MFR**; **MRF**; **FMR** y **FRM**;

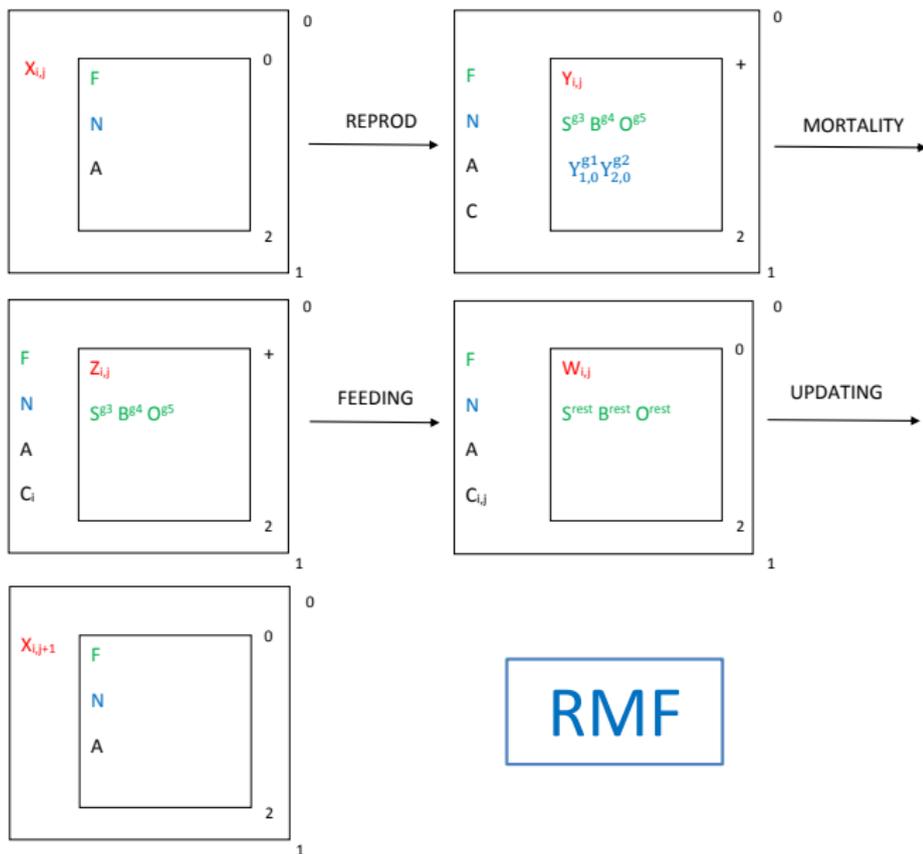
No obstante, hay que tener presente un hecho muy relevante, debido a la alta tasa de mortalidad de PGs recién nacidos y al “lugar” donde se procede a la alimentación.

- * En el caso en que el módulo de **mortalidad** se ejecute **antes** que el de **reproducción**, los recién nacidos tendrán de edad “-1” a fin de que en el próximo ciclo pase por el módulo de mortalidad como recién nacidos (es decir, con **0 años**).
- * En el caso en que el módulo de **alimentación** se ejecute **en primer lugar**, antes de proceder a la alimentación habrá que “transportar” a los PGs desde la membrana piel (neutra) a la membrana interna (positiva).

Robustez: RMF



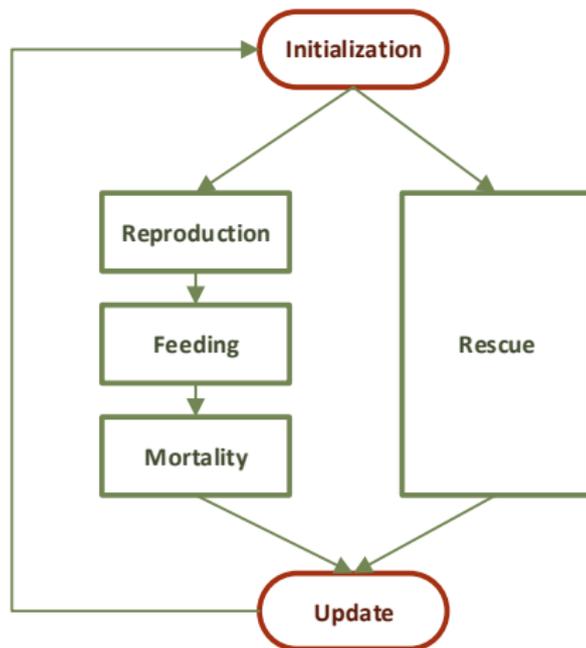
Robustez: RMF



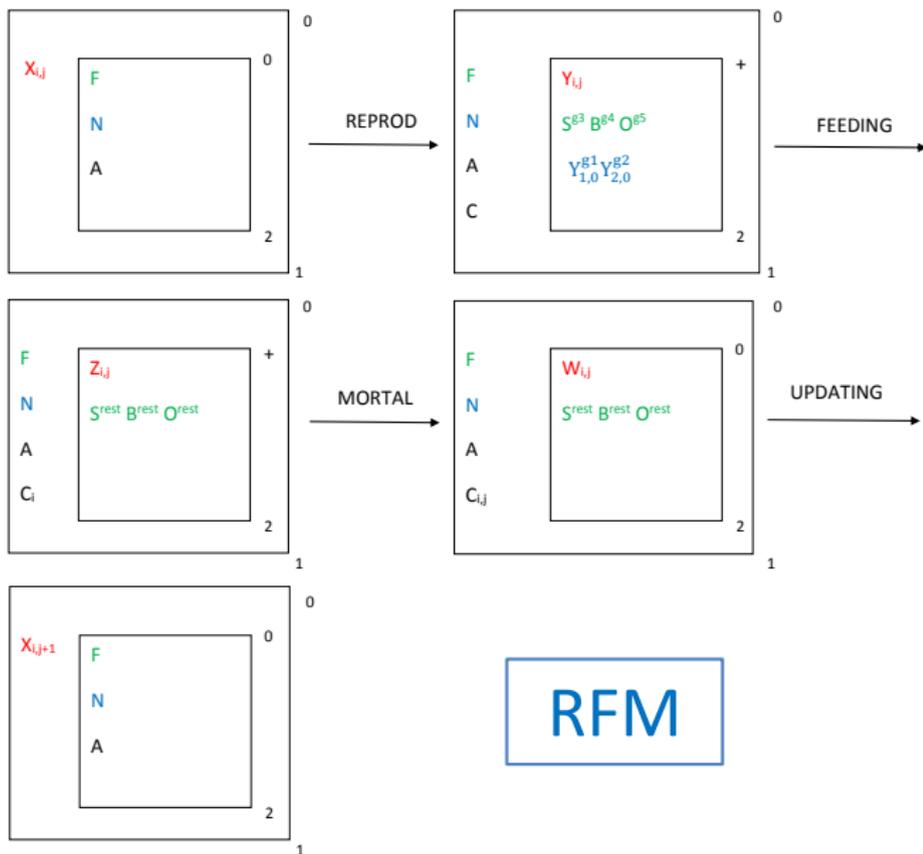
Robustez: RMF

			RMF					
MALES			FEMALES			TOTALS		
Simulation	Real Data	Dev.	Simulation	Real Data	Dev.	Simulation	Real Data	Dev.
27	30	-10,00%	35	34	2,94%	62	64	-3,13%
32	31	3,23%	41	40	2,50%	73	71	2,82%
38	42	-9,52%	46	45	2,22%	84	87	-3,45%
43	42	2,38%	52	49	6,12%	95	91	4,40%
48	50	-4,00%	57	52	9,62%	105	102	2,94%
53	52	1,92%	63	62	1,61%	116	114	1,75%
58	55	5,45%	68	65	4,62%	126	120	5,00%
63	64	-1,56%	73	74	-1,35%	136	138	-1,45%
68	68	0,00%	78	78	0,00%	146	146	0,00%
430	434	0,92%	513	499	2,81%	943	933	1,07%

Robustez: RFM



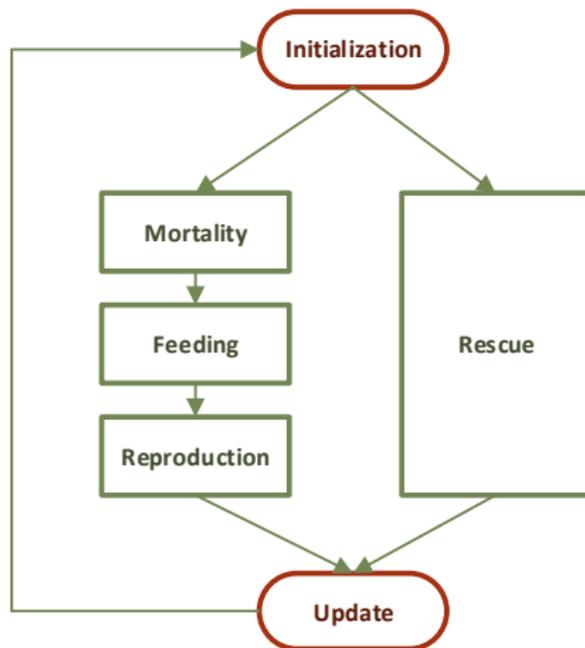
Robustez: RFM



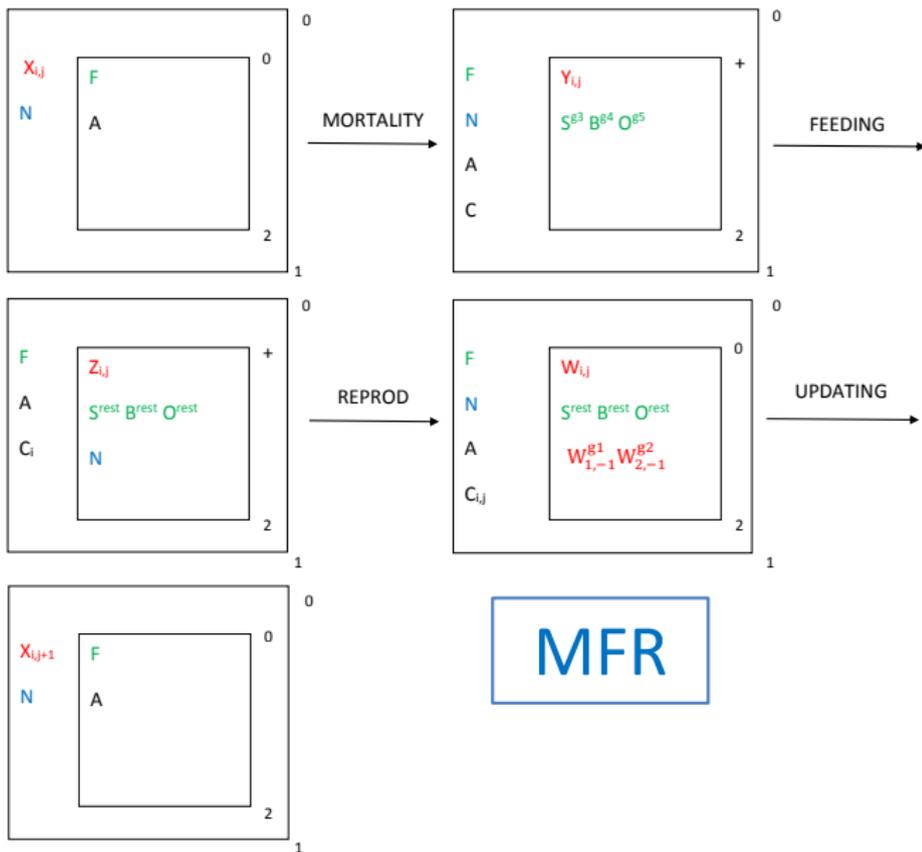
Robustez: RFM

			RFM					
MALES			FEMALES			TOTALS		
Simulation	Real Data	Dev.	Simulation	Real Data	Dev.	Simulation	Real Data	Dev.
27	30	-10,00%	35	34	2,94%	62	64	-3,13%
32	31	3,23%	41	40	2,50%	73	71	2,82%
38	42	-9,52%	46	45	2,22%	84	87	-3,45%
43	42	2,38%	52	49	6,12%	95	91	4,40%
48	50	-4,00%	57	52	9,62%	105	102	2,94%
53	52	1,92%	63	62	1,61%	116	114	1,75%
58	55	5,45%	68	65	4,62%	126	120	5,00%
63	64	-1,56%	73	74	-1,35%	136	138	-1,45%
68	68	0,00%	78	78	0,00%	146	146	0,00%
430	434	0,92%	513	499	2,81%	943	933	1,07%

Robustez: MFR



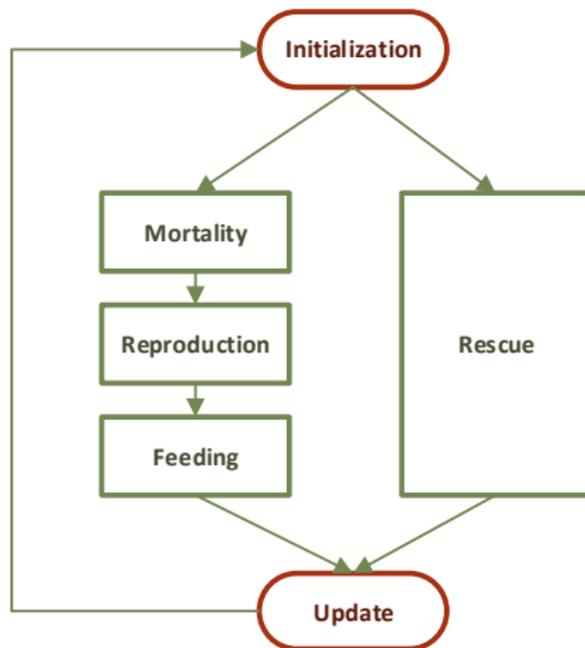
Robustez: MFR



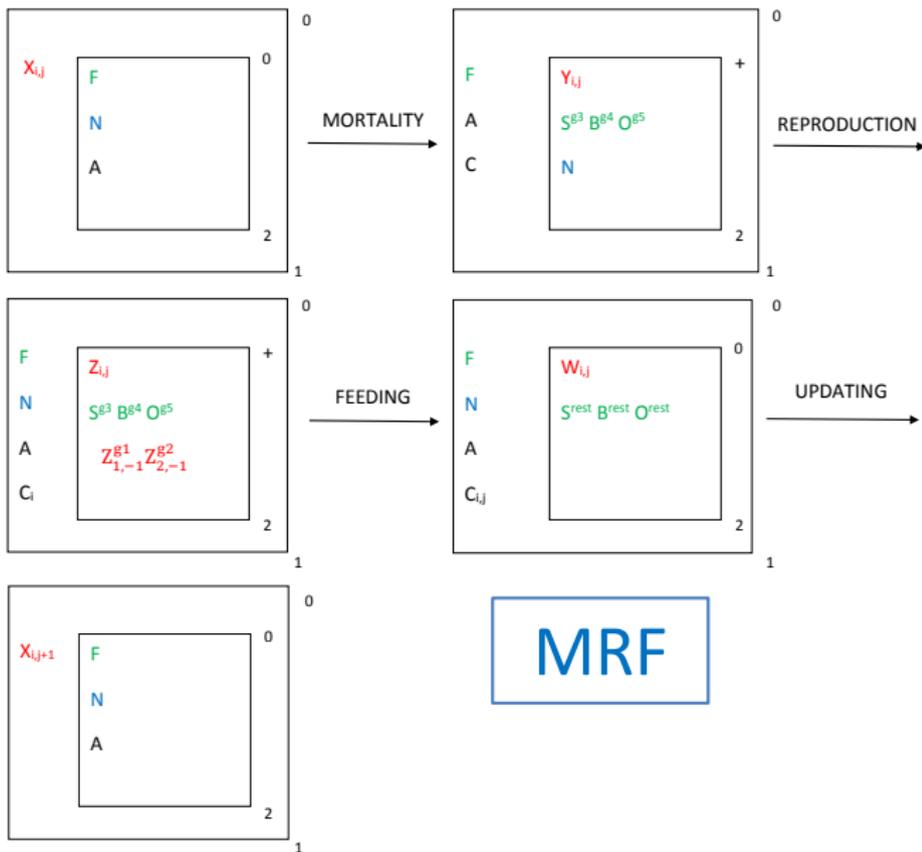
Robustez: MFR

			MFR					
MALES			FEMALES			TOTALS		
Simulation	Real Data	Dev.	Simulation	Real Data	Dev.	Simulation	Real Data	Dev.
27	30	-10,00%	35	34	2,94%	62	64	-3,13%
32	31	3,23%	41	40	2,50%	73	71	2,82%
38	42	-9,52%	46	45	2,22%	84	87	-3,45%
43	42	2,38%	52	49	6,12%	95	91	4,40%
48	50	-4,00%	57	52	9,62%	105	102	2,94%
53	52	1,92%	63	62	1,61%	116	114	1,75%
58	55	5,45%	68	65	4,62%	126	120	5,00%
63	64	-1,56%	73	74	-1,35%	136	138	-1,45%
68	68	0,00%	78	78	0,00%	146	146	0,00%
430	434	0,92%	513	499	2,81%	943	933	1,07%

Robustez: MRF



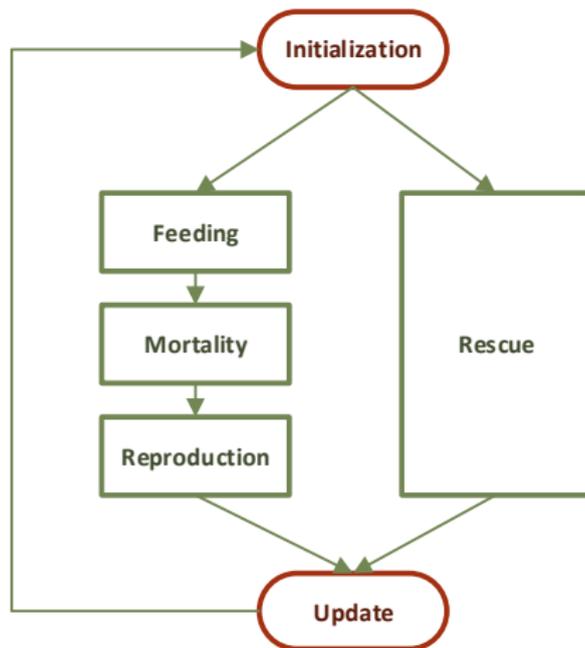
Robustez: MRF



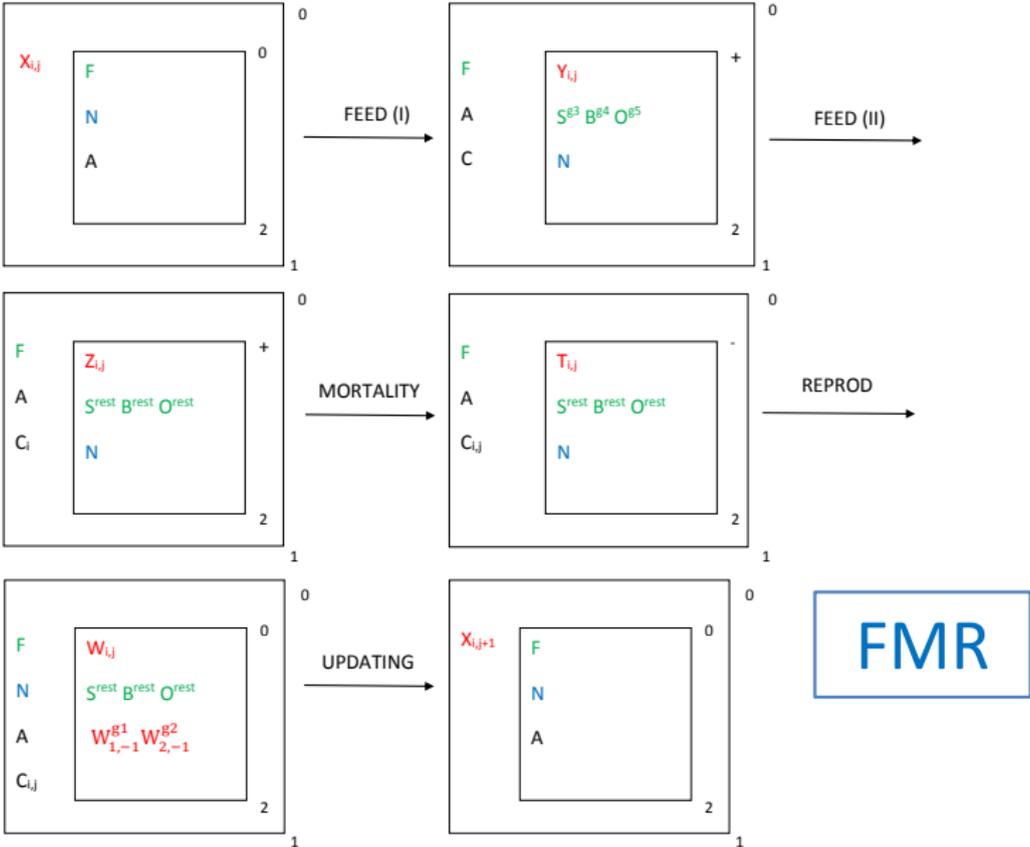
Robustez: MRF

			MRF					
MALES			FEMALES			TOTALS		
Simulation	Real Data	Dev.	Simulation	Real Data	Dev.	Simulation	Real Data	Dev.
27	30	-10,00%	35	34	2,94%	62	64	-3,13%
32	31	3,23%	41	40	2,50%	73	71	2,82%
38	42	-9,52%	46	45	2,22%	84	87	-3,45%
43	42	2,38%	52	49	6,12%	95	91	4,40%
48	50	-4,00%	57	52	9,62%	105	102	2,94%
53	52	1,92%	63	62	1,61%	116	114	1,75%
58	55	5,45%	68	65	4,62%	126	120	5,00%
63	64	-1,56%	73	74	-1,35%	136	138	-1,45%
68	68	0,00%	78	78	0,00%	146	146	0,00%
430	434	0,92%	513	499	2,81%	943	933	1,07%

Robustez: FMR



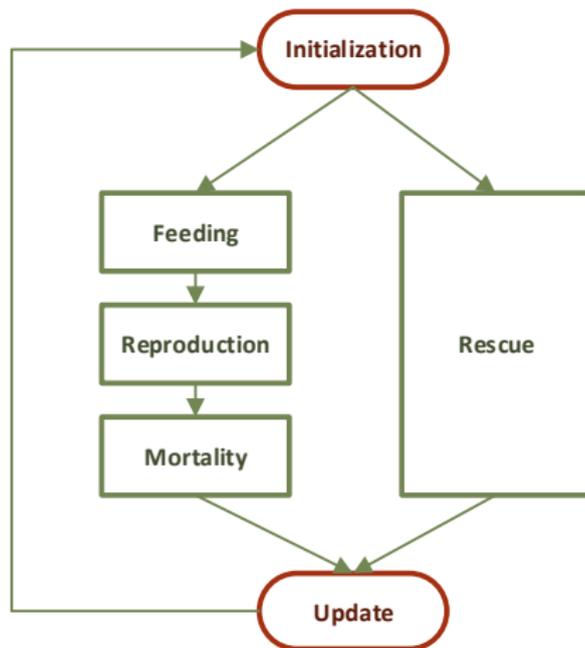
Robustez: FMR



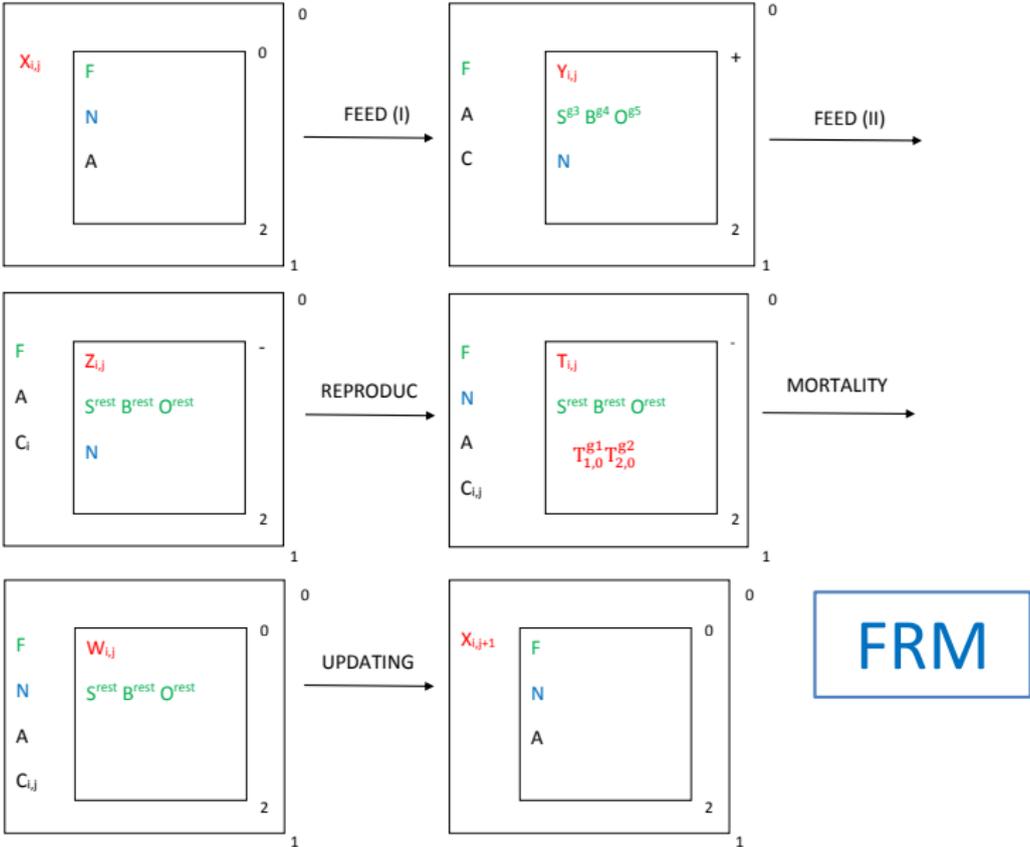
Robustez: FMR

			FMR					
MALES			FEMALES			TOTALS		
Simulation	Real Data	Dev.	Simulation	Real Data	Dev.	Simulation	Real Data	Dev.
27	30	-10,00%	35	34	2,94%	62	64	-3,13%
32	31	3,23%	41	40	2,50%	73	71	2,82%
38	42	-9,52%	46	45	2,22%	84	87	-3,45%
43	42	2,38%	52	49	6,12%	95	91	4,40%
48	50	-4,00%	57	52	9,62%	105	102	2,94%
53	52	1,92%	63	62	1,61%	116	114	1,75%
58	55	5,45%	68	65	4,62%	126	120	5,00%
63	64	-1,56%	73	74	-1,35%	136	138	-1,45%
68	68	0,00%	78	78	0,00%	146	146	0,00%
430	434	0,92%	513	499	2,81%	943	933	1,07%

Robustez: FRM



Robustez: FRM



Robustez: FRM

			FRM					
MALES			FEMALES			TOTALS		
Simulation	Real Data	Dev.	Simulation	Real Data	Dev.	Simulation	Real Data	Dev.
27	30	-10,00%	35	34	2,94%	62	64	-3,13%
32	31	3,23%	41	40	2,50%	73	71	2,82%
38	42	-9,52%	46	45	2,22%	84	87	-3,45%
43	42	2,38%	52	49	6,12%	95	91	4,40%
48	50	-4,00%	57	52	9,62%	105	102	2,94%
53	52	1,92%	63	62	1,61%	116	114	1,75%
58	55	5,45%	68	65	4,62%	126	120	5,00%
63	64	-1,56%	73	74	-1,35%	136	138	-1,45%
68	68	0,00%	78	78	0,00%	146	146	0,00%
430	434	0,92%	513	499	2,81%	943	933	1,07%

Validación experimental del modelo RMF

Los datos de esta figura corresponden al periodo 2006-2014, siendo la entrada los datos de la población al final de 2005.

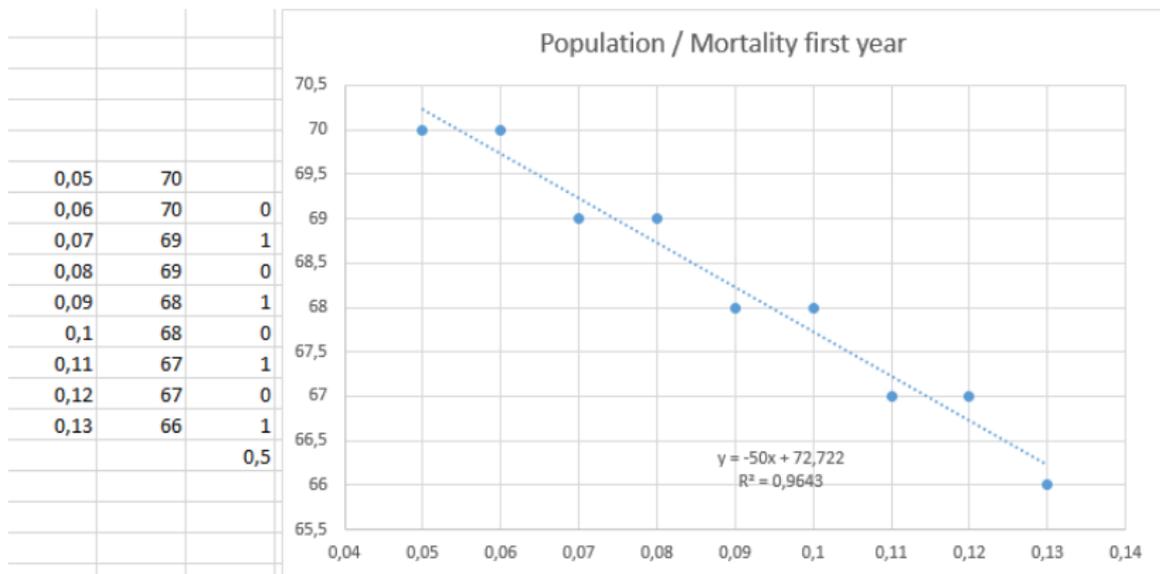
Los parámetros para el rescate fueron estimados (por promedios) de los datos reales de esos años.

El resto de parámetros se obtuvieron de los datos históricos proporcionados por el GPBB.

Natural deviation from average		Experimental validation								
<i>(Average - Annual) difference in births and deaths</i>		MALES			FEMALES			TOTALS		
MALES	FEMALES	Simulation	Real Data	Dev.	Simulation	Real Data	Dev.	Simulation	Real Data	Dev.
-10,37%	4,90%	27	30	-10,00%	35	34	2,94%	62	64	-3,13%
2,51%	3,33%	32	31	3,23%	41	40	2,50%	73	71	2,82%
-10,32%	4,44%	38	42	-9,52%	46	45	2,22%	84	87	-3,45%
1,32%	5,44%	43	42	2,38%	52	49	6,12%	95	91	4,40%
-5,11%	10,26%	48	50	-4,00%	57	52	9,62%	105	102	2,94%
0,64%	0,00%	53	52	1,92%	63	62	1,61%	116	114	1,75%
5,86%	4,10%	58	55	5,45%	68	65	4,62%	126	120	5,00%
0,17%	-2,25%	63	64	-1,56%	73	74	-1,35%	136	138	-1,45%
0,00%	0,00%	68	68	0,00%	78	78	0,00%	146	146	0,00%
		430	434	0,92%	513	499	2,81%	943	933	1,07%

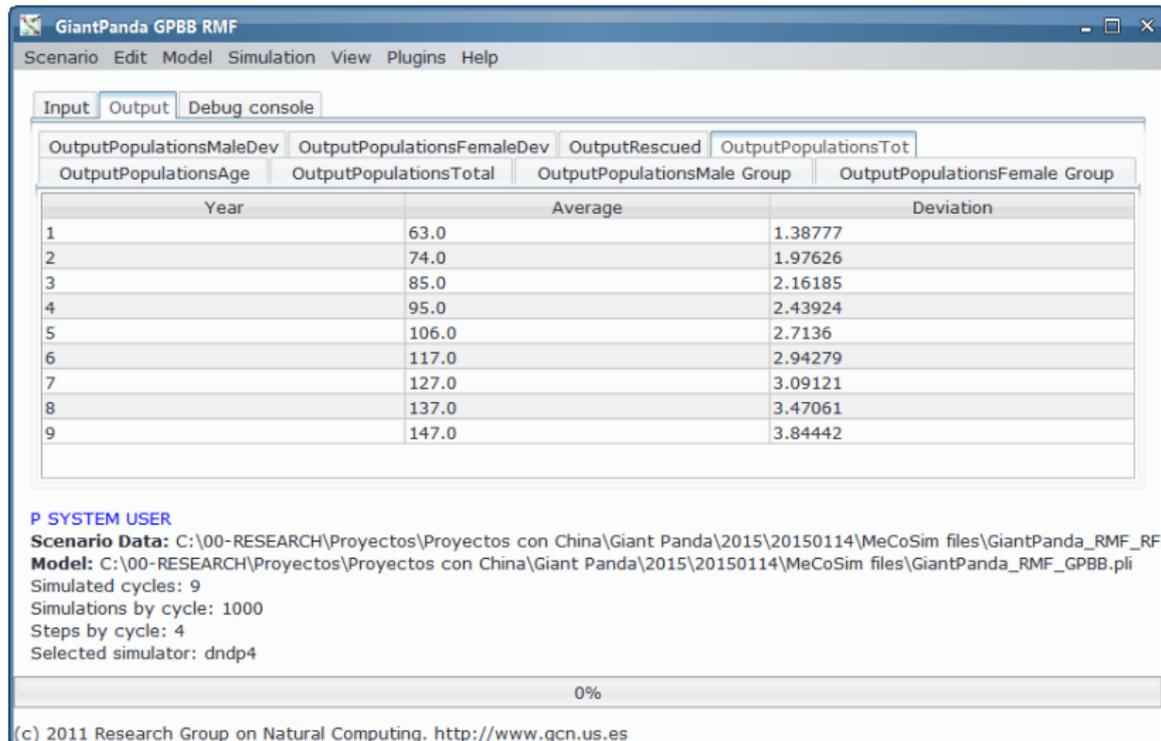
Validación experimental del modelo RMF

En la siguiente figura se muestra la **sensibilidad del modelo** a un determinado parámetro: la tasa de mortalidad para machos a edad temprana frente a la población total al final de la simulación.



Validación experimental del modelo RMF

Número total de individuos por año simulado.



The screenshot shows the 'GiantPanda GPBB RMF' application window. The 'Output' tab is selected, displaying a table with columns for 'Year', 'Average', and 'Deviation'. The data shows an increasing trend in both average and deviation over the 9 simulated years.

Year	Average	Deviation
1	63.0	1.38777
2	74.0	1.97626
3	85.0	2.16185
4	95.0	2.43924
5	106.0	2.7136
6	117.0	2.94279
7	127.0	3.09121
8	137.0	3.47061
9	147.0	3.84442

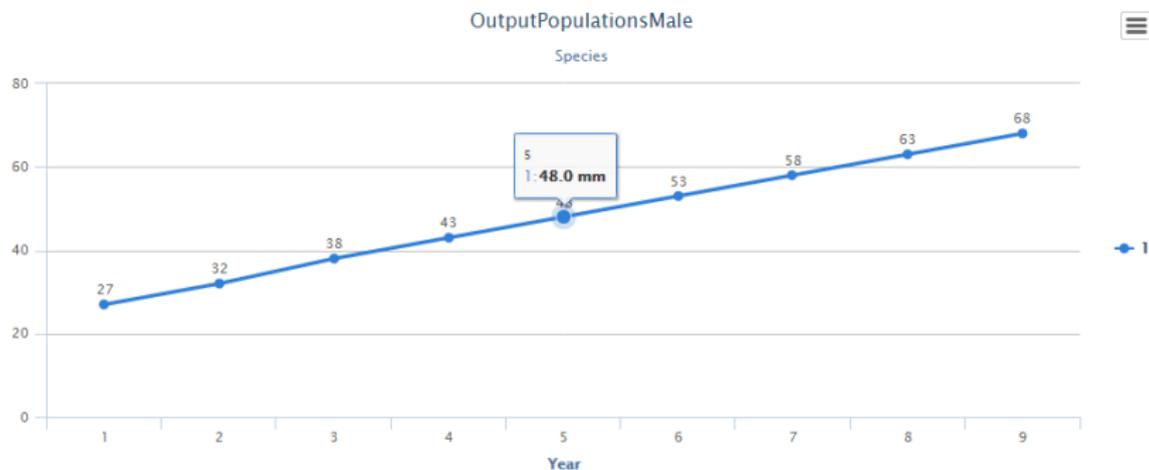
P SYSTEM USER
Scenario Data: C:\00-RESEARCH\Proyectos\Proyectos con China\Giant Panda\2015\20150114\MeCoSim files\GiantPanda_RMF_RF
Model: C:\00-RESEARCH\Proyectos\Proyectos con China\Giant Panda\2015\20150114\MeCoSim files\GiantPanda_RMF_GPBB.pli
Simulated cycles: 9
Simulations by cycle: 1000
Steps by cycle: 4
Selected simulator: dndp4

0%

(c) 2011 Research Group on Natural Computing. <http://www.gcn.us.es>

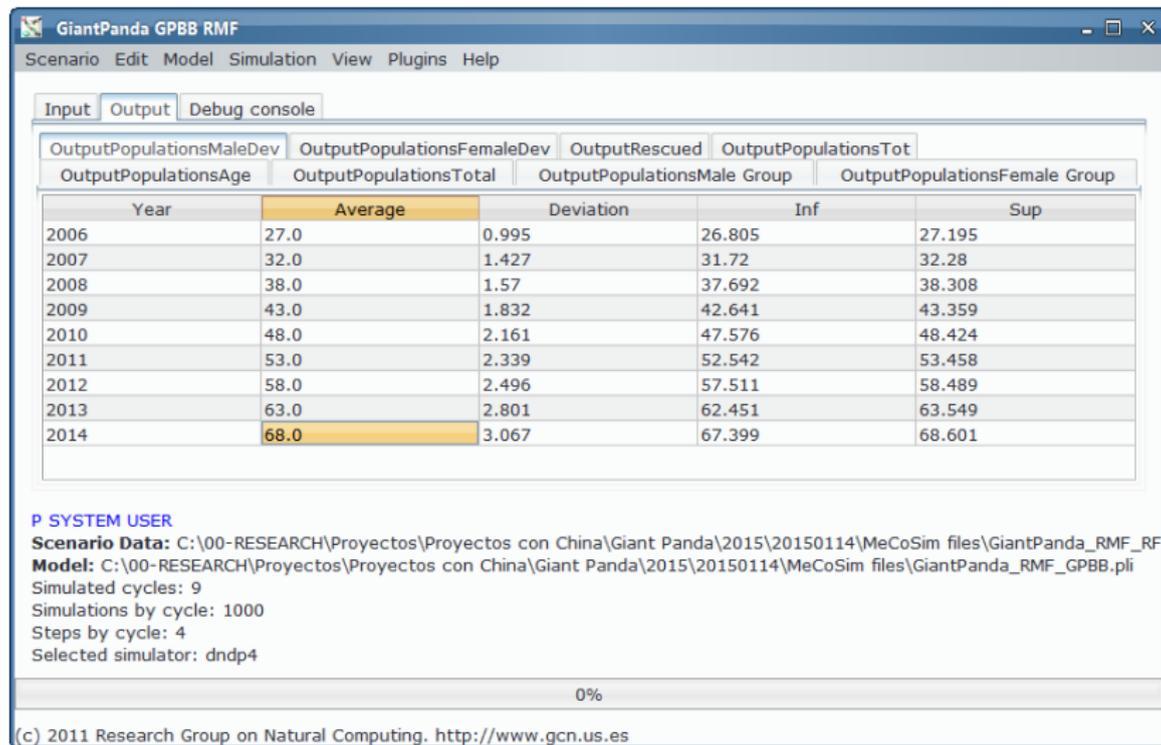
Validación experimental del modelo RMF

Número total de individuos **machos** por año simulado.



Validación experimental del modelo RMF

Número total de individuos **machos** por año simulado (incluyendo promedios, desviación e intervalo de confianza del 95%).



The screenshot shows the 'GiantPanda GPBB RMF' application window. The 'Output' tab is selected, displaying a table with columns for Year, Average, Deviation, Inf, and Sup. The data for the years 2006 to 2014 is as follows:

Year	Average	Deviation	Inf	Sup
2006	27.0	0.995	26.805	27.195
2007	32.0	1.427	31.72	32.28
2008	38.0	1.57	37.692	38.308
2009	43.0	1.832	42.641	43.359
2010	48.0	2.161	47.576	48.424
2011	53.0	2.339	52.542	53.458
2012	58.0	2.496	57.511	58.489
2013	63.0	2.801	62.451	63.549
2014	68.0	3.067	67.399	68.601

Below the table, the 'P SYSTEM USER' section provides simulation details:

Scenario Data: C:\00-RESEARCH\Proyectos\Proyectos con China\Giant Panda\2015\20150114\MeCoSim files\GiantPanda_RMF_RF
Model: C:\00-RESEARCH\Proyectos\Proyectos con China\Giant Panda\2015\20150114\MeCoSim files\GiantPanda_RMF_GPBB.pli
Simulated cycles: 9
Simulations by cycle: 1000
Steps by cycle: 4
Selected simulator: dndp4

At the bottom of the window, a progress bar shows 0% completion. The footer text reads: (c) 2011 Research Group on Natural Computing. <http://www.gcn.us.es>

Herramienta para la gestión del GPBB

Se trata de proporcionar información útil para el proceso de toma de decisiones de los gestores del GPBB.

Se le proporcionará una herramienta software que permita la simulación de escenarios de interés y el análisis de los resultados esperados del modelo.

A los gestores se les hizo llegar un entorno visual amigable.

