

SISTEMAS DE CRUZAMIENTO EN EL CONEJO DE CARNE.
ASPECTOS GENETICOS Y DE MANEJO.

J.L. Campo

Dpto. Genética Cuantitativa y Mejora Animal.

I.N.I.A. Apartado 8111. 28080 Madrid.

Resumen

Se analizan los aspectos genéticos y de manejo de varios sistemas alternativos posibles de cruzamiento en el conejo de carne, primer apartado integrante de cualquier programa de mejora (Campo, 1987; XII Symposium de Cunicultura, Guadalajara). Después de comparar las poblaciones obtenidas por cruzamiento con las sintéticas, procedentes de la reproducción de las anteriores, se estudia genéticamente el cruce terminal simple y el cruce absorbente, así como el cruce terminal tres-vías, el cruce rotacional y el rotaterminal ("criss-cross") de tres poblaciones. Finalmente, se dan las fórmulas para calcular en cada uno de estos cinco casos el número de hembras necesarias para producir animales de reemplazo (puros o cruces) y el producto final, en función de las proporciones de selección y de reemplazamiento, la proporción machos/hembras, el tamaño de camada al destete y la viabilidad destete-sacrificio.

Necesidad del cruzamiento

En alguna de las fases en las que suele estratificarse la producción comercial de carne (selección, multiplicación y producción propiamente dicha), existen dos prácticas no recomendables que conviene evitar. La primera es la relajación de los objetivos de selección por la que se pretende no seleccionar animales todos los años, con el pretexto de haber alcanzado niveles productivos suficientemente altos que ya no pueden mejorarse por selección. Obviamente, cuando un carácter no se selecciona tiende a volver a los niveles que tenía antes de iniciar la fase de mejora, y debe quedar claro que en muchas ocasiones se hace selección no para mejorar un carácter sino para mantenerle en niveles productivos adecuados. La segunda es la pretensión de ahorrarse de vez en cuando la compra de animales reproductores, apareando los propios animales comerciales entre sí olvidando que se trata de animales cruces.

En este sentido conviene recordar que los animales comerciales son cruces porque presentan heterosis (vigor híbrido) esto es, son mejores que la media de los parentales que les originan. Lo importante de la heterosis es que es acumulativa, y por tanto, la que aparece en cada carácter individual se va sumando con las restantes hasta que la heterosis total conseguida en la aptitud productiva general hace que el cruce sea superior al mejor de los parentales. Si pretendemos reproducir una población de animales cruces entre sí (población sintética), inevitablemente sucederá que la heterosis disminuirá a la mitad con cada reproducción y además obtendremos un conjunto de animales heterogéneo, comparado

con la homogeneidad característica de las poblaciones cruces, que se comercializará con mucho peor beneficio. Por otra parte, puede haber también pérdidas de producción por recombinación, especialmente si las razas que intervinieron en el cruce inicial están adaptadas a ambientes diferentes. Las pérdidas por recombinación existen siempre que la relación entre heterosis y heterocigosis no es lineal, y se expresa por

$$4 F_2 - (2 F_1 + A + B)$$

siendo A y B las poblaciones parentales y F_1 y F_2 el cruce de ambas y la reproducción de F_1 respectivamente. La cantidad

$$F_1 - 0,5 (A + B)$$

representa la heterosis en el cruce F_1 .

La segunda razón por la que siempre se explotan animales comerciales cruces es la complementaridad, por la que en producción de carne siempre hay una línea paterna seleccionada por sus características de crecimiento, conversión y calidad de canal, y una línea materna seleccionada fundamentalmente para aptitud reproductiva. La posibilidad de aprovechar la complementaridad entre dos líneas diferentes especializadas desaparece cuando los animales F_1 se reproducen para dar paso a animales F_2 .

En lo que sigue, analizaremos genéticamente los tipos de cruzamiento más utilizados en la producción de conejo de carne, así como la estructura de cada uno de ellos, entendiendo por tal el número de hembras necesario para dar animales de reemplazo puros o cruces, así como el producto final. Los tipos de cruce son:

1) Cruces de dos poblaciones

- 1-1) Cruce terminal simple
- 1-2) Cruce absorbente

2) Cruces de tres poblaciones

- 2-1) Cruce terminal tres-vías
- 2-2) Cruce rotacional
- 2-3) Cruce rotaterminal

Cruces de dos poblaciones

Para comparar genéticamente tipos diferentes de cruces, suelen utilizarse fórmulas más o menos complicadas en las que intervienen cuatro clases de efectos en el carácter productivo:

- efectos genéticos directos (g^I)
- efectos genéticos maternos (g^M)
- heterosis individual (h^I)
- heterosis materna (h^M)

Los efectos genéticos directos son aquellos debidos al conjunto de genes que posee el animal; los efectos genéticos maternos son los debidos a la influencia de los genes presentes en la madre del animal sobre éste. La heterosis individual aparece siempre que el animal sea un cruce y la heterosis materna, siempre que la madre del animal sea un cruce (la heterosis paterna no suele ser importante en la producción comercial). Cada uno de estos efectos llevará un coeficiente igual a la proporción de genes del animal procedentes de cada población que le origina. Es importante tener en cuenta que en ge-

neral no es lo mismo hacer un cruce o su inverso, y siempre existirán efectos recíprocos que especificarán la línea paterna por un lado y la materna por otro.

De esta forma, un cruce terminal simple entre las poblaciones A y B, usando la primera como paterna y la segunda como materna, tendrá por ecuación

$$0,5 g_A^I + 0,5 g_B^I + g_B^M + h_{AB}^I$$

Los sumandos de esta ecuación son respectivamente la mitad de los efectos genéticos directos de cada población, el efecto genético de la población materna y la heterosis individual del animal cruce. En comparación con un animal puro, por ejemplo de la población B

$$g_B^I + g_B^M$$

la principal ventaja del cruce simple es que aprovecha la heterosis individual. Este efecto, sin tener en cuenta la complementariedad ya mencionada, es el responsable de la superioridad del cruce sobre el puro.

Por lo que respecta al cruce absorbente de dos poblaciones, es una alternativa que suele utilizarse cuando los machos de una población seleccionada se cruzan con las hembras de una población rústica, adaptada al medio ambiente considerado. En cada generación, los machos selectos A, se retrocruzan con las hembras procedentes del cruce de la generación anterior, e inicialmente con las hembras de la población autóctona B. La ecuación del cruce absorbente será

$$0,75 g_A^I + 0,25 g_B^I + 0,5 g_A^M + 0,5 g_B^M + 0,5 h_{AB}^I + h_{AB}^M$$

En el cruce absorbente aparecen las tres cuartas partes del efecto genético directo de la población seleccionada,

la cuarta parte del efecto genético directo de la rústica y la mitad de los efectos genéticos maternos de cada población. En el cruce absorbente, sólo es aprovechable la mitad de la heterosis individual y aparece en cambio el efecto debido a la heterosis materna. Habrá que tener en cuenta, que la proporción de genes procedentes de la población selecta A en una generación posterior a la indicada será

$$1 - 0,5^n$$

siendo n el número de la generación considerada (para n=2 la proporción es 0,75).

Cruces de tres poblaciones

El más utilizado de todos es el cruce terminal tres-vías, en el que dos de las poblaciones, A y B, se cruzan entre sí para producir el cruce simple entre ellas que será a su vez la madre del producto comercial final; la tercera población, C, utilizada como padre del producto comercial se cruzará finalmente con dicho cruce simple. El cruce terminal tres-vías tendrá por ecuación

$$0,25 g_A^I + 0,25 g_B^I + 0,5 g_C^I + 0,5 g_A^M + 0,5 g_B^M + \\ + 0,5 h_{AC}^I + 0,5 h_{BC}^I + h_{AB}^M$$

Este cruce es el mejor de todos desde un punto de vista exclusivamente genético, puesto que aprovecha de forma óptima tanto la heterosis individual como la maternal, así como la complementariedad. Las desventajas de manejo que suelen atribuirse sólo deben tenerse en cuenta en poblaciones de baja aptitud reproductiva y este no es el caso usual del conejo de carne. Cuando son de esperar pérdidas importantes de producción debido a la recombinación

el cruce terminal tres-vías tiene ventajas adicionales sobre los otros tipos.

El cruce rotacional tiene importancia si se desea conseguir que todas las hembras sean cruces y toda la descendencia sea también cruce. Inicialmente, se cruzan dos de las poblaciones, A y B por ejemplo, y las hembras resultantes se cruzan con machos de la tercera población C. Posteriormente, se van utilizando en las sucesivas generaciones de forma alternativa los tres tipos de población como machos y como hembras los cruces obtenidos en la generación anterior. La ecuación correspondiente al producto comercial obtenido de esta forma, una vez transcurrido cierto número de generaciones para conseguir un estado de equilibrio es

$$0,14 g_A^I + 0,57 g_B^I + 0,29 g_C^I + 0,29 g_A^M + 0,14 g_B^M + 0,57 g_C^M \\ + 0,86 h^I + 0,86 h^M$$

Cuando la aptitud reproductiva es baja, si se utiliza un cruce terminal tres-vías habrá que dedicar un elevado porcentaje de la población a la producción de animales de reemplazo (tanto puros como cruces); en este caso, las ventajas extragenéticas del cruce rotacional serán más patentes. Sin embargo, cuando la aptitud reproductiva es alta, el porcentaje encargado de la producción del cruce comercial podrá ser muy alto en comparación con el encargado de producir reemplazos, con lo que el cruce rotacional tendrá menos ventajas.

Las desventajas del cruce rotacional son varias. Tiene menor grado de heterosis individual y maternal, siendo en el de tres poblaciones el grado de heterosis 0,86 (en el de dos poblaciones es 0,67 y en el de cuatro sería 0,93). No hay complementaridad. La variabilidad del producto comercial ofrecido en las sucesivas generaciones es muy elevada, con la reducción correspondiente del precio de venta conseguido. Finalmente, cuando se utilizan

reproductores de distintas edades en cada ciclo (generaciones imbricadas y no separadas) surgen complicaciones importantes de manejo especialmente en lo relativo a la identificación de los reproductores.

Como alternativa existe el denominado cruce rotacional ("criss-cross") que pretende combinar las ventajas del cruce terminal y del rotacional respecto al aprovechamiento de la heterosis individual y maternal, así como de la complementariedad. En cada generación, la hembra es un cruce rotacional de dos de las poblaciones, A y B por ejemplo, y el macho terminal pertenece a la otra población, C. Con este cruce se aumenta la utilización de la heterosis individual, que tiene de coeficiente uno, mientras que la heterosis materna tiene de coeficiente 0,67 (en el de cuatro poblaciones este último coeficiente sería 0,86). Todas las hembras y toda la descendencia son cruces.

Los denominados cruces rotacionales periódicos no deben utilizarse, ya que tienen una disminución importante de la heterosis aprovechada en un cruce rotacional convencional. En el cruce periódico existe un uso desigual de las poblaciones utilizadas como machos, si bien en una secuencia regular especificada; por ejemplo, con las poblaciones A, B y C, podrían usarse ciclos de cuatro generaciones en los que el macho A se utilizase dos veces, y una vez los machos B y C, siguiendo la secuencia A, B, A, C. Con este sistema se consigue aumentar la expresión de las características productivas de una población a expensas de las otras, pero como contrapartida el uso de la heterosis puede ser sólo el 75% de la utilizada en el cruce convencional que utiliza los machos equitativamente.

Estructura de los cruces

Sea cual sea el tipo de cruce utilizado en el programa, habrá que conocer el número de hembras neces-

rio para dar animales de reemplazo (puros o cruces) y para dar el producto final comercial. En una especie como el conejo de elevada aptitud reproductiva el mayor porcentaje de hembras podrá estar dedicado a la formación del producto final. Para conocer la proporción de hembras necesarias para dar machos de reemplazo (HM), partiremos de la fórmula correspondiente a la proporción de machos de reemplazo seleccionados (s_M):

$$s_M = r_M / 0,5 h n v HM$$

en la que r_M es la proporción de machos de reemplazo necesarios, h^M es el número de hembras apareadas con cada macho, n es el tamaño de camada al destete y v es la viabilidad destete-sacrificio. De forma análoga, para conocer la proporción de hembras necesarias para dar hembras de reemplazo (HH), partiremos de la fórmula para la proporción de hembras de reemplazo seleccionadas (s_H):

$$s_H = r_H / 0,5 n v HH$$

en la que r_H es la proporción de hembras de reemplazo.

Teniendo en cuenta que en los tipos de cruces considerados aquí, con dos y tres poblaciones, habrá que atender al reemplazamiento de machos puros y al de hembras puras y cruces (pero no al de machos cruces), y utilizando valores que podrían considerarse normales para el resto de los parámetros ($s_M = 0,60$; $r_M = 0,50$; $s_H = 0,80$; $r_H = 0,25$) llegaremos a los siguientes valores para HM y HH:

PARAMETRO	PUROS	CRUCES
h	5	5
n	5	7
v	0,93	0,97
HM	0,07	-
HH	0,13	0,09

El número de hembras necesario para reemplazamiento y producción del animal comercial se da a continuación para los cruces de dos poblaciones y de tres poblaciones considerados anteriormente. Dicho número se representa por letras mayúsculas, mientras que los subíndices en HM y HH se refieren al reemplazo (puro o cruce). El número total de hembras se considera en todos los casos 1.000 para facilidad de comparación.

Estructura de los cruces de dos poblaciones

En el cruce terminal simple (machos de la población A y hembras de la población B), habrá que dedicar un porcentaje de las hembras al reemplazamiento de machos A y al reemplazamiento de hembras B:

$$HM_A = A / (A + AB) ; \quad HH_B = B / (B + AB)$$

El número de hembras necesario en cada caso será:

$$A = HM_A \times AB / (1 - HM_A) ; \quad B = HH_B \times AB / (1 - HH_B)$$

Teniendo en cuenta que $A + B + AB = 1.000$, tendremos el

número de hembras que podría dedicarse a producir el cruce comercial final:

$$AB = 1.000 / (HM_A / (1 - HM_A)) + (HH_B / (1 - HH_B)) + 1 =$$
$$= 816$$

Finalmente, podrá hallarse el número de hembras necesario para reemplazamiento de animales (machos de la población A y hembras de la población B):

$$A = 62 \quad ; \quad B = 122$$

sumando las 184 hembras restantes.

En el cruce absorbente con machos de la población A, habrá que dedicar algunas hembras a reemplazar machos de esta población, así como hembras puras de la población B y hembras del cruce entre ambas:

$$HM_A = A / (A + AB + AAB)$$

$$HH_B = B / (B + AB)$$

$$HH_{AB} = AB / AAB$$

El número de hembras necesario en cada caso será:

$$A = HM_A \times (1 + HH_{AB}) \times AAB / (1 - HM_A)$$

$$B = HH_B \times HH_{AB} \times AAB / (1 - HH_B)$$

$$AB = HH_{AB} \times AAB$$

Teniendo en cuenta que en este caso $A + B + AB + AAB = 1.000$, el número de hembras destinado a producir el cruce

comercial será:

$$\begin{aligned} AAB &= 1.000 / (HM_A \times (1 + HH_{AB}) / (1 - HM_A)) + \\ &\quad + (HH_B \times HH_{AB} / (1 - HH_{AB})) + HH_{AB} + 1 = \\ &= 844 \end{aligned}$$

con lo que el número de hembras necesario para el reemplazo de animales (machos de la población A, hembras puras de la población B y hembras cruces AB) será:

$$A = 69 \quad ; \quad B = 11 \quad ; \quad AB = 76$$

sumando las 156 hembras restantes de las que 80 se dedicarán a reemplazar animales puros.

Estructura de los cruces de tres poblaciones

En el cruce tres-vías con un macho terminal de la población C apareado con hembras procedentes del cruce de las poblaciones A y B (la población A actuando como macho y la B como hembra), habrá que reemplazar machos puros de la población C y de la población A, así como hembras puras de la población B y hembras cruces AB. Por lo tanto:

$$HM_A = A / (A + AB) \quad ; \quad HH_B = B / (B + AB)$$

$$HM_C = C / (C + CAB)$$

$$HH_{AB} = AB / CAB$$

El número de hembras necesario en cada caso será:

$$A = HM_A \times HH_{AB} \times CAB / (1 - HM_A)$$

$$B = HH_B \times HH_{AB} \times CAB / (1 - HH_B)$$

$$C = HM_C \times CAB / (1 - HM_C)$$

$$AB = HH_{AB} \times CAB$$

Teniendo en cuenta que el número total de hembras debe ser $A + B + C + AB + CAB = 1.000$, el número de hembras destinadas a la producción del cruce terminal final será:

$$\begin{aligned} CAB = 1.000 / & (HM_A \times HH_{AB} / (1 - HM_A)) + \\ & + (HH_B \times HH_{AB} / (1 - HH_B)) + \\ & + HM_C / (1 - HM_C) + HH_{AB} + 1 = 844 \end{aligned}$$

Por lo tanto, el número de hembras necesario para el reemplazamiento de animales (machos puros A, hembras puras B, machos puros C, y hembras cruces AB) será respectivamente:

$$A = 6 \quad ; \quad B = 11 \quad ; \quad C = 63 \quad ; \quad AB = 76$$

sumando 156 de las que 80 son necesarias para reemplazar animales puros.

Cuando se utiliza un cruce rotacional de tres poblaciones (A, B, C) será necesario reemplazar exclusivamente machos puros de cada una de ellas; el porcentaje de hembras necesario para la población A será:

$$HM_A = A / (A + 0,33 \text{ ABC})$$

y análogamente para las poblaciones B y C. El número de

hembras para la población A será:

$$A = HM_A \times ABC / 3(1 - HM_A)$$

y análogamente para las otras dos poblaciones. Teniendo en cuenta que $A + B + C + ABC = 1.000$, el número de hembras destinado a dar el producto comercial será:

$$ABC = 1.000 / (HM_A / 3(1 - HM_A)) + (HM_B / 3(1 - HM_B)) + \\ + (HM_C / 3(1 - HM_C)) + 1 = 930$$

número sensiblemente mayor que el obtenido en el cruce terminal tres-vías (844), por lo que el número necesario para el reemplazamiento de los machos puros de las tres poblaciones será algo menor (70), repartido por igual para cada una de las poblaciones:

$$A = B = C = 23$$

Finalmente, en el cruce rotaterminal a base de macho terminal C y hembras cruces procedentes de las poblaciones A y B, habrá que producir machos de reemplazo puros A, B y C, así como hembras cruces AB. El porcentaje necesario de hembras será:

$$HM_A = A / (A + 0,5 AB)$$

y análogamente para la población B;

$$HM_{AB} = AB / (AB + CAB)$$

$$HM_C = C / (C + CAB)$$

siendo el último valor equivalente al encontrado en el cruce terminal tres-vías. El número de hembras será:

$$A = HM_A \times AB / 2(1 - HM_A)$$

y análogamente para B;

$$AB = HH_{AB} \times CAB / (1 - HH_{AB})$$

$$C = HM_C \times CAB / (1 - HM_C)$$

Dado que el número total de hembras debe ser $A + B + C + AB + CAB = 1.000$, el número de hembras destinado a dar el producto final será:

$$\begin{aligned} CAB &= 1.000 / (HM_A \times HH_{AB} / 2(1 - HM_A)(1 - HH_{AB})) + \\ &\quad + (HM_B \times HH_{AB} / 2(1 - HM_B)(1 - HH_{AB})) + \\ &\quad + HM_C / (1 - HM_C) + HH_{AB} / (1 - HH_{AB}) + 1 = \\ &= 846 \end{aligned}$$

similar al obtenido en el cruce terminal tres-vías.

El número de hembras necesario para la producción de animales de reemplazo (machos puros de las tres poblaciones y hembras cruces AB) será respectivamente:

$$A = B = 3 \quad ; \quad C = 63 \quad ; \quad AB = 84$$

sumando 154 animales de los que 70 serán necesarios para reemplazar animales puros (igual que en el rotacional).

