

CONTROL DE LA CONSANGUINIDAD EN POBLACIONES CERRADAS

por

A. SOLANO URIARTE

Misión Biológica de Galicia, Pontevedra (España)

En poblaciones cerradas, formadas para estudio de efectos de la consanguinidad, mantenimiento de líneas, u otra finalidad de orden teórico o práctico, el aumento de homocigosis es continuo. Para su control es necesario el conocimiento de las relaciones de parentesco entre los componentes de la población, y estas relaciones pueden cuantificarse mediante el coeficiente de parentesco (Malecot, 1948), coeficiente que es numéricamente igual al de consanguinidad de los descendientes de su potencial cruzamiento.

El método clásico de cálculo de coeficientes de consanguinidad (Wright, 1922), por conteo del número de generaciones que separan cada antecesor común del padre y de la madre del individuo estudiado, se hace excesivamente trabajoso y propenso a equivocaciones en el transcurso de pocas generaciones a partir de la formación de la población.

Estos inconvenientes son evitados con la utilización del método de cómputo de Cruden (1949), que opera recurrentemente a partir del núcleo fundacional de la población, núcleo con coeficientes de consanguinidad y parentesco conocidos o estimados.

El cálculo previo de los coeficientes de parentesco entre los componentes de una población permite controlar la consanguinidad originada por los diversos cruzamientos y elegir aquellos que se ajusten mejor a los objetivos de trabajo.

Este cálculo previo puede hacerse por el método de conteo de

generaciones, limitando la genealogía de los individuos considerados a un número reducido de generaciones (Stone y col., 1976), o por el método de Cruden (1949). Este último método no limita el número de generaciones de los individuos estudiados, ni tampoco hace más trabajosa su aplicación el hecho de aumentar el número de «nudos» o antecesores comunes.

El objeto de este trabajo es exponer en detalle una sistemática, basada en el método Cruden, para el cálculo de los coeficientes de consanguinidad de la progenie de todos los cruzamientos posibles entre los componentes de una población cerrada.

METODO DE CALCULO

Llamamos núcleo inicial al conjunto de individuos de una población que se aísla del resto del conjunto reproductivo, constituyéndose en población cerrada.

Se llama ciclo reproductivo al período de tiempo transcurrido entre el cruzamiento del conjunto de la población y la obtención de su progenie; se considera que los ciclos reproductivos están separados por un intervalo de tiempo durante el cual se efectúa la selección, cálculo y planeo del siguiente ciclo, etc.

Se considera el caso de generaciones no superpuestas cuando todos los individuos que se cruzan en un ciclo reproductivo proceden de un mismo ciclo reproductivo anterior.

El caso de generaciones superpuestas ocurre cuando en un ciclo reproductivo se cruzan individuos nacidos en diferentes ciclos reproductivos anteriores.

A) Generaciones no superpuestas

Se forma una tabla de doble entrada en la que figuran, en filas y columnas, la totalidad de los machos (A, B, C, D, ...) y hembras (a, b, c, d, ...) del núcleo inicial. Figurarán en la tabla los coeficientes de consanguinidad de cada individuo (F_A, F_B, \dots) y los coeficientes de parentesco entre cada dos de ellos (f_{AA}, f_{AB}, \dots) (tabla 1). Estos coeficientes de parentesco son numérica-

mente iguales a los coeficientes de consanguinidad de la progenie de su hipotética unión: $f_{AB} = F_{A \times B}$.

Tabla 1. Coeficientes de consanguinidad propia (F) y de parentesco mutuo (f) de los componentes del núcleo inicial de una población cerrada. Primer ciclo reproductivo

F	Machos					Hembras						
	A	B	C	D	.	a	b	c	d	.	.	.
F_A	A $\frac{1+F_A}{2}$	f_{AB}	f_{AC}	f_{AD}	.	f_{Aa}	f_{Ab}	f_{Ac}	f_{Ad}	.	.	.
F_B	B	$\frac{1+F_B}{2}$	f_{BC}	f_{BD}	.	f_{Ba}	f_{Bb}	f_{Bc}	f_{Bd}	.	.	.
F_C	C		$\frac{1+F_C}{2}$	f_{CD}	.	f_{Ca}	f_{Cb}	f_{Cc}	f_{Cd}	.	.	.
F_D	D			$\frac{1+F_D}{2}$	.	f_{Da}	f_{Db}	f_{Dc}	f_{Dd}	.	.	.
.
F_a	a					$\frac{1+F_a}{2}$	f_{ab}	f_{ac}	f_{ad}	.	.	.
F_b	b						$\frac{1+F_b}{2}$	f_{bc}	f_{bd}	.	.	.
F_c	c							$\frac{1+F_c}{2}$	f_{cd}	.	.	.
F_d	d								$\frac{1+F_d}{2}$	.	.	.
.
.

En la *tabla 2* figurarán, en filas y columnas, los descendientes de cruzamientos de los individuos del núcleo inicial que sean seleccionados para un posterior ciclo reproductivo (machos M, N, O, P, ... y hembras m, n, o, p, ...). Si son, por ejemplo, sus genealogías

$$\begin{aligned}
 M &= Axb & N &= Bxo & O &= Cxd \\
 m &= Dxa & n &= Axb & o &= Cxd
 \end{aligned}$$

los coeficientes de consanguinidad y de parentesco que figuran en

la *tabla 2* se calculan por el método de *C r u d e n* con los datos de la *tabla 1*.

$$F_M = f_{Ab}; F_N = f_{Bc}; \dots \dots F_o = f_{cd}$$

$$f_{MM} = (1 + f_{Ab})/2; \dots \dots \dots f_{oo} = (1 + f_{cd})/2$$

$$f_{MN} = (f_{AB} + f_{Ac} + f_{bB} + f_{bc})/4$$

$$f_{MO} = (f_{AA} + f_{Ab} + f_{bA} + f_{bb})/4$$

Las tablas son simétricas con relación a la diagonal, ya que $f_{Ab} = f_{bA}$. Las cifras de la diagonal representan el coeficiente de parentesco de cada individuo consigo mismo, y también el coefi-

Tabla 2. Coeficientes de parentesco mutuo (f) de los componentes del segundo ciclo reproductivo de una población cerrada calculados en función de los coeficientes de consanguinidad individuales (F) y de los coeficientes de parentesco contenidos en la tabla 1

P	Machos					Hembras						
	M*	N*	O*	.	.	m*	n*	o*	.	.	.	.
f_{Ab}	M $\frac{1+f_{Ab}}{2}$	f_{MN}	f_{MO}	.	.	f_{Mm}	f_{Mn}	f_{Mo}	.	.	.	.
f_{Bc}	N $\frac{1+f_{Bc}}{2}$	f_{NO}	.	.	f_{Nm}	f_{Nn}	f_{No}	.	.	.	.	.
f_{cd}	o $\frac{1+f_{cd}}{2}$	.	.	.	f_{Om}	f_{On}	f_{Oo}	.	.	.	.	.
.
.
f_{Da}	m $\frac{1+f_{Da}}{2}$	.	.	.	f_{mn}	f_{mo}	.	.	.	.	.	.
f_{Ab}	n $\frac{1+f_{Ab}}{2}$	f_{no}	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
f_{cd}	o $\frac{1+f_{cd}}{2}$	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.
.
.

* Genealogías: M = A × b N = B × c O = C × d
m = D × a n = A × b o = C × d

ciente de consanguinidad de la progenie de su hipotética autofecundación, siendo $f_{NN} = (1 + F_N)/2$.

El resto de las cifras muestran los coeficientes de parentesco entre los individuos que encabezan las filas y columnas correspondientes a cada cifra, e igualmente el coeficiente de consanguinidad de la progenie de su potencial cruzamiento.

Cada tabla sucesiva se deriva así, con facilidad, de una tabla anterior.

B) *Generaciones superpuestas*

Se presenta habitualmente este caso trabajando con animales; en todos o alguno de los ciclos reproductivos coexisten con animales llegados a la pubertad otros reproductores adultos conservados durante dos o más ciclos reproductivos.

Los animales púberes pueden proceder del ciclo reproductivo precedente o de otros más alejados; el primer caso se presentaría, por ejemplo, en ganado porcino criado en régimen de un parto anual y edad de pubertad de ocho meses; el segundo caso cuando el régimen es de dos partos anuales e igual edad de pubertad.

A partir del núcleo inicial, y antes de cada ciclo reproductivo, se formará una tabla en la que figuren los coeficientes de consanguinidad y de parentesco mutuo de todos los individuos componentes de ese ciclo.

Para la confección de estas tablas puede ser necesaria la consideración de diversos pares de individuos:

1. Pares de adultos que figuran en el ciclo (y tabla) precedente. Los coeficientes de parentesco se toman, sin variación, de esa tabla.
2. Pares de púberes. Como ambos púberes proceden del mismo ciclo reproductivo sus padres figuran en la tabla correspondiente a ese ciclo.

Siendo los púberes P y Q, ($P = A \times B$, $Q = C \times D$), se aplica la regla de Cruden:

$$f_{PQ} = (f_{AC} + f_{AD} + f_{BC} + f_{BD})/4$$

hallándose f_{AC} , f_{AD} , f_{BC} y f_{BD} en la tabla correspondiente al ciclo reproductivo de los padres del púber.

3. Pares formados por un púber y uno de sus padres. Siendo P el púber, ($P = A \times B$), se aplica la regla:

$$f_{PA} = (f_{AA} + f_{BA})/2$$

hallándose f_{AA} y f_{BA} en la tabla del ciclo reproductivo de los padres del púber.

4. Pares formados por un púber y adultos contemporáneos o anteriores a sus padres. Estos adultos figuran en la tabla del ciclo reproductivo de los padres del púber, ya que cada individuo presente en la población debe figurar sin interrupción en las tablas desde su primer ciclo reproductivo hasta su eliminación de la población.

Siendo $P = A \times B$ el púber y C el adulto se aplica la regla:

$$f_{CP} = (f_{CA} + f_{CB})/2$$

hallándose f_{CA} y f_{CB} en la tabla del ciclo reproductivo de los padres del púber.

5. Pares formados por un púber y adultos más jóvenes que sus padres, cuando padres y adultos coinciden en un ciclo reproductivo. Al producirse este caso, por conservación de los padres del púber a lo largo de dos o más ciclos reproductivos, se calcula como en el caso 4.

6. Pares formados por un púber y adultos más jóvenes que sus padres, sin coincidencia de padres y adultos en ningún ciclo reproductivo. Podría ser evitado que este caso se reflejara en las tablas, por su mayor dificultad de cálculo, manteniendo en ellas a los padres del púber el número de ciclos necesarios para que la coincidencia se produzca, aunque hayan sido eliminados de la población; pero esta forma de operar recarga el formato de las tablas, cuya capacidad es limitada, y aumenta el número de coeficientes a calcular.

Es preferible, para efectuar los cálculos, la formación de tablas auxiliares de doble entrada. Las encabezarán en un sentido los individuos seleccionados para renovación, desde el ciclo siguiente al de su nacimiento hasta aquel en el que alcancen la

pubertad. La otra cabecera incluirá los individuos que han alcanzado la pubertad en ese mismo intervalo.

DISCUSION

El núcleo inicial de la población cerrada puede ser tomado de una población base en equilibrio, y estar formado por individuos no emparentados entre sí. En este caso los coeficientes de consanguinidad y parentesco de la *tabla 1* serían los coeficientes medios de la población de origen. Como, en general, no es conocido este parámetro se le da el valor cero, y las tablas sucesivas van midiendo el aumento de consanguinidad en relación con la población base.

En general, y para la confección de la primera tabla, deben ser examinadas las genealogías (3 ó 4 generaciones) de los componentes del núcleo inicial, y computarse los coeficientes, si se estima necesario, por los métodos de *Wright* o *Cruden*.

El número de coeficientes a calcular aumenta con el tamaño de la población, aunque es muy rápido el cálculo de cada uno de ellos por el método de *Cruden*.

En el caso de generaciones no superpuestas, y con un contingente de n individuos, la confección de una tabla como la 1 o la 2 exige el cálculo de $\frac{n(n+1)}{2}$ coeficientes.

En el caso de generaciones superpuestas, siendo n el tamaño de la población y t el tanto por uno de renovación del contingente, tenemos en cada ciclo reproductivo un número nt de púberes, y el resto de la población, $n(1-t)$, son adultos que vienen del ciclo reproductivo anterior.

Los coeficientes de parentesco entre adultos ya están calculados en el ciclo precedente. Quedan por calcular $\frac{nt(nt+1)}{2}$ coeficientes de parentesco de púberes entre sí y consigo mismo, y $nt \cdot n(1-t)$ coeficientes de parentesco entre púberes y adultos, con un total de cálculos de $\frac{nt(2n+1-nt)}{2}$ coeficientes de parentesco en cada ciclo reproductivo.

Tabla 4. Coeficientes de parentesco ($\times 100$) entre los componentes del tercer ciclo reproductivo; calculados en función de los coeficientes de consanguinidad (F) y de los coeficientes de parentesco de la tabla 3 por el método de *Cru den*

F %	machos				hembras										
	A	C	D	E*	1	2	3	5	7	9	10	11*	13*	18*	
10,0	A	55,0	0	0	14,0	14,0	0	0	28,0	0	0	0	0	34,5	0
0	C		50,0	0	0	0	0	0	0	0	25,0	0	0	0	25,0
12,0	D			56,0	28,0	0	30,0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	E				50,0	10,0	15,0	0	27,5	0	0	0	0	12,0	0
6,0	1					53,0	0	0	20,0	0	0	0	0	33,5	0
8,0	2						54,0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	3							50,0	0	25,0	0	0	25,0	0	25,0
10,0	5								55,0	0	0	0	0	24,0	0
0	7									50,0	0	0	37,5	0	12,5
0	9										50,0	0	0	0	12,5
0	10											50,0	0	0	0
25,0	11												62,5	0	12,5
14,0	12													57,0	0
0	13														50,0

* Genealogías: $E = D \times 5$ $11 = B \times 7$ $12 = A \times 1$ $13 = C \times 3$

Tabla 5. Coeficientes de parentesco ($\times 100$) entre los púberes del tercer ciclo reproductivo y aquellos componentes del núcleo inicial eliminados que han dejado descendencia seleccionada para renovación de la población. Tabla auxiliar calculada a partir de la tabla 3

	E*	11*	12*	13*
B	0	37,5	0	12,5
4	0	0	0	12,5
6	0	0	0	0
8	13,0	0	0	0

* Genealogías:

$E = D \times 5$ $11 = B \times 7$
 $12 = A \times 1$ $13 = C \times 3$

Tabla 6. Coeficientes de parentesco ($\times 100$) entre los componentes del cuarto ciclo reproductivo; calculados en función de los coeficientes de consanguinidad (F) y de los coeficientes de parentesco de tablas anteriores, por el método de *C r u d e n*

F %	machos				hembras										
	C	D	E	G*	2	5	7	9	10	12	13	14*	15*	16*	
0	C	50,0	0	0	0	0	0	0	25,0	0	0	25,0	0	37,5	0
12,0	D		56,0	28,0	0	30,0	0	0	0	0	0	15,0	0	41,0	0
0	E			50,0	7,0	15,0	27,5	0	0	0	12,0	0	7,5	0	20,5
0	G				50,0	0	14,0	0	0	12,5	17,2	0	0	0	0
8,0	2					54,0	0	0	0	0	0	0	27,0	0	29,0
10,0	5						55,0	0	0	0	24,0	0	0	0	0
0	7							50,0	0	0	0	12,5	12,5	0	0
0	9								50,0	0	0	12,5	0	25,0	0
0	10									50,0	0	0	0	0	0
14,0	12										57,0	0	0	0	0
0	13											50,0	6,2	18,8	0
0	14												50,0	0	14,5
25,0	15													62,5	0
26,0	16														63,0

* Genealogías: $G = A \times 6$ $14 = B \times 2$ $15 = C \times 4$ $16 = D \times 8$

Tabla 7. Coeficientes de parentesco ($\times 100$) entre los componentes de los contingentes de renovación seleccionados en el primero y segundo ciclo reproductivo. Tabla auxiliar calculada por el método de *C r u d e n* según datos de la tabla 3

	G*	14*	15*	16*
E*	7,0	7,5	0	20,5
11*	0	18,8	0	0
12*	17,2	0	0	0
13*	0	6,2	18,8	0

* Genealogías:

$$\begin{aligned}
 E &= D \times 5 & 11 &= B \times 7 \\
 12 &= A \times 1 & 13 &= C \times 3 \\
 G &= A \times 6 & 14 &= B \times 2 \\
 15 &= C \times 4 & 16 &= D \times 8
 \end{aligned}$$

Todos los componentes del núcleo inicial toman parte en los ciclos reproductivos primero y segundo.

Al final del primer ciclo reproductivo se seleccionan, para renovación de efectivos, el macho E y las hembras 11, 12 y 13 que alcanzarán la pubertad, y se cruzarán en el tercer ciclo reproductivo.

Al final del segundo ciclo reproductivo se seleccionan, para renovación, el macho G y las hembras 14, 15 y 16, al tiempo que se eliminan de la población el macho B y las hembras 4, 6 y 8.

La *tabla 4*, para el control de consanguinidad del tercer ciclo reproductivo, se forma siguiendo las reglas de *Cru den*, con el apoyo de la *tabla 3* y de las genealogías de los púberes que se incorporan a este ciclo reproductivo y que figuran al pie de la tabla.

La *tabla auxiliar 5* relaciona los coeficientes de parentesco entre estos púberes y los individuos eliminados en ciclos anteriores que han dejado descendencia seleccionada.

La *tabla 6*, para el control de consanguinidad del cuarto ciclo reproductivo, se calcula de igual forma que la *tabla 4*, con el apoyo de las *tablas 3 y 4* y *tabla auxiliar 5*. En ella se ha supuesto la eliminación, tras el tercer ciclo reproductivo, del macho A y de las hembras 1, 3 y 11.

Por la sistemática de cálculo expuesta se forma a continuación la *tabla auxiliar 7*, con los coeficientes de parentesco entre los púberes de este ciclo reproductivo y los púberes del ciclo reproductivo anterior.

Cada sucesiva tabla de control de consanguinidad de un ciclo reproductivo se calcula en base a la tabla auxiliar anterior y tablas de control de los dos ciclos reproductivos anteriores.

RESUMEN

El control de la consanguinidad en poblaciones cerradas exige el conocimiento de las relaciones de parentesco entre sus componentes.

El trabajo detalla, para los casos de generaciones superpuestas y no superpuestas, un método sistemático para la formación de

tablas que contienen los coeficientes de parentesco entre todos los individuos que componen la población.

Este método, basado en el sistema de cálculo de Cruden, es operativo en poblaciones cerradas con un contingente de hasta 40 ó 50 individuos.

Se incluye un ejemplo numérico.

SUMMARY

In closed populations the familiar relationships among the population individuals must be known in order to control inbreeding.

For both cases of overlapping and non-overlapping generations, this paper describes in detail a systematic method to obtain the coancestry tables among all the individuals in the population.

The method is based on Cruden's formula and is easy to use for closed populations with a number of individuals up to forty or fifty.

A numerical example is given.

BIBLIOGRAFIA

CRUDEN, D.

1949. The computation of inbreeding coefficients in closed populations. *J. Hered.*, 40, 248-251.

MALECOT, G.

1948. *Les Mathématiques de l'Heredité*. Masson, Paris.

STONE, B. A.; HEAP, P. A. and STAFFORD, J. E.

1976. Use of inbreeding coefficients to control inbreeding in a pig production unit. *Agric. Rec.*, 3, 56-58.

WRIGHT, S.

1922. Coefficients of inbreeding and relationship. *Amer. Nat.*, 56, 330-338.