



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN Y DE LA SALUD ANIMAL

FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

GENÉTICA Y MEJORAMIENTO ANIMAL

**DISEÑO DE PROGRAMAS DE MEJORAMIENTO GENÉTICO CON MÁXIMO
BENEFICIO ECONÓMICO PARA LA POBLACIÓN DE CABRAS LECHERAS DE
FRANCIA**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SALUD Y DE LA PRODUCCIÓN ANIMAL

PRESENTA:

ELIZABETH TADEO PERALTA

TUTOR PRINCIPAL:

**DR. HUGO HORACIO MONTALDO VALDENEGRO, FACULTAD DE MEDICINA
VETERINARIA Y ZOOTECNIA**

COMITÉ TUTOR:

**DR. HÉCTOR CASTILLO JUÁREZ, PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
PRODUCCIÓN Y DE LA SALUD ANIMAL**

**DR. SERGIO IVÁN ROMÁN PONCE, PROGRAMA DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS Y DE LA PRODUCCIÓN ANIMAL**

MÉXICO D.F., ENERO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatorias

A Dios, que es mi fortaleza

A mi esposo, que con amor e ingenio me apoya en cada momento

A mis padres y hermana, que han respaldado cada logro en mi vida

Agradecimientos

Hago un extenso agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Instituto Nacional de Investigación Agronómica de Francia (INRA), que apoyaron mi formación y proyecto.

A todo el personal del INRA, pero especialmente al Dr. Jean Michel Elsen e Isabelle Palhière por el compromiso y amabilidad que demostraron en todo momento.

A los doctores Hugo Montaldo, Héctor Castillo y Sergio Román, por su valioso apoyo a lo largo de mi formación.

Al jurado por sus valiosos comentarios.

Resumen

Francia opera uno de los programas de mejora genética para cabras lecheras más importantes del mundo. Aunque el programa es exitoso, y conduce a tasas importantes de progreso genético anual (0.16 desviaciones estándar genéticas aditivas, en promedio de 2003 a 2012, para las razas Alpina y Saanen) en el índice productivo combinado, no está optimizado para obtener el máximo beneficio económico. Los objetivos de este estudio fueron: 1) obtener la combinación de valores de las variables de decisión que maximizarán el beneficio económico, y 2) analizar el impacto de las variables de decisión en el beneficio económico. Se modeló un programa, que hace una aproximación en promedio de los programas de ambas razas, con métodos determinísticos, para obtener la ganancia genética anual para una característica que representa al índice de características productivas de ambas razas. Para calcular el beneficio económico se estimaron los ingresos y los costos variables del modelo. Posteriormente, se probaron diferentes valores en las variables de decisión seleccionadas del modelo. De las 39,862 combinaciones posibles se obtuvieron los programas que generaron el máximo beneficio económico. El programa de mejora genética con máximo beneficio económico incrementó el beneficio económico en 790 millones de euros, mientras que el programa de mejora genética con máximo beneficio económico que restringe la inseminación artificial (0.4) incrementó el beneficio económico en 420 millones de euros, ambos con respecto al programa actual. En el análisis sobre el impacto de cada variable de decisión se encontró que hay variables con mayor impacto sobre el beneficio económico. Se concluyó que el programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia podría incrementar de manera importante el beneficio económico que actualmente genera, usando valores óptimos en las variables de decisión. Las variables de decisión con mayor impacto en el beneficio económico se tendrían que considerar prioritarias.

Abstract

France runs one of the most important breeding schemes in the world. Although it is successful, and generates efficient annual genetic gain in the production traits index (0.16 additive genetic standard deviations, in average from 2003 to 2012, in Alpine and Saanen breeds), it is not optimized to obtain the maximum profit. The objectives of this study were: 1) To obtain the combination of decision variables values that maximized the profit and 2) to analyze the impact of the decision variables in the profit. A breeding program, that is an approximation in average of the two breeds breeding programs, was modeled with deterministic methods in order to obtain the annual genetic gain for one trait that represents the production traits index. In addition; revenues, variables costs and profit, were calculated in the model. After that, different values were tested in the selected decision variables of the model. From the 39,862 possible combinations, the breeding programs with the maximum profit were extracted. The breeding program with the maximum profit increased 790 million euros the profit, while the breeding program with the maximum profit but the artificial insemination constrained (0.4), increased 420 million euros the profit, both compared with the actual breeding program. In the analysis of decision variables impact it was found that some variables have bigger impact in the profit. As conclusion, the dairy goats breeding program of France could strongly increase the actual profit, using optimum values in the decision variables. The decision variables with bigger impact in the profit have to be considered preferentially.

Contenido

	Página
Resumen.....	III
Abstract.....	IV
Lista de cuadros.....	VI
Lista de figuras.....	VII
Introducción.....	1
Objetivos.....	9
Hipótesis.....	10
Materiales y Métodos.....	11
Resultados.....	34
Discusión.....	43
Conclusiones.....	50
Referencias.....	51
Anexo 1.....	55
Anexo 2.....	63

Lista de cuadros

	Página
Cuadro 1. Cifras por raza del programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia.....	16
Cuadro 2. Parámetros y variables de decisión usadas en el programa de mejora genética.....	19
Cuadro 3. Relaciones entre los parámetros, las variables de decisión y las variables internas del modelo.....	21
Cuadro 4. Categorías de animales en el modelo.....	26
Cuadro 5. Resultados económicos para el programa actual y los dos programas con mayores beneficios económicos.....	35
Cuadro 6. Sector de cabras lecheras en México y Francia.....	49

Lista de figuras

	Página
Figura 1. Esquema del programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia.....	15
Figura 2. Valores genéticos esperados en las categorías de cabras recién nacidas del núcleo (X_1) y de los rebaños comerciales (X_{21}) generados cada año en el modelo.....	34
Figura 3. Beneficio económico generado al modificar el número de machos en prueba de progenie.....	36
Figura 4. Beneficio económico generado al modificar el número de hijas por macho en prueba de progenie.....	37
Figura 5. Beneficio económico generado al modificar la fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite.....	38
Figura 6. Beneficio económico generado al modificar la fracción de cabras inseminadas en el núcleo.....	38
Figura 7. Beneficio económico generado al modificar el número de dosis usadas durante el primer año de servicio de un macho elite.....	39
Figura 8. Beneficio económico generado al modificar el número de dosis usadas durante el segundo año de servicio de un macho elite.....	40
Figura 9. Beneficio económico generado al modificar el número de dosis usadas durante el tercer año de servicio de un macho elite.....	40
Figura 10. Beneficio económico generado al modificar el número de dosis usadas durante el cuarto año de servicio de un macho elite.....	41

Figura 11. Beneficio económico generado al modificar el número de años en servicio de los machos elite, en cada nivel de la fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite (fracción).....	42
---	----

Introducción

Los programas de mejora genética son un conjunto de reglas desarrolladas para mejorar genéticamente una o varias características de una población, durante las generaciones siguientes a su aplicación (Elsen, 1988). Las reglas se relacionan con el apareamiento, la selección, el reemplazo, la evaluación, etc., de los animales dentro de la población. El uso de estos programas es esencial para mejorar la eficiencia de los sistemas de producción animal, ya que promueven cambios deseables en las características de importancia económica (dos Santos y col., 2015). Tradicionalmente, usan los valores genéticos predichos (EBV) de los candidatos para seleccionar una fracción de animales superiores, y usarlos como progenitores.

Aunque los programas de mejora genética basados en la selección artificial pueden ser muy diversos debido a las condiciones bajo las que son diseñados (especie, raza, tecnología reproductiva, sistema de apareamiento, recursos financieros, etc.), todos se basan en el mismo concepto: generar y diseminar la superioridad genética de forma continua.

Los componentes básicos de un programa de mejora genética son: 1) establecer el objetivo de selección, 2) fijar los criterios de selección, 3) implantar un sistema de control de producción para los candidatos, 4) disponer métodos y herramientas para calcular los EBV de los candidatos, 5) realizar la selección y apareamiento de los mejores animales, y 6) desarrollar una estructura para diseminar la ganancia genética generada en el programa de selección (Elsen, 1988).

Debido a la complejidad del diseño y desarrollo de un programa de mejora genética, se usan métodos matemáticos para modelar (simular) y evaluar diferentes alternativas de programas de mejora genética, antes de su implementación o para optimizar programas existentes (Hill, 1981; Elsen, 1988; Olivier, 2002).

El programa de mejora genética para cabras lecheras en Francia, para las razas Alpina y Saanen por separado, es uno de los más importantes en el mundo desde el punto de vista de su organización, número de animales en control de producción, uso de la inseminación artificial y respuestas anuales a la selección. Está organizado en forma similar a los

programas de vacas lecheras, que tradicionalmente usaban pruebas de progenie para obtener los machos superiores. (Montaldo y Manfredi, 2002; Dubeuf y Boyazoglu, 2009).

A pesar de su éxito, es posible que existan alternativas viables que generen mayor beneficio económico al que actualmente se genera en el programa de mejora genética.

- Las cabras lecheras en Francia

Europa posee 2% de la población caprina en el mundo, y produce 18% de la leche de cabra a nivel mundial (FAO, 2014). Es el único continente donde el sector de cabras lecheras tiene una gran organización, así como importancia económica, especialmente en los países del mediterráneo (Francia, Grecia, Italia y España) (Dubeuf, 2005; Barillet, 2007). La mayor parte de la leche producida es comercializada y convertida principalmente en quesos (Dubeuf, 2005).

Francia ocupa el primer lugar en producción de leche de cabra en Europa, generando el 30% de la producción (Eurostat, 2014). Esto representa el 2.4% del total de la leche producida en Francia (cabra, vaca y oveja). Cuenta con 1,279,000 cabezas de ganado caprino (889,000 cabras), que representan el 10% de la población en Europa (Agreste-Statistique Agricole Annuelle, 2014). De ellas, 300,000 cabras están en control de producción oficial. Las principales razas usadas son Alpina y Saanen, que representan el 59 y 38% de la población total, respectivamente.

Francia desarrolló un sector específico y organizado para las cabras lecheras desde principios de la década de 1950, con la creación de cooperativas y lecherías en la región centro oeste del país (Dubeuf, 2005).

Actualmente el sector de cabras lecheras en Francia está organizado para la selección genética de animales, y el procesamiento y comercialización de quesos (Dubeuf y Boyazoglu, 2009). Esto ha sido resultado de dos factores principales: el crecimiento constante del mercado nacional e internacional de los quesos franceses en los últimos 50 años; y el apoyo que el estado brindó, con regulaciones y financiamientos específicos, a la organización

interprofesional francesa. Esto último fomentó la creación de organizaciones nacionales profesionales (FNEC, Federación de Nacional de Criadores de Cabras; ANICAP Asociación Nacional Interprofesional de Cabras), centros tecnológicos (ITPLC Instituto Tecnológico de los productos de leche de cabra; Centros caprinos en Le Pradel, Carmejane, Surgeres y Niort) y organizaciones para la selección genética y crianza artificial de las razas Alpina y Saanen (CAPGENES) (Dubeuf y col., 2004).

En Francia la industria caprina se maneja a nivel nacional y está presente en la mayoría de las regiones (Dubeuf y col., 2004). La región de Poitou Charentes es la más productiva, con el 35% de la producción de leche de cabra a nivel nacional (Agreste-Statistique Agricole Annuelle, 2014). Más del 90% de la leche de cabra producida en el país es procesada en quesos de alta calidad, donde 84% del queso es procesado por la industria y 16% es procesado por los productores (47% de los productores con 22% de las cabras) (Agreste-Statistique Agricole Annuelle, 2014). El 6% del queso producido tiene denominación de origen protegida o PDO (del inglés *Protected Designation of Origin*), como está establecido en la legislación de la Unión Europea. (Barillet, 2007; Dubeuf y col., 2004).

Desde la década de 1960, el sector caprino en Francia ha estado en constante cambio, a favor de la organización, y la satisfacción del mercado consumidor. Esto no solo ha guiado nuevos logros en la ciencia, sino retos adicionales, como la creciente demanda de leche en la industria especializada en quesos de origen caprino (Boyazoglu y col., 2005). En este aspecto el programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia ha jugado un papel importante al mejorar las características relacionadas con la producción y la calidad de la leche, como los porcentajes de grasa y proteína, en la población.

- Programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia

En la década de 1960, cuando se inició la intensificación de la industria caprina lechera en Francia, la industria caprina lechera se concentró principalmente en el volumen de proteína por cabra, en cualquiera de las razas existentes. Parte de las razas usadas eran locales, las cuales fueron substituidas gradualmente por las razas Alpina y Saanen (Danchin- Burge y

Duclos, 2009). Así, también se inició el control de producción lechero, aunque los pedigríes y los estándares de raza no eran tan importantes como en otras especies (Danchin-Burge y col., 2012).

En la década de 1980, el programa de mejora genética empezó a ser eficiente cuando la inseminación artificial se convirtió en la principal herramienta. Esto sucedió gracias a que la conservación de semen congelado de los machos caprinos se volvió completamente operacional (Danchin-Burge y col., 2012). Los criterios de selección, contenido de grasa y proteína, fueron introducidos gradualmente al definir el índice para todas las características productivas (Piacère y col., 2000).

Actualmente, el índice productivo combinado está conformado por el porcentaje de proteína, volumen total de proteína, porcentaje de grasa y volumen total de grasa. El índice es la suma de las características ponderadas por su valor económico, que son: 1 para volumen total de proteína, 0.4 para porcentaje de proteína, 0.2 para volumen total de grasa y 0.1 para porcentaje de grasa (Danchin-Burge y col., 2012).

Desde 1992, se obtiene el valor genético de los reproductores usando el modelo animal BLUP (del inglés *Best Linear Unbiased Predictor*) de repetibilidad de una característica (Boichard y col., 1992). En 2001, el modelo evolucionó para tomar en cuenta varianzas heterogéneas (Danchin-Burge y col., 2012).

La población caprina se maneja en un sistema piramidal dividido en dos grupos: en primer lugar se encuentran los rebaños del núcleo genético, donde se genera la superioridad genética dentro del programa de mejora genética; y después se encuentran los rebaños comerciales, que usan los reproductores superiores seleccionados en el núcleo.

El programa de mejora genética es exitoso gracias al esfuerzo de los productores y diferentes instituciones. CAPGENES es la compañía acreditada por el Ministerio de Agricultura para coordinar el programa. Los productores poseen y manejan las cabras en la unidad de producción, pero los machos elite pertenecen a CAPGENES. El INRA (Institut National de la Recherche Agronomique o Instituto Nacional de Investigación Agronómica de Francia) y el Institut de l'Élevage (Instituto Pecuario Francés) son responsables de definir los protocolos

para el pedigrí y los registros que se usan para las evaluaciones genéticas, y del cálculo y difusión de los valores genéticos predichos, además supervisan la calidad y el manejo de la base central de datos genéticos. El esfuerzo conjunto de los participantes conduce a tasas importantes de ganancia genética anual (0.16 desviaciones estándar genéticas aditivas (σ_A), en promedio de 2003 a 2012, para las razas Alpina y Saanen) para el índice productivo combinado (IPC) del programa de mejora genética (Palhière y col., 2014).

- Diseño, evaluación y optimización de programas de mejora genética

La forma de obtener el mejor diseño de un programa de mejora genética, bajo condiciones determinadas, es evaluando varias alternativas. Hay tres criterios bajo los que se pueden evaluar: ganancia genética (Shumbusho y col., 2013), beneficio económico (Beneficio económico = Ingresos- Costos) (Weller, 1994; Shumbusho y col., 2015; Dos Santos et. al., 2015), e incremento de la consanguinidad (Weigel, 2001). Cabe mencionar que el término beneficio económico, empleado en este estudio, se usa como sinónimo de *profit*, término usado en inglés (Weller, 1994; Shumbusho et. al., 2015; Dos Santos y col., 2015).

Para evaluar los programas de mejora genética, antes o después de ser implementados, se puede usar la modelación matemática (simulación). En general, hay dos métodos básicos para modelar programas de mejora genética: estocásticos y determinísticos. (Pryce y Daetwyler, 2011)

Los métodos estocásticos permiten modelar programas de mejora genética, a partir de la obtención de valores fenotípicos y genéticos para cada individuo. Este tipo de modelación puede ser muy precisa y permite el cálculo de medias de variación a partir de réplicas. En este método, la complejidad de los programas, la demanda computacional y el tiempo necesario para realizar las simulaciones puede ser muy grande, dependiendo del tamaño de la población y el número de alternativas a evaluar. La modelación estocástica no utiliza explícitamente aspectos como precisión de las evaluaciones genéticas, intervalo generacional, intensidad de selección, etc, que son incluidas en los modelos determinísticos para calcular la respuesta a la selección. Por ello, en la simulación estocástica, es más difícil

comparar los resultados de un programa con los de otros. Por otra parte, utilizando modelación estocástica, es más difícil la optimización de los programas de selección, ya que puede tomar mucho tiempo. (Pryce y Daetwyler, 2011)

Los métodos determinísticos no simulan el programa de mejora genética a nivel de cada individuo, sino que usan ecuaciones para predecir la ganancia genética promedio. Es un método flexible, que generalmente usa menos tiempo computacional, por ello es más fácil comparar un gran número de alternativas. (Pryce y Daetwyler, 2011)

Durante el proceso de modelación se pueden usar una gran cantidad de parámetros y variables de decisión. En un problema de optimización de un programa de mejora genética las variables de decisión son aquellas que se pueden controlar y que están asociadas con los principales factores que determinan la ganancia genética (precisión de la evaluación, intensidad de selección e intervalo generacional) así como el beneficio económico y el costo. Estas variables pueden tomar diferentes valores que dan lugar a muchas combinaciones posibles. Las diferentes combinaciones darán como resultado diferentes valores en la ganancia genética y en el beneficio económico. La optimización de un programa de mejora genética sirve para encontrar la combinación de valores de las variables de decisión que maximice o minimice el criterio escogido para evaluar. (Elsen, 1988; Mulder et al., 2006; Shumbusho y col., 2013)

- Evaluación económica de programas de mejoramiento genético

Cualquier evaluación económica empieza por considerar los ingresos y los costos. (Weller, 1994)

Los programas de mejora genética son una inversión que genera ingresos a largo plazo. En términos económicos el ingreso se puede medir en el cambio esperado o realizado en la producción a causa de la aplicación de un programa de mejora genética. Este cambio en la producción es acumulativo (mejora genética aditiva) y perpetuo. Esto quiere decir que cada cambio generado se suma a los cambios anteriores, y que los cambios logrados se mantienen independientemente de que se siga aplicando el programa de mejora genética. (Weller, 1994)

Los principales costos relacionados con un programa de mejora genética son: recolección de registros, mantenimiento de reproductores, uso de inseminación artificial u otras tecnologías, empleo de apareamientos de prueba (prueba de progenie), y análisis estadísticos. (Weller, 1994)

Los costos totales se definen como el gasto mínimo necesario para producir cada nivel de producción. Los costos fijos son todos los gastos necesarios independientemente del nivel de producción, y los costos variables son los gastos relacionados con el nivel de producción. (Weller, 1994)

Los costos y los ingresos suceden en diferentes tiempos. Es por ello que deben ser calculados con una tasa de interés real, que actualice los valores al año presente. (Weller, 1994)

Una alternativa muy usada para evaluar económicamente los programas de mejora genética es el beneficio económico a largo plazo. El beneficio económico va a ser resultado de:

$$\text{Beneficio económico} = \sum_{t=1}^n \text{Ingreso-Costo}$$

Donde t es el año en el que se aplica el programa de mejora genética para $t=1, 2, 3 \dots n$. (Weller, 1994)

Shumbusho y col. (2013) modelaron y optimizaron el programa actual de mejora genética del núcleo genético de cabras lecheras en Francia, para obtener la máxima ganancia genética anual a largo plazo en el objetivo de selección. Usaron un modelo que describe de forma general el programa de mejora genética, con una metodología básica usada por Rendel y Robertson en 1950.

Sin embargo, no se ha investigado el impacto que tendría optimizar el programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia para obtener el máximo beneficio económico, utilizando una metodología más adecuada.

Por otra parte, resulta importante investigar el impacto que cada variable de decisión tiene en el beneficio económico, para tener una visión más general del funcionamiento de programas de mejora genética en caprinos productores de leche.

Objetivos

- Determinar la combinación de valores de las variables de decisión que generen el máximo beneficio económico en el programa de mejora genética para cabras lecheras en Francia.
- Calcular el beneficio económico adicional que el programa de mejora genética para cabras lecheras en Francia podría obtener al usar valores óptimos en las variables de decisión.
- Describir el impacto que las variables de decisión tienen en el beneficio económico.

Hipótesis

Al probar diferentes valores en las variables de decisión, se identificarán las combinaciones que generen el máximo beneficio económico. Usar éstas combinaciones de valores puede mejorar considerablemente el beneficio económico generado actualmente en el programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia.

Analizar el impacto que tienen las variables de decisión en el beneficio económico puede mejorar la perspectiva del funcionamiento del programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia.

Materiales y métodos

Este estudio se realizó en colaboración con el INRA (Instituto Nacional de Investigación Agronómica de Francia). Parte del proyecto se desarrolló en el laboratorio de Genética, Fisiología y Sistemas Pecuarios (GenPhySE) del INRA, Toulouse, Francia. El Laboratorio de Economía Aplicada (GAEL), INRA, Grenoble, Francia, colaboró en la sección correspondiente.

Para modelar el programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia se desarrolló un programa implementado en Fortran V, incluyendo algunas rutinas de la biblioteca NAG (del inglés *Numerical Algorithms Group*) (Du Croz y Mayes, 1990). Para compilar el programa se usó el software Intel Fortran Compiler en el servidor DGA12 del INRA, que usa un sistema operativo UNIX.

- Programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia

A continuación se describe la población que pertenece al núcleo genético y a los rebaños comerciales. Las cifras por raza se encuentran en el Cuadro 1.

En la Figura 1 se presenta el esquema del programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia. Las cifras mostradas en esta figura, y en los cuadros posteriores a ésta, se obtuvieron de la Base de datos genéticos de cabras en Francia y de CAPGENES.

El núcleo genético está compuesto por 190,000 cabras (120,000 Alpinas y 70,000 Saanen), 13,000 machos de monta natural (8,000 Alpinos y 5,000 Saanen), semen de 112 machos elite (64 Alpinos y 48 Saanen) y 70 machos en prueba de progenie cada año (40 Alpinos y 30 Saanen). El 34% de las cabras son inseminadas artificialmente (40,800 Alpinas y 23,800 Saanen) con los machos elite y con los machos en prueba de progenie cada año, de ambas razas.

En el núcleo genético se llevan a cabo varios tipos de apareamientos:

1) Apareamientos programados con inseminación artificial.

Cada año, alrededor del 4% de las mejores cabras (flecha verde en la Figura 1), con más de una lactancia, son seleccionadas con base en su valor genético predicho o EBV (del inglés Estimated Breeding Value) para el índice total de características. Estas se aparean con los machos elite, que fueron seleccionados con base en su variabilidad genética (Danchin-Burge y col., 2012), y luego con base en su EBV. Cada año se realizan aproximadamente 1000 apareamientos programados, entre los sementales (padres de machos) y cabras (madres de machos) con los mayores EBV para el índice total de características, para obtener 378 machos jóvenes de ambas razas. De ellos, se seleccionan 220 (125 Alpinos y 95 Saanen) machos jóvenes, para entrar al centro de recolección de semen, con base en la salud de su madre y de su rebaño (libres de enfermedades contagiosas, brucelosis, agalactia contagiosa caprina, paratuberculosis, linfadenitis, Scrapie, artritis encefalitis caprina, fiebre Q y clamidiosis). Estos machos permanecen 30 días en cuarentena, y al término se seleccionan 130 (74 Alpinos y 56 Saanen) machos con base en su propia salud. Estos machos seleccionados se entrenan para ser recolectados, y son evaluados con base en la cantidad y calidad de semen producido. Al término de estos procesos de selección, 70 machos (40 Alpinos y 30 Saanen) son aptos para entrar a prueba de progenie (de ambas razas).

Cabe mencionar que todas las cabritas nacidas de los apareamientos programados se usan como reemplazos en el núcleo, y cuando tienen 1 año de edad nacen sus primeros descendientes.

2) Prueba de progenie

Los 70 machos seleccionados (40 Alpinos y 30 Saanen) se aparean aleatoriamente dentro de raza, por inseminación artificial (200 dosis de cada macho), con cabras del núcleo genético, y sus descendientes (80 hijas por cada macho) nacen cuando ellos tienen 2 años de edad. Todas las cabritas nacidas de estos apareamientos permanecen como reemplazos en el núcleo genético, para usar el registro de su primera lactancia en la evaluación de su padre. Mientras tanto, los machos en prueba de progenie son colectados hasta obtener alrededor de

3400 dosis más de semen por macho, para luego ser sacrificados. Una vez que se tienen los registros de 80 hijas por macho (de las características del índice total), se usan para calcular el EBV de los machos. Ese EBV se usa para seleccionar el mejor 40% de los machos (28 machos, 16 Alpinos y 12 Saanen), que reemplazarán los machos elite más viejos.

Una vez que forman parte de los machos elite, sus primeros descendientes nacen cuando ellos tienen 5 años de edad. Permanecen 3 años más en promedio como machos elite, antes de ser reemplazados.

3) Otros apareamientos con inseminación artificial.

Además de las hembras usadas en los apareamientos programados y las hembras apareadas con los machos en prueba de progenie, se usan otras hembras del núcleo para ser apareadas aleatoriamente con el mejor 75% de los machos elite (padres de machos para monta natural). Los cabritos nacidos se usan como reemplazo de los machos para monta natural del núcleo y de los rebaños comerciales. Todas las cabritas son usadas como reemplazos en el núcleo.

4) Servicio natural

El resto de las cabras del núcleo, y las cabras que no quedaron gestantes por inseminación artificial en los otros apareamientos, se aparean con machos para monta natural del núcleo. Las cabritas nacidas se usan como reemplazos en el núcleo y en los rebaños comerciales.

Los machos de monta natural en el núcleo y en los rebaños comerciales tienen aproximadamente 1 año de edad cuando nacen sus primeros descendientes, y permanecen 3 años más en servicio, antes de ser reemplazados.

Los rebaños comerciales están compuestos de 610,000 cabras y 47,000 machos de monta natural.

La manera de diseminar la mejora genética, del núcleo a los rebaños comerciales, es vendiendo el material genético mejorado en diferentes formas, cada año:

- 5) 40,000 cabritas nacidas en el núcleo (provenientes de monta natural), que son usadas como reemplazos en los rebaños comerciales.
- 6) 15,000 dosis de semen, que son usadas en las hembras de los rebaños comerciales, y producen alrededor de 5670 cabritas y 5670 cabritos. Estos cabritos (as) se usan como reemplazos en los rebaños comerciales. Las dosis de semen del 30% mejor, para el índice total de características, de los machos elite no es usada en estos apareamientos.
- 7) 4,000 cabritos para monta natural nacidos en el núcleo, que se usan como reemplazos en los rebaños comerciales.

Los reemplazos faltantes en los rebaños comerciales, tanto de hembras como de machos para monta natural, provienen de los apareamientos realizados con monta natural en los rebaños comerciales.

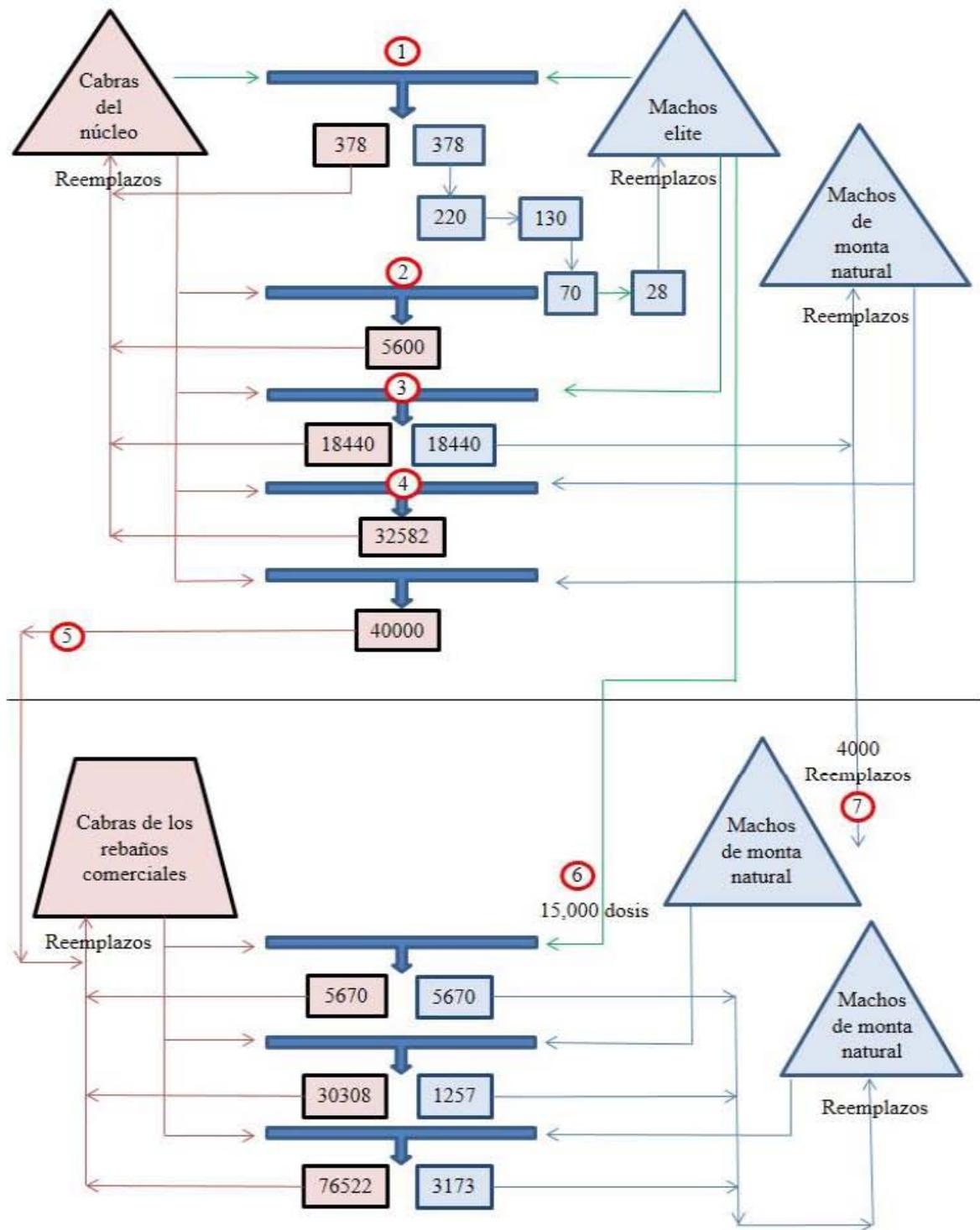


Figura 1. Esquema del programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia.

El programa de mejora genética es aplicado a dos razas (Alpina y Saanen) por separado. En el Cuadro 1 se presentan las cifras más importantes para cada raza.

Cuadro 1. Cifras por raza del programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia

Concepto	Alpina	Saanen
Número de cabras en el núcleo	120000	70000
Número de cabras inseminadas en el núcleo cada año	40000	25000
Número de cabras reemplazadas en el núcleo cada año	36000	21000
Número de machos que entran a prueba de progenie cada año	40	30
Número de padres de machos	20	22
Número de machos para monta natural en el núcleo	8000	5000
Número de machos para monta natural reemplazados cada año en el núcleo	2400	1500
Número de cabras en los rebaños comerciales	370000	240000
Número de cabras reemplazadas en los rebaños comerciales cada año	24000	16000
Número de machos para monta natural en los rebaños comerciales	29000	18000
Número de machos para monta natural reemplazados cada año en los rebaños comerciales	8700	5400
Fracción de cabras seleccionadas para ser madres de machos	0.04	0.04
Fracción de machos elite seleccionados para ser padres de machos	0.73	0.92
Fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite cada año	0.4	0.4
Fracción de machos elite seleccionados para ser padres de machos para monta natural	0.75*	0.75*
Fracción de machos elite usados en los rebaños comerciales por medio de inseminación artificial	0.7 peor*	0.7 peor*
Fracción de machos elite seleccionados con base en su variabilidad genética	0.43	0.5

*Existe una cantidad de machos que pueden usarse en el núcleo y en los rebaños comerciales

- Modelo del programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia

El programa de mejora genética se modeló para una característica sintética (Elsen, 1988) con una $h^2 = 0.3$ y una repetibilidad = 0.5, con los mismos pesos económicos que los del índice productivo combinado para ambas razas para las características consideradas (porcentaje de proteína, volumen total de proteína, porcentaje de grasa y volumen total de grasa) (Danchin-Burge y col., 2012).

Los parámetros y las variables de decisión usadas en el modelo del programa de mejora genética se presentan en el Cuadro 2. Las relaciones entre los parámetros, las variables de decisión y las variables internas del modelo se encuentran en el Cuadro 3.

En éste estudio se modeló un programa de mejora genética que representa en promedio los programas aplicados a las razas Alpina y Saanen. Aunque existen diferencias en los programas de ambas razas, en éste estudio se hace una aproximación que se puede aplicar a cualquiera de los dos programas.

- Modelo de selección

Se usaron los métodos determinísticos descritos por Hill (1974), Elsen y Mocquot (1974) y Elsen y Mocquot (1976) para modelar la selección y predecir la ganancia genética a corto plazo con generaciones superpuestas.

Los machos y hembras de los rebaños del núcleo y de los rebaños comerciales se dividieron en categorías dependiendo del sexo, edad y nivel genético (Hill, 1974; Elsen y Mocquot, 1974; Ducrocq y Quass, 1988). Las categorías se presentan en el Cuadro 4.

Cada año, durante 50 años, se calcularon los valores genéticos esperados de cada categoría.

Para ello se usó un método matricial (Hill, 1974; Elsen y Mocquot, 1974; Ducrocq y Quass, 1988):

$$x_t = D_t * x_{t-1} + v_t$$

Donde \mathbf{x}_t es el vector de valores genéticos esperados de cada categoría en el año t , \mathbf{D}_t es la matriz de transición que permite el paso del año $t-1$ al año t , y \mathbf{v}_t es el vector de diferenciales de selección correspondiente a cada categoría en el año t .

El valor inicial de los valores genéticos de todas las categorías fue cero.

Las ecuaciones detalladas para calcular el valor genético de cada categoría se encuentran en el Anexo I.

Cuadro 2. Parámetros y variables de decisión del programa de mejora genética

Parámetros	Nombre	Valor
Demográficos		
Número de cabras en el núcleo	NT	190,000
Tasa anual de mortalidad de cabras adultas	m	0.1
Número de años que las cabras permanecen en servicio, luego de su primer lactancia	tf	4
Fracción de cabras seleccionadas con base en su EBV para ser madres de machos en el programa actual	perDS	0.04
Número de madres de machos en el programa actual	normDS	1,000
Tasa de fertilidad cuando se usa inseminación artificial	fertai	0.6
Prolificidad	prolif	1.8
Tasa de supervivencia hasta la madurez	sur	0.7
Proporción de sexo	sr	0.5
Fracción de cabras reemplazadas en el núcleo	replac	0.3
Número máximo de machos que entran al centro de recolección de semen cada año	maxp	240
Número máximo de machos entrenados para ser recolectados	maxt	140
Número de machos de monta natural en el núcleo, en el programa actual	nNS	13,000
Fracción de machos elite seleccionada con base en su variabilidad genética (candidatos a ser padres de machos)	pervar	0.4286
Número de padres de machos seleccionados con base en su EBV cada año	NSS	40
Fracción de machos elite seleccionada para ser padres de machos de monta natural	Amns	0.75
Número de machos de monta natural en los rebaños comerciales	tcns	47,000
Fracción de machos de monta natural reemplazada cada año	cnsrep	0.3
Número de machos de monta natural, nacidos en el núcleo, vendidos a los rebaños comerciales	nssold	4,000
Número de dosis de semen vendidas a los rebaños comerciales cada año	dosiss	15,000
Número total de cabras en la población	TOTALF	800,000
Fracción de cabras reemplazadas cada año en los rebaños comerciales	creplac	0.25
Número de cabritas que el núcleo vende a los rebaños comerciales cada año	nfems	40,000
Fracción de machos de monta natural en el primer año de servicio	alphans ₁	0.34

Cuadro 2. Continuación

Parámetros	Nombre	Valor
Demográficos		
Fracción de machos de monta natural en el segundo año de servicio	alphans ₂	0.26
Fracción de machos de monta natural en el tercer año de servicio	alphans ₃	0.21
Fracción de machos de monta natural en el cuarto año de servicio	alphans ₄	0.19
Número máximo de dosis producidas por macho elite	dmax	5000
Genéticos		
Heredabilidad	h ²	0.3
Repetibilidad	rep	0.5
Desviación estándar genética aditiva	σ_A	1
Variables de decisión		
Número de machos que entran al centro de colección de semen cada año	mp	220
Número de machos que entran a prueba de progenie cada año	bpt	70
Número de hijas por macho en prueba de progenie	dpt	80
Fracción de cabras inseminadas en el núcleo cada año	AIper	0.34
Fracción de machos con prueba de progenie seleccionada para ser elite	perpt	0.4
Número de años que los machos elite permanecen en servicio	ny	4
Número de dosis de semen de machos elite en el primer año de servicio, usadas cada año	dss ₁	1400
Número de dosis de semen de machos elite en el segundo año de servicio, usadas cada año	dss ₂	1000
Número de dosis de semen de machos elite en el tercer año de servicio, usadas cada año	dss ₃	500
Número de dosis de semen de machos elite en el cuarto año de servicio, usadas cada año	dss ₄	500

Cuadro 3. Relaciones entre los parámetros, las variables de decisión y las variables internas del modelo

Variables dependientes	Nombre	Fórmula*
Fracción de cabras de la edad i en la población, para i=0, 1, 2, 3, 4	wt _i	$wt_i = \frac{(1-m)^i}{\sum_{i=0}^{tf} (1-m)^i}$
Fracción de cabras candidatas a ser madres de machos de la edad i, para i=1, 2, 3, 4	w _i	$w_i = \frac{wt_i}{\sum_{i=1}^{tf} wt_i}$
Número total de candidatas para ser madres de machos	nofem	$nofem = \sum_{i=1}^{tf} wt_i * NT$
Número de cabras seleccionadas con base a su EBV en el programa actual	femDS	femDS=perDS*nofem
Fracción de ajuste previo a la selección de madres de machos en el programa actual	perDS2	perDS2=normDS/femDS
Fracción de machos, provenientes de los apareamientos programados, que entran al centro de colección de semen en el programa actual	perenterpt	$perenterpt = \frac{mp}{normDS * fertai * prolif * sur * sr}$
Número de madres de machos dependiente del número de machos que entran al centro de colección de semen	DS	$DS = \left(\frac{\widehat{mp}}{perenterpt} \right) / (fertai * prolif * sur * sr)$
Número de cabras seleccionadas con base en su EBV	candDS	$candDS = \frac{DS}{perDS2}$
Número de cabritas nacidas en los apareamientos programados	dsd	dsd=DS*fertai*prolif*sur*sr

*Ver el Cuadro 2 para abreviaturas de parámetros y variables de decisión

Cuadro 3. Continuación

Variables dependientes	Nombre	Fórmula
Número de cabritas nacidas de los apareamientos para prueba de progenie	tdpt	$nreplac - dsd \geq tdpt = \widehat{dpt} * \widehat{bpt}$
Número de cabras apareadas con machos en prueba de progenie	gpt	$gpt = \frac{tdpt}{fertai * prolif * sur * sr}$
Número de cabras inseminadas en el núcleo cada año	tngai	$tngai = NT * \widehat{AIper}$
Número de cabras inseminadas en el núcleo cada año (aparte de las cabras de apareamientos programados y para prueba de progenie)	ngai	$ngai = tngai - DS - gpt$
Número de hijas de cabras inseminadas en el núcleo (aparte de las hijas de cabras de apareamientos programados y para prueba de progenie)	dai	$dai = \frac{ngai}{fertai * prolif * sur * sr}$
Número de cabras reemplazadas en el núcleo cada año	nreplac	$nreplac = NT * replac$
Número de reemplazos de cabras del núcleo provenientes de apareamientos con monta natural	nsd	$nsd = nreplac - dsd - tdpt - dai$
Número de hijas de machos elite	delite	$delite = dsd + dai$
Fracción de cabras seleccionadas con base en su EBV para ser madres de machos	A	$A = canDS / nofem$
Fracción de dosis de semen de machos elite en el i año de servicio, usadas cada año	wme _i	$wme_i = \frac{\widehat{dss}_i}{\sum_{i=1}^{\widehat{ny}} \widehat{dss}_i}$
Número de machos elite	Nelite	$Nelite = bpt * perpt * ny$
Número de candidatos para ser padres de machos	eliteSS	$eliteSS = Nelite * pervar$

$\widehat{}$ es el valor nuevo dado a la variable de decisión

Cuadro 3. Continuación

Variables dependientes	Nombre	Fórmula
Fracción de machos elite seleccionada con base en su EBV para ser padres de machos	Ame	$0 \leq (Ame = NSS/eliteSS) \leq 1$
Número de reemplazos de machos de monta natural de los rebaños comerciales	ncnsrep	$ncnsrep = tcns * cnsrep$
Número de reemplazos de machos de monta natural de los rebaños comerciales provenientes de cabritos nacidos en los rebaños comerciales	nsbcf	$nsbcf = ncnsrep - nssold$
Número de reemplazos de cabras/machos de los rebaños comerciales provenientes de inseminación artificial realizada en los rebaños comerciales	ains	$ains = dosiss * fertai * sur * prolif * sr$
Número reemplazos de machos de monta natural de los rebaños comerciales provenientes de apareamientos con monta natural en los rebaños comerciales	nsns	$nsns = nsbcf - ains$
Número de cabras en los rebaños comerciales	NTC	$NTC = TOTALF * NT$
Número de reemplazos de cabras de los rebaños comerciales	ncrep	$ncrep = NTC * creplac$
Número de reemplazos de cabras de los rebaños comerciales provenientes de apareamientos con monta natural en los rebaños comerciales	dbcf	$dbcf = ncrep - nfems - ains$
Fracción de machos de monta natural de los rebaños comerciales nacida en el núcleo	wnss	$wnss = \frac{nssold}{ncnsrep}$
Fracción de machos de monta natural de los rebaños comerciales nacidos en los rebaños comerciales	wnsc	$wnsc = \frac{nsbcf}{ncnsrep}$
Número de reemplazos de cabras de los rebaños comerciales nacidas en los rebaños comerciales	wfbc	$wfbc = ncrep - nfems$

∧ es el valor nuevo dado a la variable de decisión

Cuadro 3. Continuación

Variables dependientes	Nombre	Fórmula
Número de machos de monta natural de los rebaños comerciales nacidos en los rebaños comerciales	NSCF	$NSBN = tcns * wnss$
Número de machos de monta natural de los rebaños comerciales nacidos en el núcleo	NSBN	$NSCF = tcns * wnsc$
Número de reemplazos de machos de monta natural de los rebaños comerciales provenientes de machos de monta natural nacidos en el núcleo	rmnsbn	$rmnsbn = nsns * wnss$
Número de reemplazos de machos de monta natural de los rebaños comerciales provenientes de machos de monta natural nacidos en los rebaños comerciales	rmnscf	$rmnscf = nsns * wnsc$
Número de reemplazos de cabras de los rebaños comerciales provenientes de machos de monta natural nacidos en el núcleo	rfnsbn	$rfnsbn = dbcf * wnss$
Número de reemplazos de cabras de los rebaños comerciales provenientes de machos de monta natural nacidos en los rebaños comerciales	rfnscf	$rfnscf = dbcf * wnsc$
Fracción de machos que entraron al centro de colección de semen seleccionados para ser entrenados en el programa actual	phealth	$phealth = \frac{\max t}{\max p}$
Número de machos entrenados para ser colectados cada año	mt	$mt = \widehat{m\hat{p}} * phealth$
Número de dosis de semen usadas para la prueba de progenie por macho	dsbpt	$dsbpt = \frac{gpt}{\widehat{bpt}}$
Número de dosis de semen producidas por macho	ndosis	$dmax \geq ndosis = \widehat{dss}_1 + \widehat{dss}_2 + \widehat{dss}_3 + \widehat{dss}_4 + dsbpt$
Número de dosis usadas cada año	tndu	$tndu = NT * \widehat{A\hat{I}per} + dosiss$

$\widehat{\quad}$ es el valor nuevo dado a la variable de decisión

Cuadro 3. Continuación

Variables dependientes	Nombre	Fórmula
Número de dosis disponibles cada año	tadpy	$tndu \leq tadpy = \widehat{bpt} * \widehat{perpt} * (ndosis - dsbpt) + dsbpt * \widehat{bpt}$
Número de cabras apareadas con machos de monta natural en el núcleo en el programa actual	nfmns	$nfmns = NT - (NT * AI_{per} * fertai)$
Número de cabras por macho de monta natural en el núcleo en el programa actual	NSpf	$NS_{pf} = \frac{nfmns}{nNS}$
Número de cabras apareadas con machos de monta natural en el núcleo dependiendo de la fracción de hembras inseminadas	fmns	$fmns = NT - (NT * \widehat{AI}_{per} * fertai)$
Número de machos de monta natural en el núcleo dependiendo del número de hembras apareadas con machos de monta natural	NS	$NS = \frac{fmns}{NS_{pf}}$
Número de cabras necesarias para producir los reemplazos de machos de monta natural cada año	gns	$gns = (NS * cnsrep) / (fertai * prolif * sur * sr)$
Número de cabras disponibles para producir los reemplazos de machos de monta natural cada año	ngai	$gns \leq ngai = tngai - DS - gpt$

$\widehat{}$ es el valor nuevo dado a la variable de decisión

Cuadro 4. Categorías de animales en el modelo

Categorías	Sexo	Nivel genético	Edad en la que nace su progenie
X ₁	Femenino	Núcleo	Recién nacidas
X ₂	Femenino	Núcleo	1
X ₃	Femenino	Núcleo	2
X ₄	Femenino	Núcleo	3
X ₅	Femenino	Núcleo	4
X ₆	Femenino	Núcleo	5
X ₇	Femenino	MN ¹ núcleo	Recién nacidos
X ₈	Masculino	MN núcleo	1
X ₉	Masculino	MN núcleo	2
X ₁₀	Masculino	MN núcleo	3
X ₁₁	Masculino	MN núcleo	4
X ₁₂	Masculino	MI ²	Recién nacidos
X ₁₃	Masculino	ME ³	1
X ₁₄	Masculino	PP ⁴	2
X ₁₅	Masculino	PP	3
X ₁₆	Masculino	PP	4
X ₁₇	Masculino	Elite	5
X ₁₈	Masculino	Elite	6
X ₁₉	Masculino	Elite	7
X ₂₀	Masculino	Elite	8
X ₂₁	Femenino	RC ⁵	Recién nacidas
X ₂₂	Femenino	RC	1
X ₂₃	Femenino	RC	2
X ₂₄	Femenino	RC	3
X ₂₅	Femenino	RC	4
X ₂₆	Femenino	RC	5

¹MN=Monta natural

²MI=Machos que ingresaron al centro de colección de semen

³ME=Machos entrenados para ser colectados

⁴PP=Prueba de progenie

⁵RC=Rebaños comerciales

Cuadro 4. Continuación

Categorías	Sexo	Nivel genético	Edad en la que nace su progenie
X ₂₇	Masculino	MNN ⁶	Recién nacidos
X ₂₈	Masculino	MNN	1
X ₂₉	Masculino	MNN	2
X ₃₀	Masculino	MNN	3
X ₃₁	Masculino	MNN	4
X ₃₂	Masculino	MNRC ⁷	Recién nacidos
X ₃₃	Masculino	MNRC	1
X ₃₄	Masculino	MNRC	2
X ₃₅	Masculino	MNRC	3
X ₃₆	Masculino	MNRC	4

⁶MNN=Monta natural de los rebaños comerciales nacidos en el núcleo

⁷MNRC=Monta natural nacidos en los rebaños comerciales

El diferencial de selección, generado cada año por la selección genética en una determinada categoría, se calculó de la siguiente forma:

$$v_j = i_j * r_j * \sigma_A$$

Donde v_j es el diferencial de selección para la categoría j , i es la intensidad de selección para la categoría j , r es la precisión de la evaluación en la categoría j y σ_A es la desviación estándar genética aditiva.

- Intensidad de selección

Se usaron métodos de integración numérica para calcular las intensidades de selección.

En los machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite, la intensidad de selección se calculó de la siguiente forma:

$$i = \frac{\phi(K)}{\alpha}$$

Donde i es la intensidad de selección, $\phi (\cdot)$ es la densidad estándar de la distribución normal, K es el punto de truncación, y α es la fracción seleccionada (Ducrocq y Quass, 1988).

En las categorías que son parte de una subpoblación con generaciones traslapadas (cabras del núcleo seleccionadas para ser madres de machos, machos elite seleccionados para ser padres de machos, machos elite seleccionados para ser padres de machos para monta natural y machos elite seleccionados para ser usados en los rebaños comerciales), se usó el método de selección con un punto único de truncación a través de distribuciones multinormales de sus valores genéticos predichos (Elsen y Mocquot, 1976; Ducrocq y Quass, 1988). Éste método maximiza la superioridad genética de los reproductores seleccionados, considerando que los animales más jóvenes son genéticamente superiores que los viejos, pero con una precisión menor. La intensidad de selección de la categoría j , perteneciente a la subpoblación s se calculó de la siguiente manera:

$$i_{js} = \frac{\phi \left(\frac{K_s - X_{js}}{r_{js}} \right)}{1 - \Phi \left(\frac{K_s - X_{js}}{r_{js}} \right)}$$

Donde i_{js} es la intensidad de selección para la categoría j de la subpoblación s , $\phi (\cdot)$ es la densidad estándar de la distribución normal, $\Phi (\cdot)$ es la función de la distribución normal acumulada, K es el punto único de truncación correspondiente a cada subpoblación s , X_{js} es el valor genético esperado de la categoría j de la subpoblación s y r es la precisión en la evaluación de la categoría j de la subpoblación s .

El método iterativo para encontrar el punto único de truncación de cada subpoblación esta descrito por Ducrocq y Quass (1988).

Las funciones G01EAF y G01FAF, de la biblioteca NAG, se usaron para obtener un valor preciso de la integración numérica.

- Precisión de la evaluación

Los machos con prueba de progenie y los machos elite se evaluaron con base en los registros de 80 hijas. La precisión de su evaluación es (Van Vleck y col., 1987):

$$r = \sqrt{\frac{p}{p + (4 - h^2) / h^2}}$$

Donde r es la precisión de la evaluación de los machos, p es el número de hijas de cada macho y h^2 es la heredabilidad de la característica.

Las cabras seleccionadas para ser madres de machos se evaluaron con base en sus propios registros. Por lo tanto la precisión de su evaluación es (Van Vleck, 1987):

$$r = \sqrt{\frac{n h^2}{1 + (n - 1) re}}$$

Donde r es la precisión de la evaluación de las cabras, n es el número de registros para $n = 1, 2, 3, 4$, h^2 es la heredabilidad de la característica y re es la repetibilidad de la característica.

- Cálculo de ingreso, costo y beneficio económico del programa de mejora genética

- Ingreso

Se usaron los valores genéticos esperados de las cabras del núcleo y de los rebaños comerciales, que tienen 1 a 5 años de edad. Estos valores son los que expresan la mejora genética del programa cada año, ya que es una característica productiva lechera, y solo se manifiesta en las hembras. El ingreso fue expresado en euros.

$$\text{Ingreso en el núcleo} = \sum_{t=1}^{50} \sum_{i=2}^6 X_{it} * eur * NN_i * \left(\frac{1}{1+d}\right)^t$$

$$\text{Ingreso en los rebaños comerciales} = \sum_{t=1}^{50} \sum_{i=22}^{26} X_{it} * eur * NN_i * \left(\frac{1}{1+d}\right)^t$$

$$\text{Ingreso} = \text{Ingreso en el núcleo} + \text{Ingreso en los rebaños comerciales}$$

Donde X_{it} es el valor genético esperado de la categoría i en el año t , expresado en desviaciones estándar genéticas, eur es el valor en euros de una desviación estándar genética del índice productivo combinado (80.00 euros) (Phocas y col., 1998), NN_i es el número de animales que expresa el valor genético esperado de la categoría i (cabras del núcleo y de los rebaños comerciales de 1 a 5 años de edad) y d es la tasa de interés real (0.05) (Hill, 1981). (Shumbusho y col., 2014)

- Costo

Para calcular los costos, solo se usaron los asociados con las variables de decisión, y fueron considerados a largo plazo. (Shumbusho y col., 2013; Shumbusho y col., 2015)

Entre los costos considerados están:

- 1) Costo por macho comprado para el centro de colección de semen (750.00 euros)
- 2) Costo por macho entrenado para colección de semen (1500.00 euros)
- 3) Costo por coleccionar una dosis de semen por macho (2.32 euros)
- 4) Costo por preservar una dosis de semen congelada por año (0.15 euros)
- 5) Costo por aplicar una dosis de semen (7.00 euros)
- 6) Costo por mantener un macho de monta natural por año (65.00 euros)

Estos costos fueron calculados y proporcionados por CAPGENES. Estos incluyen el material, la mano de obra, etc.

En general, el costo generado durante el tiempo en que se aplicó el programa de mejora genética se calculó de la siguiente manera:

$$Costo = \sum_{t=1}^{50} \sum_{i=1}^6 N_{it} * C_{it} * \left(\frac{1}{1+d}\right)^t$$

Donde N_i es el número de veces que el costo i se genera en el año t , C_{it} es el valor del costo i en el año t , expresado en euros, y d es la tasa de interés real (0.05) (Hill, 1981). (Shumbusho y col., 2014)

Los costos de los primeros años de la aplicación del programa de mejora genética no son constantes, ya que varían de acuerdo al nivel de implementación del programa. Las ecuaciones detalladas sobre el cálculo de los costos se encuentran en el Anexo II.

- Beneficio económico

El beneficio económico, expresado en euros, se calculó de la siguiente manera: (Weller, 1994; Shumbusho y col., 2015; Dos Santos y col., 2015)

$$Beneficio\ económico = Ingreso - Costo$$

Éste cálculo del beneficio económico ya considera los valores actuales en el cálculo del ingreso y del costo del programa de mejora genética.

- Valores de prueba de las variables de decisión

Una vez que se obtuvo el modelo del programa de mejora genética actual, se probaron diferentes valores en las nueve variables de decisión para calcular la ganancia genética anual estabilizada (del penúltimo año al último año), el ingreso, el costo y el beneficio económico. Las variables de decisión estudiadas y sus respectivos valores de prueba fueron:

1. Número de machos en prueba de progenie: 35, 70, 105 y 140
2. Número de hijas por macho en prueba de progenie: 40, 80, 120 y 160
3. Número de años en servicio de los machos elite: 1, 2, 3 y 4

4. Fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite: 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8
5. Fracción de cabras inseminadas en el núcleo: 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 y 0.9
6. Número de dosis usadas durante el primer año de servicio de un macho elite: 500, 1000, 1500 y 2000
7. Número de dosis usadas durante el segundo año de servicio de un macho elite: 500, 1000, 1500 y 2000
8. Número de dosis usadas durante el tercer año de servicio de un macho elite: 500, 1000, 1500 y 2000
9. Número de dosis usadas durante el cuarto año de servicio de un macho elite: 500, 1000, 1500 y 2000

El número de combinaciones probadas fue de 458,752, pero al considerar límites demográficos y biológicos en las variables de decisión y dependencias entre estas (por ejemplo en el número de dosis usadas durante cada año de servicio de un macho elite), se obtuvo resultado de 39,862 combinaciones realmente posibles.

- Máximo beneficio económico

Se identificaron el programa con la combinación de valores de las variables de decisión que generó el máximo beneficio económico, y el programa con la combinación de valores que generó el máximo beneficio económico pero con la fracción de cabras inseminadas en el núcleo restringida a 0.4. Esta última alternativa, que restringe la inseminación artificial a un nivel similar al que se usa actualmente, se tomó en cuenta por que la inseminación artificial en pequeños rumiantes aún está limitada por varios factores, y adoptar un nivel óptimo de inseminación artificial en la práctica podría ser difícil.

- Impacto de las variables de decisión en beneficio económico de cada programa

Para analizar el impacto de cada variable de decisión en el beneficio económico, se modificó el valor de cada una de las variables de decisión a la vez, mientras que los valores de las otras variables de decisión permanecieron fijos (como se muestra en el Cuadro 5), en los tres programas de mejora genética: 1) programa de mejora genética actual de cabras lecheras en Francia, 2) programa de mejora genética con máximo beneficio económico y 3) programa de mejora genética con máximo beneficio económico con la inseminación artificial restringida a 0.4 en el núcleo.

El valor de la variable de decisión número de años en servicio de los machos elite no se pudo modificar individualmente en ninguno de los 3 programas. Para obtener el impacto en el beneficio económico al modificar el número de años en servicio de los machos elite, se modificaron los valores de dos variables de decisión al mismo tiempo: el valor del número de años en servicio de los machos elite y el valor de la fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite. Los valores del resto de las variables de decisión permanecieron fijos.

Resultados

- Modelo del programa mejora genética

La ganancia genética anual estabilizada (del año 11 al año 50) que se obtuvo con el modelo del programa de mejora genética actualmente utilizado en Francia fue de 0.166 desviaciones estándar genéticas aditivas.

En la Figura 2 se muestran los valores genéticos esperados de las categorías de cabras recién nacidas del núcleo (X_1) y de los rebaños comerciales (X_{21}) generados cada año en el modelo.

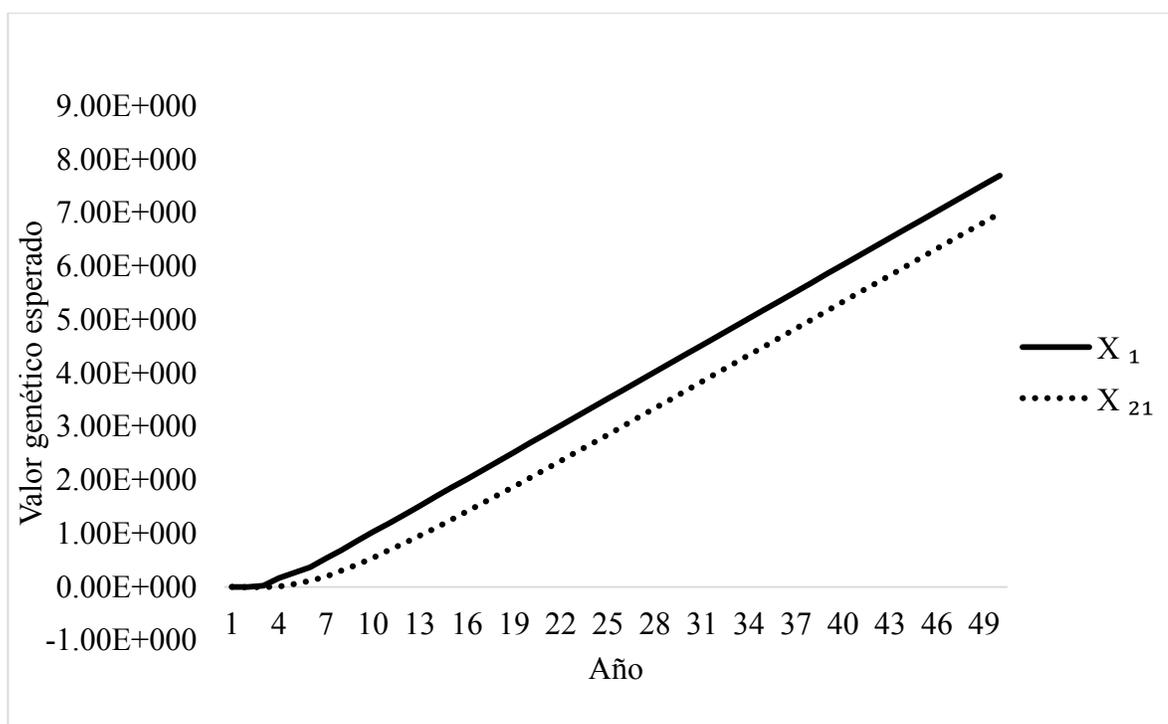


Figura 2. Valores genéticos esperados en las categorías de cabras recién nacidas del núcleo (X_1) y de los rebaños comerciales (X_{21}) generados cada año en el modelo.

- Máximo beneficio económico

En el Cuadro 5 se presentan los valores de las variables de decisión, la ganancia genética anual estabilizada (del año 49 al 50), ingreso, costo y beneficio económico para los siguientes programas modelados: 1) programa de mejora genética actual de cabras lecheras en Francia, 2) programa de mejora genética con máximo beneficio económico y 3) programa de mejora genética con máximo beneficio económico con la inseminación artificial restringida a 0.4 en el núcleo.

Cuadro 5. Resultados económicos para el programa actual y los dos programas con mayores beneficios

Pr	pp	hpp	y	pp_e	IA	dss1	dss2	dss3	dss4	gge	ingreso*	costo*	beneficio*
1	70	80	4	0.4	0.3	1,400	1,000	500	500	0.16	1,800	38	1,762
2	140	120	4	0.2	0.8	2,000	1,500	500	500	0.23	2,616	64	2,552
3	140	80	4	0.2	0.4	2,000	500	500	500	0.19	2,236	54	2,182

Pr = Programa de mejora genética

pp = Número de machos en prueba de progenie

hpp = Número de hijas por macho en prueba de progenie

y = Número de años en servicio de los machos elite

pp_e = Fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite

IA = Fracción de cabras inseminadas en el núcleo

dss1 = Número de dosis usadas durante el primer año de servicio de un macho elite

dss2 = Número de dosis usadas durante el segundo año de servicio de un macho elite

dss3 = Número de dosis usadas durante el tercer año de servicio de un macho elite

dss4 = Número de dosis usadas durante el cuarto año de servicio de un macho elite

gge = Ganancia genética anual estabilizada (desviaciones estándar genéticas)

*Valor en millones de euros

El programa de mejora genética con máximo beneficio económico incrementó el beneficio económico en 790 millones de euros, mientras que el programa de mejora genética con máximo beneficio económico que restringe la inseminación artificial incrementó el beneficio económico en 420 millones de euros, ambos con respecto al modelo del programa actual.

- Influencia de las variables de decisión en el beneficio económico de cada programa

En las siguientes Figuras (3-10), se muestra el impacto en el beneficio económico (en 50 años), al modificar el valor de cada una de las variables de decisión, mientras que los valores de las otras variables de decisión permanecen fijos (como se mostró en el Cuadro 5), en los tres programas de mejora genética (descritos en la página anterior). En algunas Figuras no se presentan todos los valores posibles de la variable de decisión, debido a que los límites establecidos en las ecuaciones no permitieron modificar dichos valores.

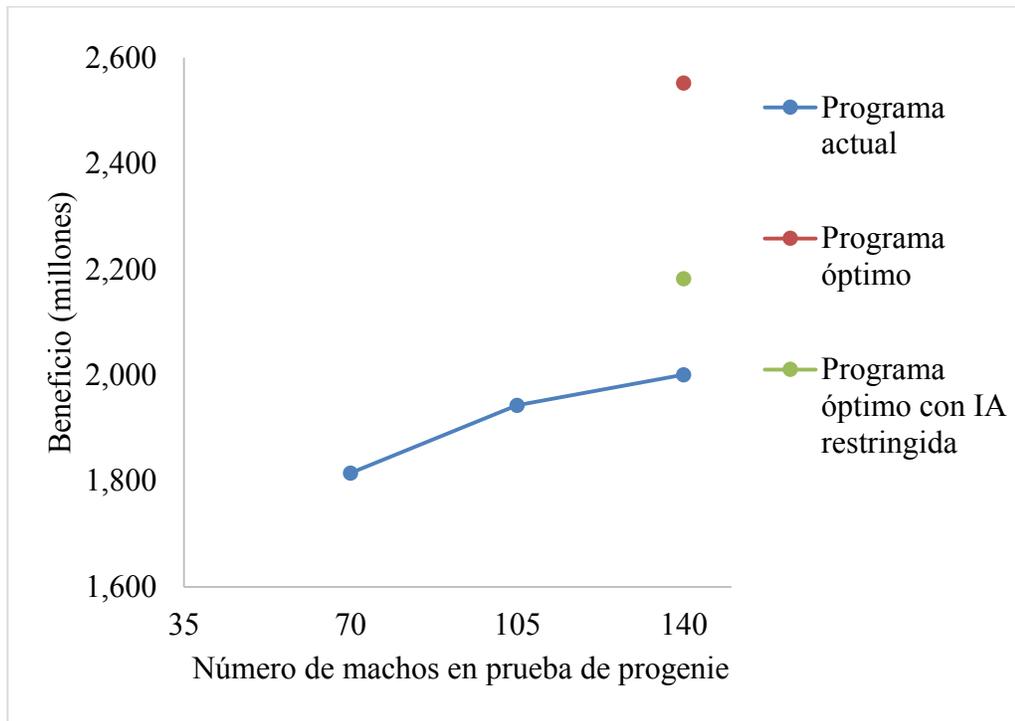


Figura 3. Beneficio económico generado al modificar el número de machos en prueba de progenie.

El beneficio económico aumenta 0.16% en promedio, al aumentar un macho para prueba de progenie en el programa 1, es decir 3 millones de euros por macho.

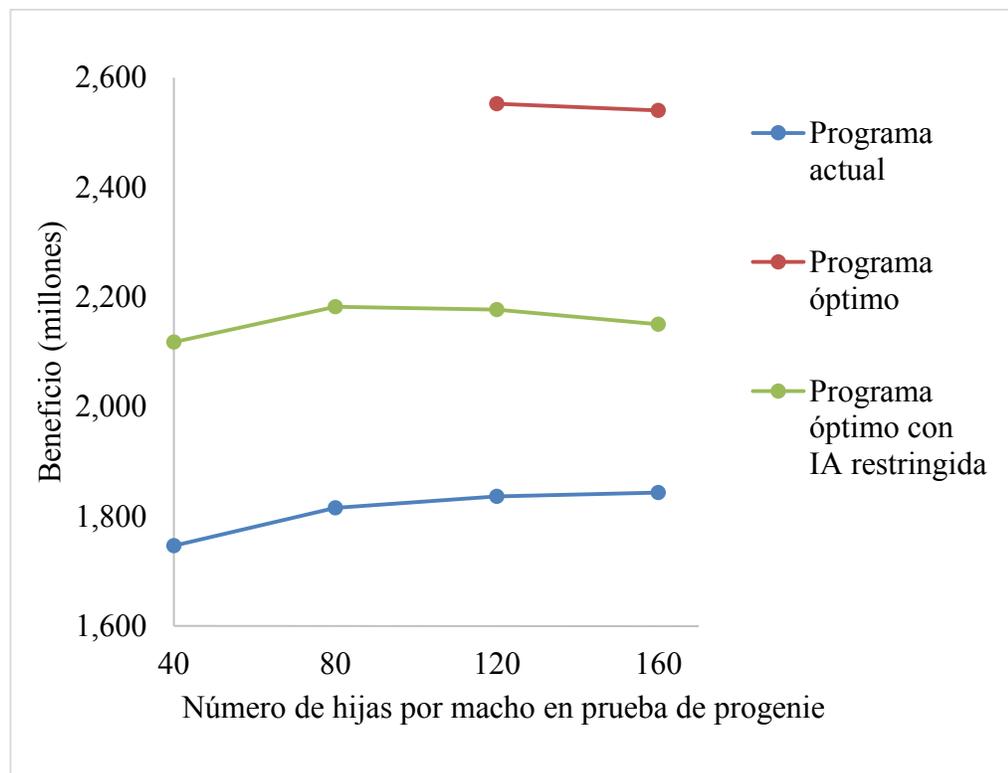


Figura 4. Beneficio económico generado al modificar el número de hijas por macho en prueba de progenie.

En los programas 1 y 3, al cambiar de 80 a 40 hijas, el beneficio disminuye en 0.09% y 0.07% en promedio por hija, es decir 1.7 y 1.6 millones de euros por hija, respectivamente. En el programa 1, al cambiar el número de hijas de 80 a 160, el beneficio aumenta en 0.02% en promedio por hija, es decir 410 mil euros por hija. En los programas 2 y 3, el cambio de 120 a 160 hijas y de 80 a 160 hijas, disminuye el beneficio en 0.011% y 0.014% en promedio por hija por macho en prueba, es decir 299 mil euros y 306 mil euros por hija por macho en prueba, respectivamente.

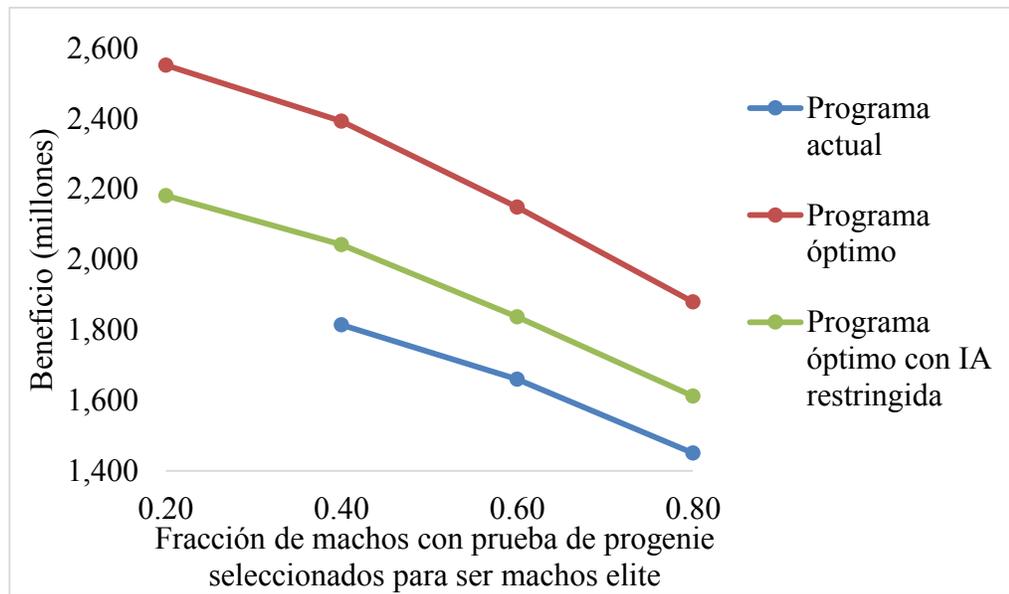


Figura 5. Beneficio económico generado al modificar la fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite.

En el programa 1, 2 y 3 el beneficio disminuye en 0.43% en promedio, es decir 7.8, 10.9 y 9.3 millones de euros, respectivamente, al aumentar una unidad (0.01) la fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite.

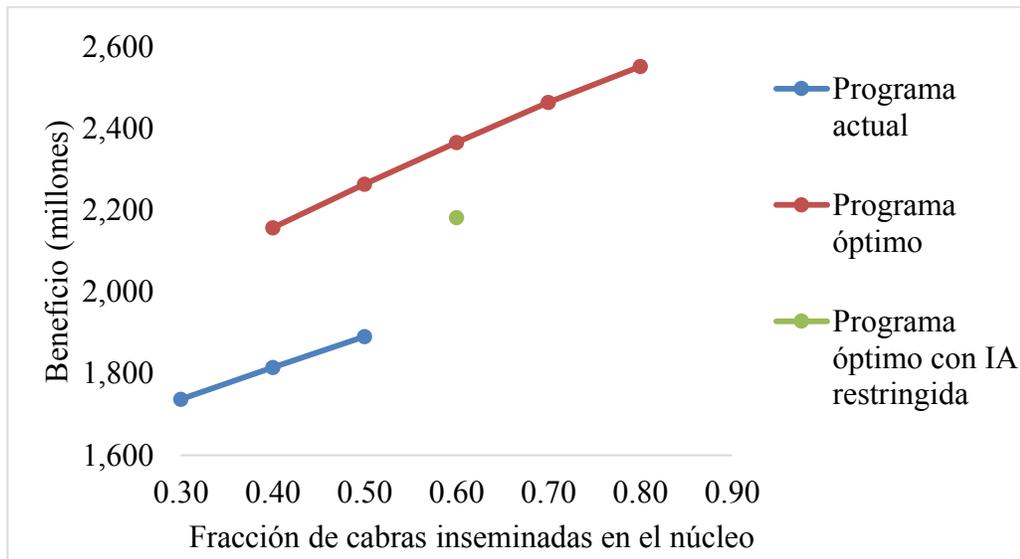


Figura 6. Beneficio económico generado al modificar la fracción de cabras inseminadas en el núcleo.

En el programa 1 y 2 el beneficio económico aumenta en 0.42% y 0.4% en promedio, es decir 7.6 y 10 millones de euros, respectivamente, al aumentar una unidad (0.01) la fracción de cabras inseminadas en el núcleo. En el programa 3 no se probaron diferentes niveles de inseminación artificial, ya que está restringida.

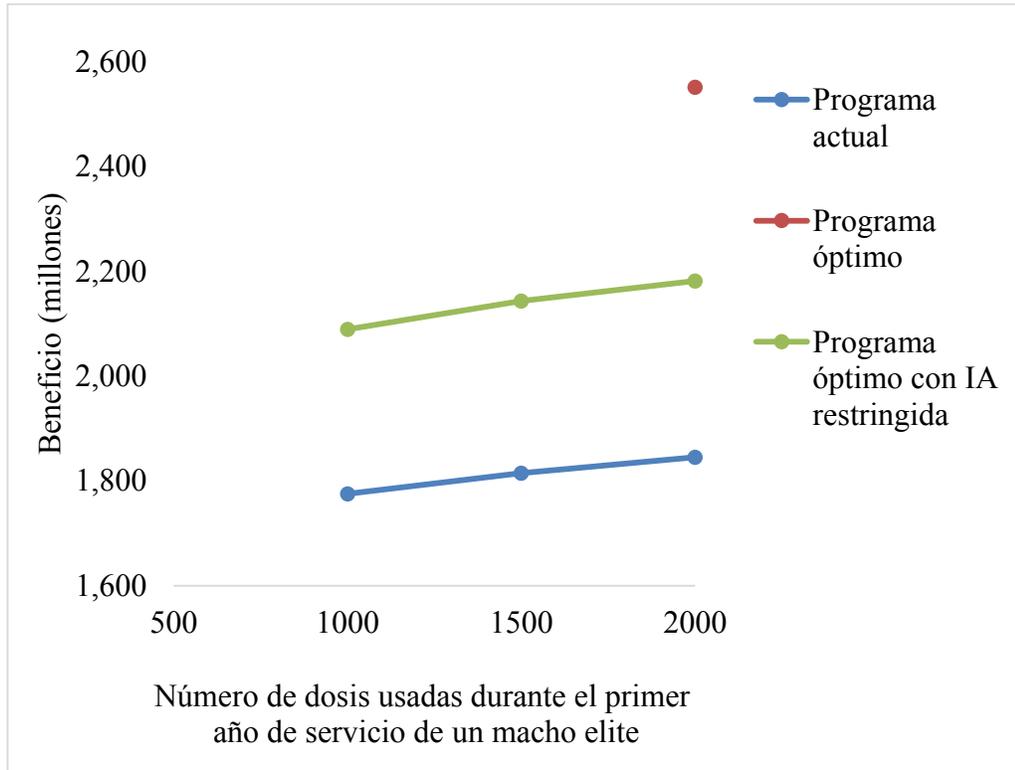


Figura 7. Beneficio económico generado al modificar el número de dosis usadas durante el primer año de servicio de un macho elite.

En el programa 1 y 3 el beneficio económico disminuye en 0.0038% y 0.004% en promedio, es decir 68 y 87 mil euros, al disminuir una dosis usada durante el primer año de servicio de un macho elite.

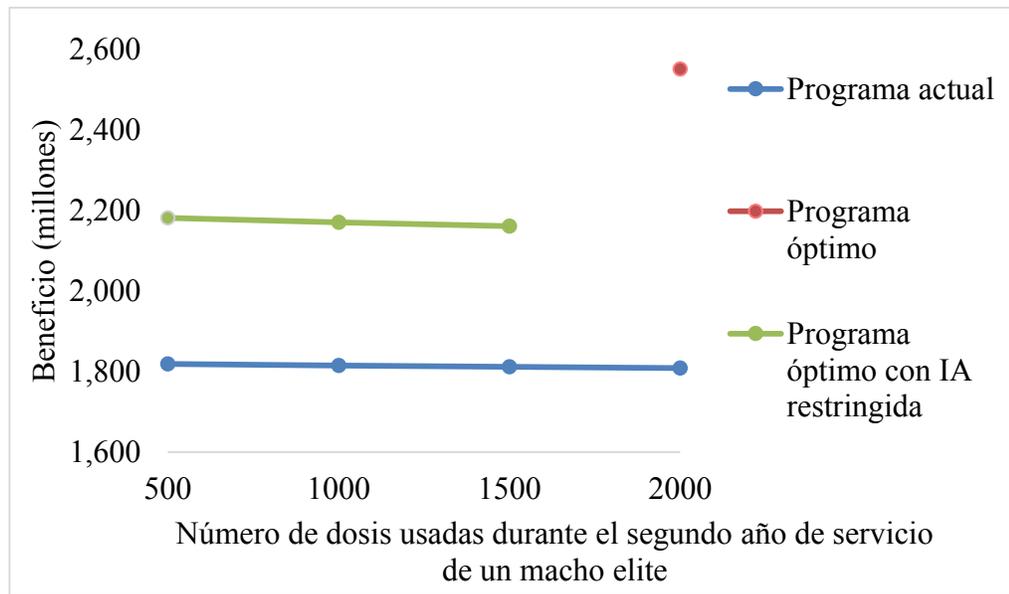


Figura 8. Beneficio económico generado al modificar el número de dosis durante el segundo año de servicio de un macho elite.

En el programa 1 y 3 el beneficio económico disminuye en 0.00039% y 0.00097% en promedio, es decir 7 y 21 mil euros, al aumentar una dosis usada durante el segundo año de servicio de un macho elite.

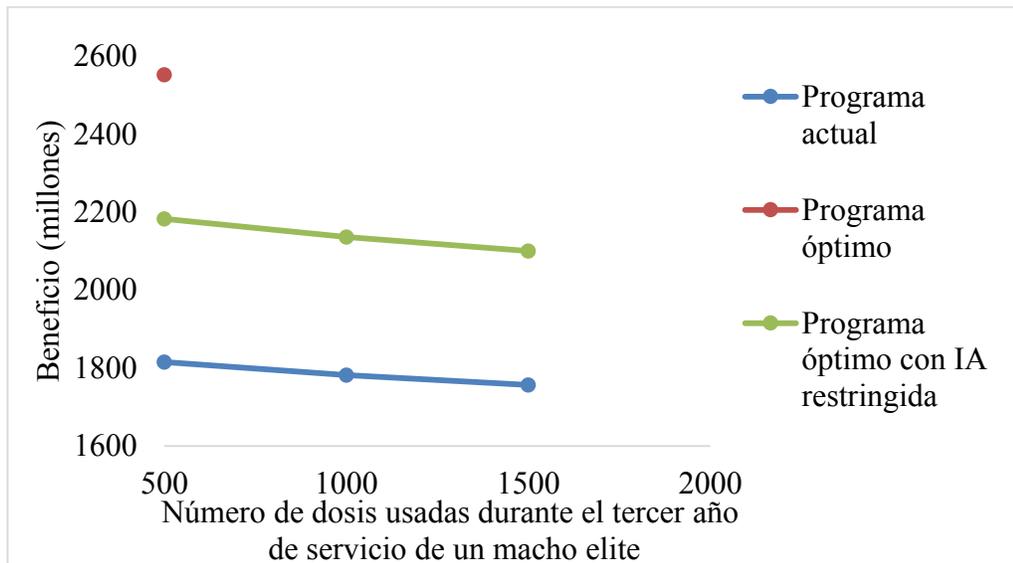


Figura 9. Beneficio económico generado al modificar el número de dosis usadas durante el tercer año de servicio de un macho elite.

En el programa 1 y 3 el beneficio económico disminuye en 0.0034% y 0.0039% en promedio, es decir 62 y 85 mil euros, al aumentar una dosis usada durante el tercer año de servicio de un macho elite.

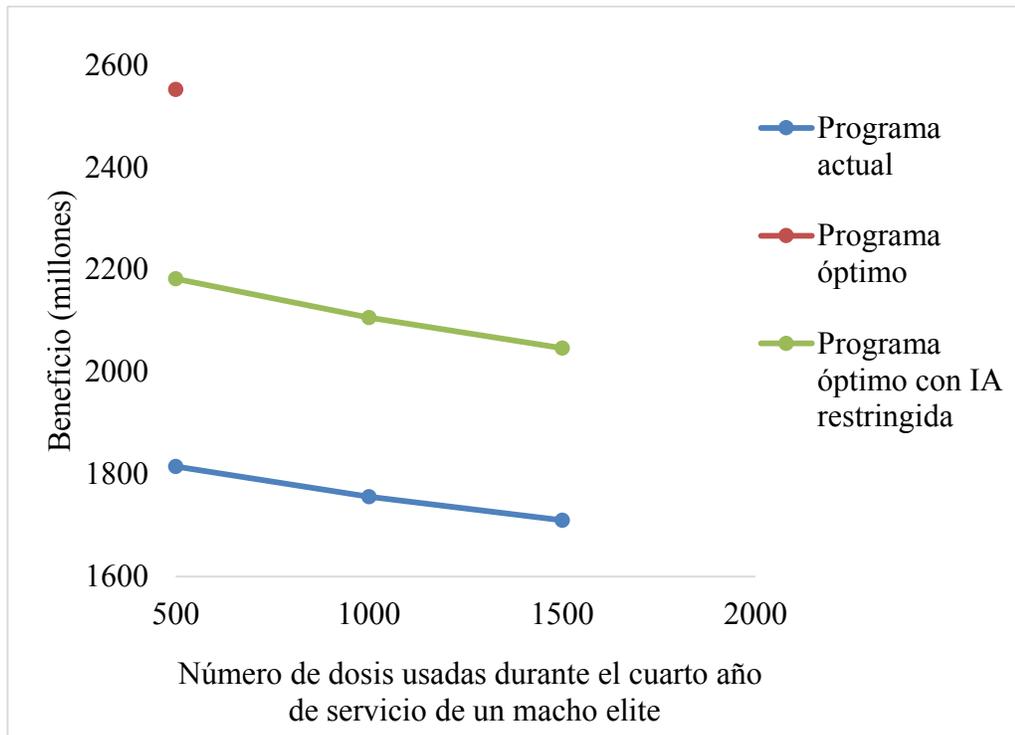


Figura 10. Beneficio económico generado al modificar el número de dosis usadas durante el cuarto año de servicio de un macho elite.

En el programa 1 y 3 el beneficio económico disminuye en 0.006% y 0.0065% en promedio, es decir 110 y 141 mil euros, al aumentar una dosis usada durante el cuarto año de servicio de un macho elite.

En la Figura 11 se muestra el impacto en el beneficio económico en cada programa, al modificar el número de años en servicio de los machos elite, en cada nivel de la fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite.

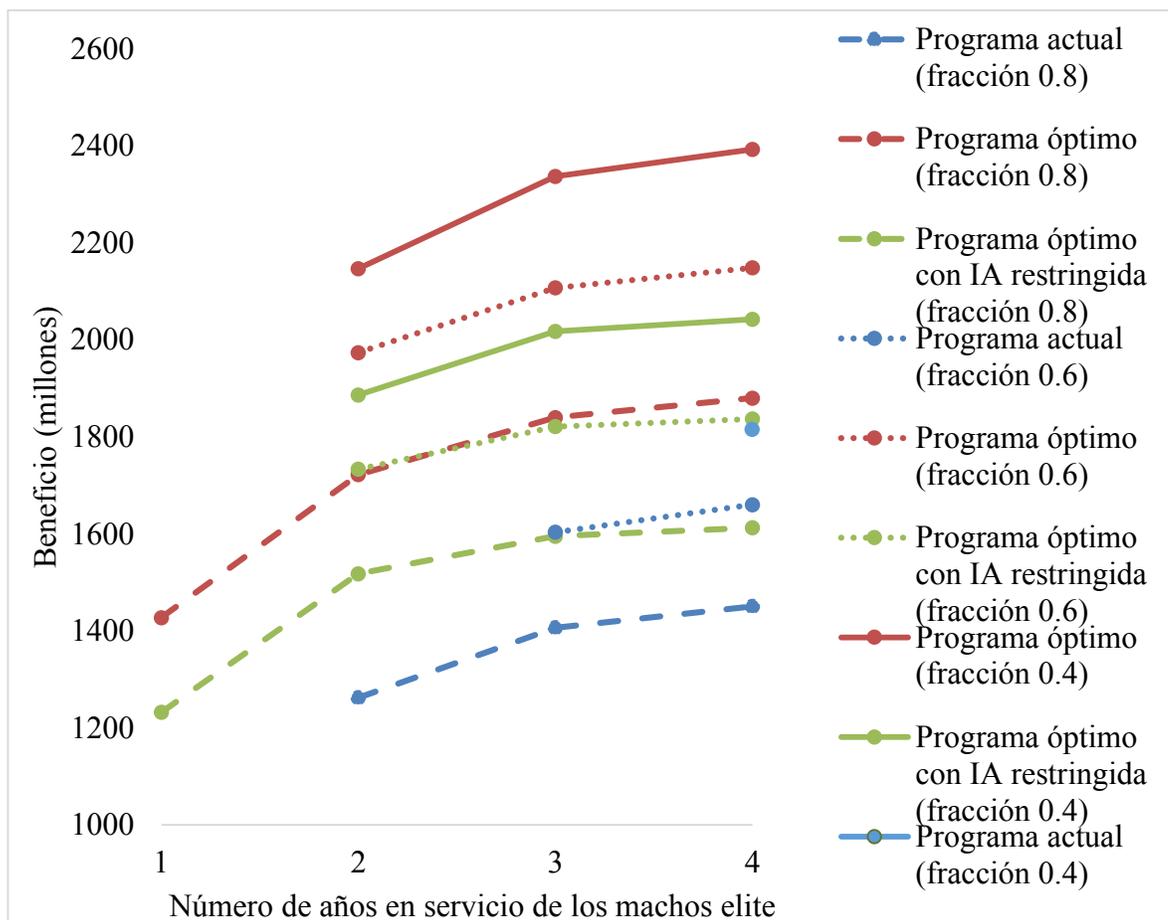


Figura 11. Beneficio económico generado al modificar el número de años en servicio de los machos elite, en cada nivel de la fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite (machos).

En los programas 2 y 3 (fracción 0.8), al cambiar de 2 a 1 año en servicio de los machos elite, el beneficio disminuye en 12% y 13%, es decir 295 y 285 millones de euros por año. En los programas 1, 2 y 3 (todas las fracciones), al cambiar de 3 a 2 años en servicio de los machos elite, el beneficio disminuye en 7.9%, 5.8% y 4.5% en promedio por año, es decir 144, 147 y 98 millones de euros por año, respectivamente. En los programas 1, 2 y 3 (todas las fracciones), al cambiar de 4 a 3 años en servicio de los machos elite, el beneficio disminuye en 0.35%, 1.8% y 0.88% en promedio por año, es decir 6.4, 46.6 y 19.3 millones de euros por año, respectivamente.

Discusión

- Modelo del programa de mejora genética

El modelo del programa actual de mejora genética de cabras lecheras en Francia obtuvo una ganancia genética anual estabilizada (del año 11 al año 50) de 0.166 desviaciones estándar genéticas. Éste resultado es muy similar a la ganancia genética anual que actualmente se genera en el índice de características productivas en promedio de ambas razas del programa de mejora genética, que es de 0.16 desviaciones estándar genéticas (Palhière y col, 2014). Esto nos indica que el modelo reproduce de forma adecuada el programa que actualmente se usa en las cabras lecheras de Francia.

Shumbusho y col. (2015) señalaron que el modelo dinámico de difusión de genes (Hill, 1974; Elsen y Mocquot, 1976), que es la metodología usada en éste estudio, es el modelo apropiado para simular la diseminación de genes del núcleo a los rebaños comerciales, y evaluar de manera detallada los costos y los ingresos relacionados con un ciclo de selección (1 año en el caso de las cabras).

- Máximo beneficio económico

Los resultados obtenidos a partir del modelo, indican que el programa actual de mejora genética de cabras lecheras en Francia podría incrementar de manera importante el beneficio económico, 790 millones de euros con el programa con máximo beneficio y 420 millones de euros con el programa con máximo beneficio económico con la inseminación artificial restringida, si utilizara valores óptimos en las variables de decisión. Esto confirma la necesidad de optimizar el programa de mejora genética (Shumbusho y col. 2013).

El valor óptimo de cada variable de decisión, en los dos programas óptimos (Cuadro 5), corresponde a una combinación de valores que maximiza el beneficio económico. Por ello, los valores óptimos en cada programa no son los mismos en todas las variables de decisión de los dos programas. A continuación se justifica el valor de cada variable de decisión en los programas óptimos:

- El uso del máximo número de machos en prueba de progenie (140), en ambos programas, permite una mayor intensidad de selección para ser machos elite (0.2), ya que aumenta el número de candidatos a la selección.
- El uso del número de hijas por macho en prueba de progenie obtuvo un valor intermedio entre el máximo y el mínimo, en los dos programas. Mientras más hijas por macho se obtengan, mayor será la precisión de la evaluación de los machos. Sin embargo, una gran cantidad de hijas de machos en prueba, tomando en cuenta que usan el número máximo de machos en prueba, representa una gran proporción de los reemplazos provenientes de inseminación artificial. Esto significa que el número de reemplazos provenientes de machos elite será restringido. Dado que hay diferentes niveles de inseminación artificial en los dos programas el número de hijas por macho en ambos programas difiere, ya que el número de hijas de machos en prueba tiene un peso diferente entre los reemplazos provenientes de inseminación artificial.

Dos Santos y col. (2015) argumentaron que elevar el uso de machos en prueba implica usar una gran cantidad de cabras disponibles para inseminación artificial. Éstas cabras dejarán de ser apareadas con los machos elite, que aportan mayor beneficio económico por cabra. Como consecuencia, se reduce la ganancia genética y el beneficio económico.

- El número de años en servicio de los machos elite alcanzó el valor máximo permitido (4 años) para acumular suficientes candidatos a la selección (machos elite) para ser padres de machos, ya que la fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite ocupa el valor mínimo permitido en el modelo (0.2).
- La fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite, fue minimizada, para aumentar la intensidad de selección en esta etapa.

Dos Santos y col. (2015) obtuvieron un mejor beneficio económico aumentando la intensidad de selección de machos elite usados en los rebaños comerciales. De esta manera, hubo una diseminación de la mejora genética más rápida.

En nuestro estudio, la fracción de machos elite usados en los rebaños comerciales se mantuvo fija, pero al modificar la selección anterior, que es la fracción de machos en

prueba de progenie seleccionada para ser elite, repercutió favorablemente en el nivel genético esperado de los machos elite, que son los candidatos para la segunda etapa de selección.

Al-Atiyat y col. (2010) confirmaron un mayor beneficio económico al diseminar la ganancia genética de los machos del núcleo a los rebaños comerciales.

- La fracción de cabras inseminadas en el programa con máximo beneficio, alcanzó el valor máximo posible, de acuerdo al número de dosis disponibles de los machos elite cada año.

La inseminación artificial hace posible la rápida diseminación de la ganancia genética. Es por ello que mientras más elevada sea la inseminación artificial mayor será la ganancia genética anual y el beneficio económico. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que la cantidad de dosis disponibles cada año sean suficientes.

- El número de dosis usadas durante el primer año de servicio de un macho elite, alcanzó el valor máximo, en ambos programas. Esto disminuye el intervalo generacional, ya que los machos elite más jóvenes se usarán en mayor proporción.
- Por otra parte, el número de dosis usadas durante en el segundo año de servicio de un macho elite, no alcanza el valor máximo, en ningún programa. Esto permite usar una mayor proporción de dosis del primer año de servicio, y reducir el intervalo generacional. El programa con máximo beneficio económico no reduce al máximo el número de dosis del segundo año de servicio por la cantidad de dosis necesarias en la inseminación artificial.
- El número de dosis usadas durante el tercer y cuarto año de servicio de un macho elite, fue minimizado en ambos programas. Esto disminuye el intervalo generacional, ya que se usará una menor proporción de dosis de los machos elite más viejos.

Aunque el beneficio económico tuvo un cambio importante en los programas óptimos, es importante investigar el impacto del uso de la selección genómica en el beneficio económico en investigaciones posteriores. Köning y col. (2009) mejoraron el beneficio económico de 36% a 159% con diferentes programas genómicos en vacas lecheras, con respecto al programa de prueba de progenie convencional.

- Influencia de las variables de decisión en el beneficio económico de cada programa

Al modificar los valores de las variables de decisión en cada programa, se encontró que no todas las variables tuvieron el mismo impacto en el beneficio económico.

La variable que tuvo mayor impacto en el beneficio económico en promedio, al modificar una unidad su valor, fue el número de años en servicio de los machos elite. Esta variable no se pudo modificar individualmente en ninguno de los programas, sino que la fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite se modificó simultáneamente, para obtener el impacto individual de la primer variable. El cambio de 2 a 1 año de servicio, modificó el beneficio económico en mayor proporción que el cambio de 3 a 2 años o el cambio de 3 a 4 años.

Aunque es la variable con mayor impacto en el beneficio económico es importante señalar, que en primera instancia la variable mantiene su valor original (4 años) en los programas óptimos, para cumplir con la cantidad mínima de candidatos a la selección para ser padres de machos. Esto quiere decir que el valor original de esta variable (4 años) permite que la fracción de machos en prueba de progenie sea minimizada cuando el número de machos en prueba de progenie se incrementa en los programas óptimos.

Por otra parte, cuando la fracción de machos en prueba de progenie seleccionados para ser machos elite intencionalmente se aumenta, el valor óptimo para la variable de decisión sigue siendo 4 años de servicio de los machos elite. La razón de mantener este valor óptimo es que tiene un efecto directo en la intensidad de selección para ser padres de machos (que no es una variable de decisión considerada en este estudio). Mientras más años en servicio de los machos elite, mayor será la cantidad de candidatos a la selección para ser padres de machos, ya que el número de padres de machos es fijo.

Lo anterior nos indica que mantener el número de años en servicio de los machos elite (4 años) en los programas óptimos, no es mejor en el sentido estricto, sino que permite que otras variables de decisión que influyen directamente en la ganancia genética sean favorecidas.

La segunda variable de decisión con más impacto en el beneficio económico fue la fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite. Esto confirma lo que se expuso en los párrafos anteriores. Disminuir el valor de esta variable de decisión provoca que el valor genético esperado de los machos elite que son diseminados a los rebaños comerciales sea mayor. Esta variable de decisión y el número de machos en prueba de progenie están muy relacionadas, ya que si el número de machos en prueba de progenie se aumenta, la fracción de machos en prueba de progenie seleccionados para ser machos elite se puede reducir.

En tercer lugar de importancia está la fracción de cabras inseminadas en el núcleo. Cabe recordar que a pesar de la importancia de esta variable de decisión, en los pequeños rumiantes la inseminación artificial no se maximiza por razones prácticas.

En cuarto y quinto lugar se encuentran el número de machos en prueba de progenie y el número de hijas por macho en prueba de progenie, respectivamente. El número de hijas por macho en prueba tiene un mayor impacto por hija en el beneficio cuando se reduce el número de hijas de 80 a 40, que cuando se aumenta de 80 a 120 o de 120 a 160.

En los últimos lugares de importancia se encuentran el número de dosis usadas por año de servicio de los machos elite, que tuvieron un impacto muy bajo en el beneficio económico. Entre ellas, el número de dosis usadas durante el cuarto año tuvieron un mayor impacto, luego las del primer y tercer año. Las dosis del segundo año fueron las que tuvieron menor impacto en el beneficio económico.

No todas las variables de decisión pudieron ser modificadas. El número de años en servicio de los machos elite no se pudo disminuir, en ninguno de los 3 programas. Reducir el número de años en servicio de los machos elite significa que no habría suficientes candidatos a la selección para ser padres de machos. Es por ello que se tuvo que aumentar la fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite al mismo tiempo. Esto permitió disminuir el número de años en servicio de los machos elite, ya que se tuvieron más

machos elite por año de servicio, y los candidatos a la selección para ser padres de machos fueron suficientes.

De manera similar, el número de machos en prueba de progenie no se pudo reducir en los programas óptimos. Debido al valor de la fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite, se tiene la cantidad mínima de candidatos a la selección para ser padres de machos, en ambos programas. Esto significa que si el número de machos en prueba se redujera no habría suficientes candidatos a la selección para ser padres de machos.

- Relación de éste estudio con el sector caprino en México

En México el mejoramiento genético se ha basado en la distribución de hembras y machos de raza pura (Anglo-Nubia, Alpina, Saanen y Toggenburg) que la mayoría de las veces se cruza con el ganado criollo o cruza (Montaldo y col, 2010). En general no se tienen registros productivos y en consecuencia tampoco evaluaciones genéticas en la mayor parte de la población de cabras en México. (Iñiguez y col., 2011)

Sin embargo, se han hecho esfuerzos por llevar el control de producción y obtener evaluaciones genéticas en un grupo de cabras (alrededor de 1500 cabras en 13 granjas) en el estado de Guanajuato (Valencia y Montaldo, 2006).

El desarrollo de programas de mejora genética en México permitiría incrementar la eficiencia económica de los sistemas de producción de cabras lecheras, ya que se promovería cambios deseables en las características de importancia económica en nuestro país.

Este estudio ofrece una perspectiva general de los beneficios económicos que se podrían generar al desarrollar un programa de mejora genética en cabras lecheras. Asimismo puntualiza los elementos que el sector caprino de Francia tuvo que desarrollar para implementar un programa de mejora genética eficiente, como es la organización a nivel nacional, regulación y financiamiento gubernamental, vinculación con las instituciones de investigación, tecnologías reproductivas, control de producción, etc.

Hay grandes diferencias entre el sector caprino en México y Francia. Por ello es importante desarrollar modelos basados en las condiciones y necesidades específicas de México, y llegar

a conclusiones concretas con respecto a la viabilidad y el beneficio de implementar un programa de mejora genética en México.

En el Cuadro 6. Se muestra un cuadro comparativo entre el sector de cabras lecheras en México y Francia.

Cuadro 6. Sector de cabras lecheras en México y Francia		
	México	Francia
Número de cabezas de ganado	8,687,814 ¹	1,279,000 ⁵
Toneladas de leche al año	155,497 ¹	643,000 ⁶
Principal forma de consumo de leche cabra	20% en quesos industrializados, 10% dulces y cajetas, y 70% quesos artesanales y leche fluida ²	84% en quesos industrializados y 16% en quesos artesanales ⁵
Porcentaje de leche procesada por la industria	30% ²	84% ⁵
Número de cabras en control de producción oficial	15,000 ³	300,000 ⁷
Razas principales	Cruzas entre criollas y puras ⁴	59% Alpina y 38% Saanen ⁷

¹ SIAP, 2014

² Trujillo y Almudena, 2004

³ Valencia y Montaldo, 2006

⁴ Iñiguez y col., 2011

⁵ Agreste-Statistique Agricole Annuelle, 2014

⁶ Eurostat, 2014

⁷ Danchin-Burge y col., 2012

El modelo presentado en este estudio puede ser de gran utilidad para guiar estudios o proyectos posteriores con respecto a la implementación de un programa de mejora genética de cabras lecheras en México.

Conclusiones

El modelo dinámico de difusión de genes, usado en éste estudio, reproduce de forma adecuada el programa actual de mejora genética de cabras lecheras en Francia.

El uso de valores óptimos, en las variables de decisión relacionadas con la ganancia genética, podría incrementar de manera importante el beneficio económico que actualmente genera el programa de mejora genética de cabras lecheras en Francia.

El impacto de modificar a nivel óptimo cada variable de decisión es diferente. Es por ello que se recomienda modificar prioritariamente las variables con mayor impacto en el beneficio económico.

Las variables de decisión más importantes son la fracción de machos con prueba de progenie seleccionados para ser machos elite, y el número de machos en prueba de progenie. Cada una aportaría, al beneficio económico, 9.33 y 3 millones de euros por unidad modificada en promedio, respectivamente.

Modificar a nivel óptimo el número de dosis usadas durante el primer y segundo año de servicio de un macho elite aportaría 77.5 y 14 mil euros por unidad modificada en promedio, respectivamente.

Dado que es difícil modificar la fracción de cabras inseminadas en el núcleo, por razones prácticas, no se debe modificar el nivel actual del número de hijas por macho en prueba de progenie, como se muestra en el programa óptimo con inseminación artificial restringida. Asimismo el número de años en servicio de un macho elite, y el número de dosis usadas durante el tercer y cuarto año de servicio de un macho elite, pueden permanecer en su valor actual, que es igual al óptimo.

El número de años en servicio de los machos elite y el número de machos en prueba de progenie son muy importantes para que la combinación de valores en las variables de decisión de los programas óptimos se pueda llevar a cabo.

Referencias

- Al-Atiyat, Rewe, T., Herold, P., Zárate, A.V., 2010. A simulation study to compare different breeding scenarios for Black Bedouin goat in Jordan. *Egypt. J. Sheep Goat Sci.* 5: 83-92.
- Barillet, F., 2007. Genetic improvement for dairy production in sheep and goats. *Small Rumin. Res.* 70: 60-75.
- Boichard, D. Manfredi, E., Bonaiti, B., 1992. Amélioration génétique de l'espèce caprine. Colloque Production Caprine, Niort, France, pp. 1-10.
- Boyazoglu, J., Hatziminaoglou, Y., Morand-Fehr, P., 2005. The role of the goat in the Society: past present and perspective for the future. *Small Rumin. Res.* 60 (1-2): 13-23.
- Clément, V. Martin, P., Barillet, F., 2006. Elaboration d'un index synthétique caprin combinant les caractères laitiers et des caractères de morphologie mammary. In: Proc. 13th Renc Rech Rum, Paris, pp. 209-212.
- Danchin- Burge, C., Allain, D., Clément, V., Piacère, A., Martin, P., Palhière, 2012. Genetic variability and French breeding programs of the goat breeds under selection, *Small Rumin. Res.* 108 (1-3): 36-34.
- Danchin- Burge, C., Duclos, D., 2009. Situation et perspectives d'avenir des races caprines à petits effectifs. *Ethnozootecnie* 85: 10-16.
- Dos Santos, L.H., Bezerra, O.L.A.M, Olivardo F., Gonçalves, H.C., Braga L.R.N. 2015. Breeding programs for dairy goats generate profits in Brazil. *Livestock Science.* 178:27-34.
- Du Croz, J.J., Mayes, P.J.D. 1990. The NAG library in a supercomputing environment. *Supercomputational Science.* Plenum Press. New York. 109-129.
- Dubeuf, J.-P., 2005. Structural, market and organisational conditions for developing goat dairy production systems. *Small Rumin. Res.* 60 (1-2): 67-74.

- Dubeuf, J.P., Boyazoglu, J., 2009. An international panorama of goat selection and breeds. *Livest. Sci.* 120 (3): 225-231.
- Dubeuf, J.-P., Morand-Fehr, P., Rubino, R., 2004. Situation, changes and future of goat industry around the world. *Small Rumin. Res.* 51: 165–173.
- Ducrocq, V., and R. L. Quass. 1988. Prediction of genetic response on truncation selection across generations. *J. Dairy Sci.* 71:243-2553.
- Elsen, J. M. 1988. Modelling breeding plans in different species. *Modelling of Livestock Production Systems. Eds. Korver, S. and JAM Van Arendonk. Pp.* 171-181.
- Elsen, J. M. and J.C. Mocquot. 1974. Méthode de prévision d'évolution du niveau génétique d'une population soumise à une opération de sélection et dont les générations se chevauchent, *Bull. Techn. Départ. Génétique animale. INRA* 17: 30-54.
- Elsen, J.M. and J.C. Mocquot. 1976. Optimization du renouvellement des femelles dans les troupeaux laitiers soumis au croisement terminal. *Ann. Génét. Sél. Anim.* 8:343.
- Hill, W.G. 1974. Prediction and evaluation of response to selection with overlapping generations. *Anim. Prod.* 18:117.
- Hill, W. G. Design and economics of animal breeding programs. *Proc. Aust. Assoc. Anim. Breed. & Genet.* 1981 - aaabg.org
- Iñiguez, L. Salinas, H., Pastor L. F., Escareño, L.M., Wurzinger, M., Sölkner, J., 2011. La cabra y los sistemas de producción caprina de los pequeños productores de la Comarca Lagunera, en el norte de México. *Revista Chapingo, Serie de Ciencias Forestales y del Ambiente.* 17: 235-246.
- Köning, S., Simianer, H., Willam, A. 2009. Economic evaluation of genomic breeding programs. *J. Dairy Sci.* 92:382-391.
- Montaldo, H. H., Manfredi, E. 2002. Organization of selection programs for dairy goats. *Proc. 7th Wrld. Cong. Genet. Appl. Livest. Prodn. Communication No.* 01-35. Montpellier, France.

- Montaldo, H. H., Torres-Hernández, G., Valencia-Posadas, M. 2010. Goat breeding research in México. *Small Rumin. Res.* 89: 155-163.
- Mulder, H. A., Veerkamp, R. F., Ducro, B. J., van Aredonk, J. A. M., Bijma, P. 2006. Optimization of dairy cattle breeding programs for different environments with genotype by environment interaction. *J. Dairy Sci.* 89:1740-1752.
- Olivier, J. J., Moyo, S., Montaldo, H. H., Thorpe, W., Zárate, A. V., Trivedi, K. R. 2002, August. Integrating genetic improvement into livestock development in medium-to low-input production systems. In *7th World Congress on Genetics Applied to livestock production*. Montpellier, France.
- Palhière, I., Clement, V., Martin, P., Colleau, J.J. 2014. Bilan de la méthode de Sélection à Parenté Minimum après 6 ans d'application dans le schéma de sélection caprin. *Renc. Rech. Ruminants.* 21: 253-256.
- Piacère, A., Ricoreau, G., Manfredi, E., Siwald, J. P., Lahaye, P., Bibé, B., Bouillon, J., 2000. From cooperative genetical research work to technological transfer into the selection schemes: the French example on genetic improvement of protein contents in milk goat. In: *7th International Conference on Goats*, vol. 1, pp. 18-22.
- Phocas, F., Bloch, C., Chapelle, P., Bécherel, F., Renard, G., Ménissier, F. 1998. Developing a breeding objective for a French purebred beef cattle selection programme. *Livestock Production Science.* 57: 49-65.
- Pryce, J.E. and Daetwyler, H.D. 2011. Designing dairy cattle breeding schemes under genomic selection: a review of international research. *Animal Production Science.*
- Rendel, J. M. and Alan Robertson. 1950. Estimation of genetic gain in milk yield by selection in a closed herd of dairy cattle, *Journal of Genetics* 50, no. 1: 1-8.
- Shumbusho F., Raoul J., Astruc J. M., Palhiere I. and Elsen J.M. 2013. Potential benefits of genomic selection on genetic gain of small ruminant breeding programs. *J Anim Sci.* 91:3644-3657.

- Shumbusho, F., Raoul J., Astruc J. M., Palhière I., Lemarié S., Fugeray-Scarbel A. and Elsen J. M. 2015. Economic evaluation of genomic selection in small ruminants: a sheep meat breeding program. *Animal*. 1-9.
- Trujillo, A. y Almudena, F. 2004. Consumo de quesos de cabra en la Ciudad de Tequisquiapas, Qro. México. Memorias de la XIX Reunión Nacional sobre Caprinocultura. Acapulco, Gro. Noviembre.
- Valencia, M., Montaldo, H.H., 2006. Genetic evaluation of goats in the state of Guanajuato, Mexico. In: Proceeding of the 8th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production, August 13–18; Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, Communication: 02-06.
- Van Vleck, Pollak and Oltenacu. Genetics for the Animal Sciences. *W H Freeman &Co.* USA, 1987.
- Weigel, K. A. 2001. Controlling inbreeding in modern breeding programs. *J. of Dairy Sc.* 84:177-184.
- Weller, J. I. Economic Aspects of Animal Breeding. Chapman & Hall. UK, 1994.

Anexo 1. Ecuaciones para calcular los valores genéticos esperados de cada categoría

En las ecuaciones se usaron diferentes elementos: X_j' que es el valor genético esperado de la categoría j en el año t , X_j que es el valor genético esperado de la categoría j en el año $t-1$ y $DELTA_s$ que es el diferencial de selección de subpoblación s . Los valores genéticos esperados X_j y el diferencial de selección fueron ponderados por la contribución hembra/macho (0.5) y la fracción de reemplazos que contribuyó la categoría j .

- Valor genético esperado de los reemplazos de cabras en el núcleo

$$\begin{aligned}
 X_1' = & 0.5[(wt_1 * X_1) + (wt_2 * X_2) + (wt_3 * X_3) + (wt_4 * X_4) + (wt_5 * X_5)] \\
 & + 0.5 \left[\frac{nsd}{nreplac} ((alphans_1 * X_7) + (alphans_2 * X_8) + (alphans_3 * X_9) + (alphans_4 * X_{10})) \right. \\
 & \left. + \frac{tdpt}{nreplac} (X_{13}) + \frac{delite}{nreplac} ((wme_1 * X_{16}) + (wme_2 * X_{17}) + (wme_3 * X_{18}) + (wme_4 * X_{19})) \right]
 \end{aligned}$$

Donde wt_i es la fracción de reemplazos nacidas de cabras en la edad i , nsd es el número de reemplazos provenientes de los machos para monta natural, $nreplac$ es el número de reemplazos de cabras en el núcleo, $alphans_i$ es la fracción de reemplazos provenientes de machos para monta natural en la edad i , $tdpt$ es la número de reemplazos provenientes de machos en prueba de progenie, $delite$ es el número de reemplazos provenientes de los machos elite y wme_i es la fracción de reemplazos provenientes de machos elite en el i -ésimo año de servicio.

- Valor genético esperado de las cabras en el núcleo

$$X_3' = X_2$$

$$X_3' = X_4$$

$$X_4' = X_5$$

$$X_5' = X_6$$

- Valor genético esperado de los reemplazos de machos de monta natural del núcleo

$$X_7' = \{0.5[(wt_1 * X_1) + (wt_2 * X_2) + (wt_3 * X_3) + (wt_4 * X_4) + (wt_5 * X_5)] \\ + 0.5[(alphanms_1 * X_{16}) + (alphanms_2 * X_{17}) + (alphanms_3 * X_{18}) + \\ (alphanms_4 * X_{19})]\} + DELTA_4$$

Donde wt_i es la fracción reemplazos nacidos de las cabras en la edad i , $alphanms_i$ es la fracción de reemplazos provenientes de machos elite en el i -ésimo año de servicio y $DELTA_4$ es el diferencial de selección correspondiente a los padres de machos de monta natural.

$$DELTA_4 = 0.5[(sdsns_1 * alphanms_1) + (sdsns_2 * alphanms_2) + \\ (sdsns_3 * alphanms_4) + (sdsns_1 * alphanms_1)]$$

Donde $sdsns_1$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 5 años de edad (X_{16} el año anterior), $sdsns_2$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 6 años de edad (X_{17} el año anterior), $sdsns_3$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 7 años de edad (X_{18} el año anterior), $sdsns_4$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 8 años de edad (X_{19} el año anterior).

- Valor genético esperado de los machos para monta natural en el núcleo

$$X_8' = X_7$$

$$X_9' = X_8$$

$$X_{10}' = X_9$$

$$X_{11}' = X_{10}$$

- Valor genético esperado de los candidatos a reemplazos de los machos elite

$$X_{12}' = \{0.5[(\alpha_1 * X_2) + (\alpha_2 * X_3) + (\alpha_3 * X_4) + (\alpha_4 * X_5)] \\ + 0.5[(\text{alphame}_1 * X_{16}) + (\text{alphame}_2 * X_{17}) + (\text{alphame}_3 * X_{18}) \\ + (\text{alphame}_4 * X_{19})]\} + \text{DELTA}_1 + \text{DELTA}_2$$

Donde α_i es la fracción de reemplazos nacidos de cabras en la edad $i+1$, alphame_i es la fracción de reemplazos provenientes de machos elite en el i -ésimo año de servicio, DELTA_1 es el diferencial de selección correspondiente a las madres de machos y DELTA_2 es el diferencial de selección correspondiente de los padres de machos.

$$\text{DELTA}_1 = 0.5[(\text{sdf}_1 * \alpha_1) + (\text{sdf}_2 * \alpha_2) + (\text{sdf}_3 * \alpha_4) + (\text{sdf}_4 * \alpha_5)]$$

Donde sdf_1 es el diferencial de selección generado en la selección de cabras de 2 años de edad (X_2 el año anterior), sdf_2 es el diferencial de selección generado en la selección de cabras de 3 años de edad (X_3 el año anterior), sdf_3 es el diferencial de selección generado en la selección de cabras de 4 años de edad (X_4 el año anterior) y sdf_4 es el diferencial de selección generado en la selección de cabras de 5 años de edad (X_5 el año anterior).

$$\text{DELTA}_2 = 0.5[(\text{sdss}_1 * \text{alphame}_1) + (\text{sdss}_2 * \text{alphame}_2) + \\ (\text{sdss}_3 * \text{alphame}_4) + (\text{sdss}_4 * \text{alphame}_5)]$$

Donde sdss_1 es el diferencial de selección generado en la selección de machos de 5 años de edad (X_{16} el año anterior), sdss_2 es el diferencial de selección generado en la selección de machos de 6 años de edad (X_{17} el año anterior), sdss_3 es el diferencial de selección generado en la selección de machos de 7 años de edad (X_{18} el año anterior), sdss_4 es el diferencial de selección generado en la selección de machos de 8 años de edad (X_{19} el año anterior).

- Valor genético esperado de los machos mejorados del núcleo

$$X_{13}' = X_{12}$$

$$X_{14}' = X_{13}$$

$$X_{15}' = X_{16}$$

$$X_{16}' = X_{15} + dspp$$

Donde $dspp$ es el diferencial de selección correspondiente a los reemplazos de los machos elite seleccionados a partir de los machos con prueba de progenie (X_{15} el año anterior).

$$X_{17}' = X_{16}$$

$$X_{18}' = X_{17}$$

$$X_{19}' = X_{18}$$

$$X_{20}' = X_{19}$$

- Valor genético esperado de los reemplazos de cabras del área comercial

$$X_{21} = 0.5 \left[\frac{nfems}{ncrep} ((wt_1 * X_1) + (wt_2 * X_2) + (wt_3 * X_3) + (wt_4 * X_4) + (wt_5 * X_5)) + \right. \\ \left. \frac{wfbc}{ncrep} ((wt_1 * X_{21}) + (wt_2 * X_{22}) + (wt_3 * X_{23}) + (wt_4 * X_{24}) + (wt_5 * X_{25})) \right] + \\ 0.5 \left[\frac{nfems}{ncrep} ((alphans_1 * X_7) + (alphans_2 * X_8) + (alphans_3 * X_9) + (alphans_4 * X_{10})) + \right. \\ \left. \frac{ains}{ncrep} ((alphai_1 * X_{16}) + (alphai_2 * X_{17}) + (alphai_3 * X_{18}) + (alphai_4 * X_{19})) + \right. \\ \left. \frac{dbcf}{ncrep} ((wnss((alphans_1 * X_{27}) + (alphans_2 * X_{28}) + (alphans_3 * X_{29}) + (alphans_4 * X_{30}))) + \right. \\ \left. (wnsc((alphans_1 * X_{32}) + (alphans_2 * X_{33}) + (alphans_3 * X_{34}) + (alphans_4 * X_{35})))) \right]$$

Donde $nfems$ es el número de reemplazos vendidos del núcleo a los rebaños comerciales, $ncrep$ es el número de reemplazos en los rebaños comerciales, wt_i es la fracción de reemplazos provenientes de cabras en la edad i , $wfbc$ es el número de reemplazos provenientes de cabras de los rebaños comerciales, $alphans_i$ es la fracción de reemplazos

provenientes de machos de monta natural en la edad i , $ains$ es el número de reemplazos provenientes de machos elite por inseminación artificial en el área comercial, $alphai_i$ es la fracción de reemplazos provenientes de machos elite en su i -ésimo año de servicio, dbc_f es el número de reemplazos provenientes de machos de monta natural del área comercial, w_nss es la fracción de reemplazos provenientes de machos de monta natural nacidos en el núcleo, w_nsc es la fracción de reemplazos provenientes de machos de monta natural nacidos en el área comercial y $DELTA_{5a}$ es el diferencial de selección correspondiente a los padres por inseminación artificial en el área comercial .

$$DELTA_{5a} = 0.5 \left[\frac{ains}{ncrep} ((sdai_1 * alphai_1) + (sdai_2 * alphai_2) + (sdai_3 * alphai_3) + (sdai_4 * alphai_4)) \right]$$

Donde $sdai_1$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 5 años de edad (X_{16} el año anterior), $sdai_2$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 6 años de edad (X_{17} el año anterior), $sdai_3$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 7 años de edad (X_{18} el año anterior), $sdai_4$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 8 años de edad (X_{19} el año anterior).

- Valor genético esperado de las cabras de los rebaños comerciales

$$X_{22}' = X_{21}$$

$$X_{23}' = X_{22}$$

$$X_{24}' = X_{23}$$

$$X_{25}' = X_{24}$$

$$X_{26}' = X_{25}$$

- Valor genético esperado de los reemplazos de machos de monta natural nacidos en el núcleo para los rebaños comerciales

$$X_{27}' = \{0.5[(wt_1 * X_1) + (wt_2 * X_2) + (wt_3 * X_3) + (wt_4 * X_4) + (wt_5 * X_5)] \\ + 0.5[(alphanms_1 * X_{16}) + (alphanms_2 * X_{17}) + (alphanms_3 * X_{18}) + \\ (alphanms_4 * X_{19})]\} + DELTA_4$$

Donde wt_i es la fracción de reemplazos provenientes de cabras en la edad i , $alphanms_i$ es la fracción de reemplazos provenientes de machos elite que están en su i -ésimo año de servicio y $DELTA_4$ es el diferencial de selección correspondiente de los padres de machos de monta natural.

$$DELTA_4 = 0.5[(sdsns_1 * alphanms_1) + (sdsns_2 * alphanms_2) + \\ (sdsns_3 * alphanms_3) + (sdsns_4 * alphanms_4)]$$

Donde $sdsns_1$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 5 años de edad (X_{16} el año anterior), $sdsns_2$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 6 años de edad (X_{17} el año anterior), $sdsns_3$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 7 años de edad (X_{18} el año anterior), $sdsns_4$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 8 años de edad (X_{19} el año anterior).

- Valor genético esperado de los machos para monta natural nacidos en el núcleo en los rebaños comerciales

$$X_{28}' = X_{27}$$

$$X_{29}' = X_{28}$$

$$X_{30}' = X_{29}$$

$$X_{31}' = X_{30}$$

- Valor genético esperado de los reemplazos de machos de monta natural nacidos en los rebaños comerciales

$$\begin{aligned}
X_{32}' = & 0.5[(wt_1 * X_{21}) + (wt_2 * X_{22}) + (wt_3 * X_{23}) + (wt_4 * X_{24}) + (wt_5 * X_{25})] + \\
& 0.5 \left[\frac{ains}{nsbcf} ((alpha_i_1 * X_{16}) + (alpha_i_2 * X_{17}) + (alpha_i_3 * X_{18}) + (alpha_i_4 * X_{19})) + \right. \\
& \left. \frac{nsns}{nsbcf} ((wnss((alphans_1 * X_{27}) + (alphans_2 * X_{28}) + (alphans_3 * X_{29}) + (alphans_4 * X_{30}))) + \right. \\
& \left. (wnsc ((alphans_1 * X_{32}) + (alphans_2 * X_{33}) + (alphans_3 * X_{34}) + (alphans_4 * X_{35}))) \right]
\end{aligned}$$

Donde wt_i es la fracción de reemplazos provenientes de cabras en la edad i , $ains$ es el número de reemplazos provenientes de machos elite por inseminación artificial en los rebaños comerciales, $nsbcf$ es el número de reemplazos en los rebaños comerciales, $alpha_i$ es la fracción de reemplazos provenientes de los machos elite en su i -ésimo año de servicio, $nsns$ es el número de reemplazos provenientes de machos de monta natural de los rebaños comerciales, $wnss$ es la fracción de reemplazos provenientes de machos de monta natural nacidos en el núcleo, $alphans_i$ es la fracción de reemplazos provenientes de machos de monta natural en la edad i , $wnsc$ es la fracción de reemplazos provenientes de machos de monta natural nacidos en los rebaños comerciales y $DELTA_{5b}$ es el diferencial de selección correspondiente a la selección de machos elite (dosis de semen vendidas al área comercial) para ser padres de machos de monta natural de los rebaños comerciales.

$$\begin{aligned}
DELTA_{5b} = & 0.5 \left[\frac{ains}{nsbcf} ((sdai_1 * alpha_i_1) + (sdai_2 * alpha_i_2) + \right. \\
& \left. (sdai_3 * alpha_i_4) + (sdai_1 * alpha_i_1)) \right]
\end{aligned}$$

Donde $sdai_1$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 5 años de edad (X_{16} el año anterior), $sdai_2$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 6 años de edad (X_{17} el año anterior), $sdai_3$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 7 años de edad (X_{18} el año anterior) y

$sdai_4$ es el diferencial de selección generado en la selección de machos elite de 8 años de edad (X_{19} el año anterior).

- Valor genético esperado de los machos para monta natural nacidos en los rebaños comerciales

$$X_{33}' = X_{32}$$

$$X_{34}' = X_{33}$$

$$X_{35}' = X_{34}$$

$$X_{36}' = X_{35}$$

Anexo 2. Ecuaciones para calcular los costos

Nota: En las ecuaciones $\widehat{\cdot}$ es el valor nuevo de la variable de decisión

- Costo asociado con la compra de machos (*CMP*) por el centro de colección de semen cada año (*t*)

$$CMP = \sum_{t=2}^{50} mp * cpu * \left(\frac{1}{1+d}\right)^t$$

Donde *mp* es el número de machos jóvenes que el centro de colección de semen compra a los productores cada año, *cpu* es el costo por macho comprado y *d* es la tasa de interés real (0.05) (Hill, 1981).

- Costo asociado con el entrenamiento de machos para ser colectados (*CMT*) cada año (*t*)

$$CMT = \sum_{t=3}^{50} mt * ct * \left(\frac{1}{1+d}\right)^t$$

Donde *mt* es el número de machos entrenados por año, *ct* es el costo por macho entrenado y *d* es la tasa de interés real (0.05) (Hill, 1981).

- Costo asociado con la colección de dosis semen de machos para prueba de progenie (*CO*) cada año (*t*)

$$CO = \left(\frac{\widehat{bpt} * ndosis * cc}{2} * \left(\frac{1}{1+d}\right)^3\right) + \left(\sum_{t=4}^{50} \widehat{bpt} * ndosis * cc * \left(\frac{1}{1+d}\right)^t\right)$$

Donde \widehat{bpt} es el número de machos en prueba de progenie cada año, *ndosis* es el número de dosis producidas por macho en prueba de progenie, *cc* es el costo por colectar una dosis por macho y *d* es la tasa de interés real (0.05) (Hill, 1981).

- Costo asociado con la preservación de dosis congeladas de machos en prueba de progenie ($DPBPT$) cada año (t)

$$DPBPT = \left(\frac{\widehat{bpt} * ndosis * cppt}{2} * \left(\frac{1}{1+d} \right)^3 \right) +$$

$$\left(\left(\frac{ndosis}{2} + (ndosis - dspt) \right) * \widehat{bpt} * cppt * \left(\frac{1}{1+d} \right)^4 \right) +$$

$$\left(\sum_{t=5}^{50} \left[\frac{ndosis}{2} + (2(ndosis - dsbpt)) \right] * \widehat{bpt} * cppt * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right)$$

Donde $ndosis$ es el número de dosis de semen producidas por macho en prueba de progenie, $dsbpt$ es el número de dosis usadas durante la prueba de progenie por macho, \widehat{bpt} es el número de machos en prueba de progenie por año, $cppt$ es el costo por preservar una dosis de semen congelada por año y d es la tasa de interés real (0.05) (Hill, 1981).

- Costo asociado con la preservación de dosis congeladas de machos elite (DPE) cada año (t)

Si $\widehat{ny} = 4$, entonces:

$$DPE = \left((ndosis - dspt) * \widehat{bpt} * \widehat{perpt} * cppt * \left(\frac{1}{1+d} \right)^6 \right) +$$

$$\left(((ndosis * 2) - (dsbpt * 2) - dss_1) * \widehat{bpt} * \widehat{perpt} * cppt * \left(\frac{1}{1+d} \right)^7 \right) +$$

$$(((ndosis * 3) - (dsbpt * 3) - (dss_1 * 2) - dss_2) * \widehat{bpt} * \widehat{perpt} * cppt * \left(\frac{1}{1+d} \right)^8)$$

$$+ \left(\sum_{t=9}^{50} [(ndosis * 4) - (dsbpt * 4) - (dss_1 * 3) - (dss_2 * 2) - dss_3] * \widehat{bpt} * \widehat{perpt} * cppt * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right)$$

Si $\widehat{ny} = 3$, entonces:

$$DPE = \left((ndosis - dspt) * \widehat{bpt} * \widehat{perpt} * cppt * \left(\frac{1}{1+d} \right)^6 \right) +$$

$$\left(((ndosis * 2) - (dsbpt * 2) - dss_1) * \widehat{bpt} * \widehat{perpt} * cppt * \left(\frac{1}{1+d} \right)^7 \right) +$$

$$+ \left(\sum_{t=8}^{50} [(ndosis * 3) - (dsbpt * 3) - (dss_1 * 2) - dss_2] * \widehat{bpt} * \widehat{perpt} * cppt * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right)$$

Si $\widehat{ny} = 2$, entonces:

$$DPE = \left((ndosis - dspt) * \widehat{bpt} * \widehat{perpt} * cppt * \left(\frac{1}{1+d} \right)^6 \right) +$$

$$+ \left(\sum_{t=7}^{50} [(ndosis * 2) - (dsbpt * 2) - dss_1] * \widehat{bpt} * \widehat{perpt} * cppt * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right)$$

Si $\widehat{ny} = 1$, entonces:

$$DPE = \sum_{t=6}^{50} (ndosis - dspt) * \widehat{bpt} * \widehat{perpt} * cppt * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t$$

Donde \widehat{ny} es el número de años en servicio de los machos elite, $ndosis$ es el número de dosis producidas por macho en prueba de progenie, $dsbpt$ es el número de dosis usadas por macho para prueba de progenie, dss_1 es el número de dosis usadas durante el primer año de servicio de un macho elite, dss_i es el número de dosis usadas durante el i -ésimo año de servicio de un macho elite, \widehat{bpt} es el número de machos en prueba de progenie por año, \widehat{perpt} es la fracción seleccionada de machos con prueba de progenie para ser elite, $cppt$ es el costo

por preservar una dosis de semen congelada por año y d es la tasa de interés real (0.05) (Hill, 1981).

- Costo asociado con la aplicación de dosis en las cabras del núcleo y de los rebaños comerciales

Si $\widehat{ny} = 4$, entonces:

$$\begin{aligned}
 AI = & \left(\sum_{t=3}^5 gpt * cpAI * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right) + \\
 & \left(\left(\left(\left((NT * \widehat{AIper}) - gpt + dosiss \right) * wme_1 \right) + gpt \right) * cpAI * \left(\frac{1}{1+d} \right)^6 \right) + \\
 & \left(\left(\left(\left((NT * \widehat{AIper}) - gpt + dosiss \right) * (wme_1 + wme_2) \right) + gpt \right) * cpAI * \left(\frac{1}{1+d} \right)^7 \right) + \\
 & \left(\left(\left(\left((NT * \widehat{AIper}) - gpt + dosiss \right) * (wme_1 + wme_2 + wme_3) \right) + gpt \right) * cpAI * \left(\frac{1}{1+d} \right)^8 \right) + \\
 & \left(\sum_{t=9}^{50} [(NT * \widehat{AIper}) + dosiss] * cpAI * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right)
 \end{aligned}$$

Si $\widehat{ny} = 3$, entonces:

$$\begin{aligned}
 AI = & \left(\sum_{t=3}^5 gpt * cpAI * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right) + \\
 & \left(\left(\left(\left((NT * \widehat{AIper}) - gpt + dosiss \right) * wme_1 \right) + gpt \right) * cpAI * \left(\frac{1}{1+d} \right)^6 \right) + \\
 & \left(\left(\left(\left((NT * \widehat{AIper}) - gpt + dosiss \right) * (wme_1 + wme_2) \right) + gpt \right) * cpAI * \left(\frac{1}{1+d} \right)^7 \right) + \\
 & \left(\sum_{t=8}^{50} [(NT * \widehat{AIper}) + dosiss] * cpAI * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right)
 \end{aligned}$$

Si $\widehat{ny} = 2$, entonces:

$$AI = \left(\sum_{t=3}^5 gpt * cpAI * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right) +$$

$$\left(\left(\left(\left(\left(NT * \widehat{AIper} \right) - gpt + dosiss \right) * wme_1 \right) + gpt \right) * cpAI * \left(\frac{1}{1+d} \right)^6 \right) +$$

$$\left(\sum_{t=7}^{50} [(NT * \widehat{AIper}) + dosiss] * cpAI * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right)$$

Si $\widehat{ny} = 1$, entonces:

$$AI = \left(\sum_{t=3}^5 gpt * cpAI * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right) +$$

$$\left(\sum_{t=6}^{50} [(NT * \widehat{AIper}) + dosiss] * cpAI * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right)$$

Donde \widehat{ny} es el número de años en servicio de los machos elite, gpt es número de cabras apareadas con machos en prueba de progenie, NT es el número de cabras en el núcleo, \widehat{AIper} es la fracción de cabras inseminadas en el núcleo, $dosiss$ es el número de dosis que el núcleo vende al área comercial cada año, wme_i es la fracción de dosis de semen de machos elite en el i -ésimo año de servicio, usadas cada año, $cpAI$ es el costo por aplicar una dosis de semen y d es la tasa de interés real (0.05) (Hill, 1981).

- Costo asociado con el mantenimiento de los machos de monta natural en el núcleo (NSC) cada año (t)

Si $\widehat{n\bar{y}} = 4$, entonces:

$$\begin{aligned}
 NSC = & \left(\sum_{t=1}^2 \frac{NT}{NSpf} * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right) + \\
 & \left(\sum_{t=3}^5 \frac{NT - (gpt * fertai)}{NSpf} * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right) + \\
 & \left(\frac{NT - \left(\left(\left(\left((NT * \widehat{AIper}) - gpt \right) * wme_1 \right) + gpt \right) * fertai \right)}{NSpf} * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^6 \right) + \\
 & \left(\frac{NT - \left(\left(\left(\left((NT * \widehat{AIper}) - gpt \right) * (wme_1 + wme_2) \right) + gpt \right) * fertai \right)}{NSpf} * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^7 \right) + \\
 & \left(\frac{NT - \left(\left(\left(\left((NT * \widehat{AIper}) - gpt \right) * (wme_1 + wme_2 + wme_3) \right) + gpt \right) * fertai \right)}{NSpf} * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^8 \right) + \\
 & \left(\sum_{t=9}^{50} NS * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right)
 \end{aligned}$$

Si $\widehat{ny} = 3$, entonces:

$$\begin{aligned}
 NSC = & \left(\sum_{t=1}^2 \frac{NT}{NSpf} * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right) + \\
 & \left(\sum_{i=3}^5 \frac{NT - (gpt * fertai)}{NSpf} * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^i \right) + \\
 & \left(\frac{NT - \left(\left(\left(\left((NT * \widehat{AIper}) - gpt \right) * wme_1 \right) + gpt \right) * fertai \right)}{NSpf} * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^6 \right) + \\
 & \left(\frac{NT - \left(\left(\left(\left((NT * \widehat{AIper}) - gpt \right) * (wme_1 + wme_2) \right) + gpt \right) * fertai \right)}{NSpf} * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^7 \right) + \\
 & \left(\sum_{t=8}^{50} NS * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right)
 \end{aligned}$$

Si $\widehat{ny} = 2$, entonces:

$$\begin{aligned}
 NSC = & \left(\sum_{t=1}^2 \frac{NT}{NSpf} * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right) + \\
 & \left(\sum_{i=3}^5 \frac{NT - (gpt * fertai)}{NSpf} * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^i \right) + \\
 & \left(\frac{NT - \left(\left(\left(\left((NT * \widehat{AIper}) - gpt \right) * wme_1 \right) + gpt \right) * fertai \right)}{NSpf} * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^6 \right) + \\
 & \left(\sum_{t=7}^{50} NS * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right)
 \end{aligned}$$

Si $\widehat{ny} = 1$, entonces:

$$NSC = \left(\sum_{t=1}^2 \frac{NT}{NSpf} * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right) +$$

$$\left(\sum_{i=3}^5 \frac{NT - (gpt * fertai)}{NSpf} * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right) +$$

$$\left(\sum_{t=6}^{50} NS * cpNS * \left(\frac{1}{1+d} \right)^t \right)$$

Donde \widehat{ny} es el número de años en servicio de los machos elite, NT es el número de hembras en el núcleo, $NSpf$ es el número de cabras por macho para monta natural, $cpNS$ es el costo por mantener un macho para monta natural por año, gpt es el número de cabras apareadas con los machos en prueba de progenie, $fertai$ es la tasa de fertilidad con inseminación artificial, \widehat{AIper} es la fracción de hembras inseminadas en el núcleo por año, $dosiss$ es el número de dosis que el núcleo vende a los rebaños comerciales cada año, wme_i es la fracción de dosis de semen de machos elite en su i -ésimo año de servicio, usadas cada año, NS es el número de machos de monta natural en el núcleo y d es la tasa de interés real (0.05) (Hill, 1981).