



## Parámetros, correlaciones y tendencias genéticas de caracteres reproductivos en ganado Holstein de México



Carolina Durán-Alvarez <sup>a,b,c</sup>

Adriana García-Ruiz <sup>b</sup>

Rogelio Alejandro Alonso Morales <sup>c</sup>

Luis E. Eguiarte <sup>d</sup>

Felipe de Jesús Ruiz-López <sup>b\*</sup>

<sup>a</sup> Universidad Nacional Autónoma de México. Posgrado en Ciencias Biológicas, Circuito de Posgrados, Edificio D, 1<sup>er</sup> Piso, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán. 04510, Ciudad de México, México.

<sup>b</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Fisiología y Mejoramiento Animal. Querétaro, México.

<sup>c</sup> Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Ciudad de México, México.

<sup>d</sup> Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ecología, Departamento de Ecología Evolutiva. Ciudad de México, México.

\*Autor de correspondencia: [ruiz.felipe@inifap.gob.mx](mailto:ruiz.felipe@inifap.gob.mx)

### Resumen:

El objetivo fue calcular los parámetros, correlaciones y describir las tendencias genéticas de caracteres reproductivos en ganado Holstein de México en tres periodos diferentes de tiempo, en hembras nacidas entre 2006 y 2019, usando registros de la asociación Holstein de México. Los parámetros reproductivos calculados fueron: intervalo parto a primer servicio (IPPS), el número de servicios por concepción (NSC), los días abiertos (DAB), el intervalo entre partos

(IEP) y la edad al primer parto (EPP). Los componentes de la varianza fueron estimados utilizando máxima verosimilitud restringida en un modelo animal, para calcular parámetros genéticos (heredabilidad en sentido estricto ( $h^2$ ), repetibilidad ( $r$ ) y correlaciones genéticas) y correlaciones fenotípicas. También se estimaron varianzas genéticas aditivas y valores genéticos en tres periodos de tiempo (P1: 2006-2009, P2: 2010-2013 y P3: 2014-2017). Las heredabilidades calculadas fueron de 4 a 9 % y las repetibilidades del 8 al 9 %, valores cercanos a reportes previos para características de fertilidad. Las correlaciones fenotípicas fueron positivas para casi todos los parámetros reproductivos y las genéticas fueron positivas en un rango amplio (0.13-0.99). Los análisis por periodos mostraron cambios, posiblemente derivados de la influencia de la importación y uso de germoplasma de toros extranjeros (principalmente de los Estados Unidos de América y Canadá) que implementan selección genómica e incluyen características de fertilidad. La presente investigación ha permitido actualizar la información de parámetros reproductivos y genéticos en caracteres de fertilidad que podrán ser incorporados a las evaluaciones genéticas nacionales.

**Palabras clave:** Caracteres reproductivos, Ganado Holstein, Parámetros genéticos, Heredabilidad, Repetibilidad.

Recibido: 30/05/2022

Aceptado: 23/01/2023

## Introducción

En animales domésticos como los bovinos, el estudio de la reproducción se basa en registros de los eventos reproductivos de los hatos, incluyendo las fechas de nacimiento, de inseminación y de parto, con lo cual es posible calcular los parámetros reproductivos (PR)<sup>(1,2)</sup>. Ejemplos de PR son los días de parto al primer servicio/inseminación, el porcentaje de concepción al primer servicio, el intervalo entre partos, los días del parto a la fecha de concepción, el número de servicios por concepción y la edad al primer parto, pudiendo estar correlacionados estos entre sí<sup>(3,4)</sup>. Los parámetros reproductivos que son utilizados para el estudio de fertilidad de las vacas difirieron entre cada país<sup>(3,5)</sup>.

En ganado lechero de la raza Holstein existen diversos reportes publicados a nivel mundial sobre una reducción de la fertilidad desde los años 80s y hasta principios de los años 2000<sup>(6,7)</sup>, aparentemente debida al mejoramiento genético de la producción de leche<sup>(7,8)</sup>, lo que está aunado a una correlación genética negativa reportada entre la fertilidad y la producción de leche<sup>(9,10)</sup>.

Para los productores de leche, una reducción en la fertilidad causa pérdidas e impactos económicos importantes<sup>(10,11)</sup>. Al requerir un mayor número de inseminaciones para que una vaca quede gestante, se incrementan los costos de inseminación y se alarga el intervalo entre partos<sup>(7,9)</sup>, disminuyendo el promedio de producción de leche del hato, así como el número de crías por vaca<sup>(10,11)</sup>. Asimismo, un menor número de vacas quedará gestante dentro de los plazos requeridos, lo que incrementa el “desecho involuntario” o sacrificio de la vaca debido a baja fertilidad<sup>(10,11)</sup>, incrementando los costos al comprar o criar a un animal de remplazo adicional en el establo<sup>(11,12)</sup>.

Por lo anterior, la fertilidad y el inicio la vida productiva de la vaca son factores de importancia prioritaria en la productividad de por vida del ganado lechero<sup>(2,12)</sup>. Su estudio es importante para la futura rentabilidad de los sistemas de producción y reducción del desecho generado por fertilidades deficientes<sup>(9,11)</sup>.

Para aumentar la producción de leche en ganado, se ha utilizado la selección genética, con metodologías desarrolladas e implementadas a partir de los registros fenotípicos y genealógicos<sup>(13,14)</sup>. Desde hace un poco más de 20 años se propuso el uso de marcadores genéticos distribuidos en todo el genoma, como los polimorfismos de un solo nucleótido (SNP, por sus siglas en inglés) para ayudar a la selección, a través de la denominada selección genómica (SG)<sup>(15)</sup>, empleada por primera vez en ganado Holstein de Estados Unidos a finales de 2009<sup>(16)</sup>.

Desde hace varias generaciones en países como los Estados Unidos de América y Canadá, las características de fertilidad en el ganado Holstein han sido evaluadas y mejoradas<sup>(16,17)</sup>, y el uso de la SG resultó en un incremento de la tasa de mejoramiento, a pesar de ser características generalmente de baja heredabilidad<sup>(16,17)</sup> y no se conoce el posible impacto que esta selección ha tenido sobre los parámetros y valores genéticos de poblaciones que importan germoplasma de estos países, como lo es México. Por otro lado, en México son escasos los trabajos con la intención de estudiar aspectos genéticos de características de fertilidad<sup>(18,19,20)</sup>, a pesar de su alto impacto económico y funcional en los hatos mexicanos. Por todo lo anterior el objetivo del presente estudio fue el de calcular los parámetros, correlaciones y describir las tendencias genéticas de caracteres reproductivos en ganado Holstein de México en tres periodos diferentes de tiempo.

## **Material y métodos**

### **Datos y parámetros reproductivos analizados**

En este estudio se incluyeron 415,859 registros reproductivos de vacas Holstein (*Bos taurus taurus*) que contaran con información de producción de leche, eventos de inseminación

(artificial (AI) o monta natural (MN)) y parto, ocurridos entre enero de 2006 a diciembre de 2019; información proporcionada por la asociación Holstein de México.

Los PR que se calcularon e incluyeron en el presente estudio fueron: intervalo parto a primer servicio (IPPS), medido como los días transcurridos entre el parto y el primer servicio/inseminación; número de servicios por concepción (NSC), corresponde a el número de servicios/inseminaciones hasta la gestación; los días abiertos (DAB), son los días transcurridos entre el parto y la nueva gestación de la vaca, el intervalo entre partos (IEP) medido como el número de meses entre dos partos consecutivos, y finalmente, la edad al primer parto (EPP), que corresponde a la edad registrada en que cada vaca tiene su primer parto. Los primeros cuatro PR en conjunto nos indican la capacidad de las vacas para concebir y restablecer el ciclo estral; y por parte de los ganaderos, la capacidad de detección del estro e inseminación<sup>(5)</sup>. El último PR (edad al primer parto) es una medida de la habilidad de la becerria para crecer y concebir a edades tempranas.

Para garantizar la calidad de los datos de los PR estudiados, se aplicaron límites que fueran biológicamente posibles para prevenir el uso de información errónea (outliers), tomando en cuenta los valores reportados por el Servicio de Evaluación Internacional de Sementales (INTERBULL por sus siglas en inglés)<sup>(21)</sup>. De esta manera se excluyeron registros con días parto al primer servicio  $< 20$  o  $> 365$  días, cuando el número de servicios por concepción era mayor a 10, cuando los días abiertos fueran  $< 20$  o  $> 365$ , cuando los intervalos entre partos estuvieran fuera del rango de 290 a 762 días y cuando la edad al primer parto fuera  $< 18$  o  $> 40$  meses, las estadísticas descriptivas de las variables estudiadas se muestran en el Cuadro 1.

Después del control de calidad, el conjunto de datos consistió de 202,545 registros para IPPS y NSC; 194,816 registros para DAB; 139,901 para IEP y 103,467 para EPP. Los archivos de pedigrí incluyeron entre 103,467 y 202,545 animales, dependiendo del rasgo evaluado e incluyeron hasta tres generaciones de ancestros de los animales con registro reproductivo.

### **Estimación de componentes de varianza**

Los componentes de varianza para IPPS, NSC, DAB e IEP fueron estimados con un modelo animal de repetibilidad, por separado para cada característica para aprovechar la mayor cantidad de información posible. En el modelo animal, la disponibilidad de registros individuales permite la predicción de los valores genéticos para todos los individuos de la población (aun cuando no cuenten con información fenotípica pero sí genealógica). Los valores genéticos son calculados con el mejor predictor lineal insesgado, con un modelo de ecuaciones mixtas (ecuación 1)<sup>(13)</sup>, donde el efecto aleatorio se refiere al animal que tiene registros y sus ancestros, y los efectos fijos son todos aquellos efectos ambientales, como por ejemplo el año de nacimiento<sup>(14)</sup>.

Con el objeto de controlar en los modelos de los PR, fuentes de variación ajenas a las estudiadas se incluyeron como efectos fijos: las subclases de hato/año/estación de parto o hato-año estación de nacimiento para EPP, con cuatro temporadas definidas según el mes de parto (enero a marzo, abril a junio, julio a septiembre y octubre a diciembre); el nivel de producción (clasificado en cuatro niveles para todos los establos de 1 a 4, buscando asignar a las vacas al cuartil que describa su nivel de producción dentro de su hato/año/estación de parto, siendo el 1 el de más baja producción y el 4 el de más alta producción); el número de parto (agrupando a las vacas con cuatro lactaciones o más en una sola clase) y edad al parto. Como efectos aleatorios se incluyeron al animal y el ambiente permanente de la vaca. En el caso de EPP, no se contó con ambiente permanente.

El modelo animal general utilizado fue:

$$y = Xb + Zu + e \quad \text{[ecuación 1]}$$

Donde:

**y**=variable de interés (vector de registros de: IPPS, NSC, DAB, IEP, EPP);

**b**= vector de efectos fijos (hato-año-estación de parto (hys) o hato-año estación de nacimiento (hysn) para EPP, nivel de producción (np), número de parto (nop) y edad al parto (ep));

**u**= vector de efectos aleatorios (efecto del animal y ambiente permanente cuando aplique);

**X**= matriz de incidencia que relaciona las observaciones con los efectos fijos;

**Z**= matriz de incidencia que relaciona las observaciones con los efectos aleatorios (animal y ambiente permanente);

**e**= vector de los efectos del error o residuales.

No se realizaron transformaciones de las variables estudiadas porque estudios previos<sup>(12)</sup> mostraron que no son necesarias. Las estimaciones de los componentes de varianza se hicieron por medio de máxima verosimilitud restringida<sup>(22)</sup>, utilizando la paquetería BLUPF90<sup>(23)</sup>.

## Análisis multivariados

Con el objeto de estimar las covarianzas y correlaciones genéticas para cada par de características, se realizaron análisis bivariados utilizando los modelos anteriormente descritos.

El modelo general utilizado fue:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_1 & 0 \\ 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$$

donde los subíndices 1 y 2 identifican el par de características a ser evaluadas (IPPS, NSC, DAB, IEP, EPP) con sus respectivos efectos fijos y aleatorios.

## Parámetros y correlaciones genéticas

Las heredabilidades en sentido estricto ( $h^2$ ), repetibilidades ( $r$ ) y correlaciones genéticas<sup>(24)</sup> entre los PR fueron obtenidas a partir de las estimaciones de los componentes de varianza utilizando la paquetería BLUPF90<sup>(23)</sup>. Las desviaciones estándar de los parámetros estimados se aproximaron a partir de sus esperanzas usando el programa REMLF90<sup>(23)</sup>.

### Análisis por periodos (varianza genética aditiva y valores genéticos)

Tomando en consideración que la importación de germoplasma de diferentes países a nivel mundial, especialmente de Estados Unidos y Canadá, se ha venido incrementando en los últimos años, llegando a representar casi el 80 % de los sementales utilizados en la población estudiada, así como los cambios en los valores de los parámetros reproductivos de estos países (por la introducción de información genómica en los procesos de evaluación y selección desde 2009), los datos fueron agrupados en tres periodos, cada uno de cuatro años (P1: 2006-2009, P2: 2010-2013 y P3: 2014-2017). En el primer periodo se consideró que la selección estaba basada en el pedigrí que utiliza información de los registros de las vacas y sus parientes. En el segundo periodo, se inició la incorporación de información genómica a la selección. En el tercer periodo se considera que la selección genómica está instaurada, y con ella la posibilidad de incrementar la precisión de las evaluaciones de las características de baja heredabilidad.

## Resultados y discusión

### Parámetros reproductivos

El promedio para IPPS fue de 71.5 días, lo cual podría indicar que las primeras inseminaciones se están realizando entre 10 y 30 días después del restablecimiento del ciclo estral (21 días) y del posterior periodo de espera voluntario (usualmente de 40 días). En comparación, las mediciones que se realizaron en distintos países reportaron promedios que van entre 70 y 93 días (Cuadro 1).

**Cuadro 1:** Estadísticas descriptivas de los parámetros reproductivos en poblaciones Holstein incluyendo las del presente estudio

Autor	País	IPPS	NSC	DAB	IEP	EPP
		$\bar{x} \pm DE$				
29	USA	87.6 $\pm$ 26	-	109.2 $\pm$ 38	-	33.6 $\pm$ 12.1
6	USA	-	-	131.5	-	-
26	CAN	80.2	1.66	108.4	-	-
34	USA	-	-	-	-	27.2 $\pm$ 3.3
36	USA	70.5 $\pm$ 26	-	-	-	-
36	USA	91.5 $\pm$ 40	-	-	-	-
31	ITA	84.5 $\pm$ 37	1.7 $\pm$ 0.1	-	413.5 $\pm$ 82	-
12	ESP	81 $\pm$ 28	1.9 $\pm$ 1.2	117 $\pm$ 57.1	400 $\pm$ 60	-
33	MEX	-	-	-	406 $\pm$ 67	27.6 $\pm$ 2.9
33	USA	-	-	-	401 $\pm$ 62	27.1 $\pm$ 3.1
28	DNK	81.3 $\pm$ 40	2.2 $\pm$ 1.5	133.3 $\pm$ 76	413.1 $\pm$ 76	-
18	MEX	73 $\pm$ 45	2.0 $\pm$ 1.3	101 $\pm$ 54	389 $\pm$ 57	-
25	TUN	93.2 $\pm$ 80	2.6 $\pm$ 1.7	150.9 $\pm$ 76	444.2 $\pm$ 102	-
19	MEX	-	-	-	418.6 $\pm$ 89	-
30	IRN	72.9 $\pm$ 35	2.1 $\pm$ 1.4	117.7 $\pm$ 64	393.9 $\pm$ 63	-
27	COL	-	1.6 $\pm$ 1.0	127.2 $\pm$ 77	410.3 $\pm$ 78	-
32	CZE	-	-	-	400 $\pm$ 59	25.3 $\pm$ 2.5
Presente estudio	MEX	71.5 $\pm$ 23	2.7 $\pm$ 1.9	131.6 $\pm$ 74	413.6 $\pm$ 85	24.2 $\pm$ 2.7

IPPS= intervalo a primer servicio en días, NSC= número de servicios por concepción, DAB= días abiertos, IEP= intervalo entre partos en días, EPP= edad al primer parto en meses,  $\bar{x}$ = promedio para la característica, DE= desviación estándar

Los resultados para NSC fueron de 2.7 en promedio (Cuadro 1), similar a los 2.55 reportados en una población de esta misma raza (Holstein) de Túnez<sup>(25)</sup>. Promedios menores desde 1.58 y hasta 2 servicios por concepción han sido reportados en poblaciones de España<sup>(12)</sup>, México<sup>(18)</sup>, Canadá<sup>(26)</sup> y Colombia<sup>(27)</sup> de la raza Holstein. La diferencia, puede ser ocasionada por los límites superiores de 7 servicios que establecieron los autores mencionados, respecto a los 10 servicios tomados en cuenta en las estimaciones de este trabajo.

Para DAB, los resultados mostraron 131.6 días, en concordancia con los 131.5 días reportados en una población de Estados Unidos<sup>(6)</sup>, de Dinamarca con 133.3 días<sup>(28)</sup>; o en Colombia con 127.2 días<sup>(27)</sup> (Cuadro 1). Mientras que promedios menores fueron obtenidos en otros estudios desde los 101 días y hasta 117 días<sup>(18,29,30)</sup>. En contraste en Túnez reportaron un valor de 150 días<sup>(25)</sup>. Como en las características antes discutidas, las diferencias entre este estudio y los aquí citados podrían deberse a la variación de los límites utilizados para

cada población, así como por problemas de salud posparto propias de cada población estudiada<sup>(29)</sup>.

El promedio de IEP de 413 días coincide con otras poblaciones<sup>(28,31)</sup> (Cuadro 1), así como reportes que varían entre los 400 a los 416 días<sup>(19,27,32)</sup>. Por otra parte, promedios menores de 389 días se reportaron en 2010 con una población mexicana Holstein y Pardo Suizo bajo condiciones subtropicales<sup>(18)</sup>.

Para EPP los resultados fueron de 24.15 meses (Cuadro 1), similar a lo reportado en varios estudios, como los 25.34 meses mencionados de República Checa<sup>(32)</sup>, los 27.1 en poblaciones de los Estados Unidos<sup>(33,34)</sup>, así como 27.6 meses en otra población mexicana<sup>(33)</sup> de la asociación Holstein de México que comprende datos de 1971 a 1995. En contraste, en una población de Estados Unidos reportaron 33.6 meses<sup>(29)</sup>. Este parámetro habla de la capacidad de la becerro para crecer y concebir a edades tempranas<sup>(5)</sup>, la cual puede ser diferente para cada población, ya que hay una relación costo-beneficio en lograr edades al primer parto más tempranas<sup>(11)</sup>. Es decir, es una decisión voluntaria y económica de los administradores de cada población, porque la edad a primera inseminación determina la EPP y la primera casi siempre es una decisión de tipo administrativo, ya que el costo asociado a desarrollar a la becerro más rápido puede ser importante en algunos medios ambientes (países y sistemas de producción)<sup>(11,35)</sup>.

Las diferencias obtenidas en los PR evaluados y las mencionadas anteriormente, ilustran la dificultad en su estimación y la falta de un consenso sobre límites biológicos aceptables en las mediciones de estas características<sup>(3,5)</sup>, lo cual genera posibles sesgos a las estimaciones y en dificultades para su comparación. Otras cuestiones como la dependencia de estas características a las condiciones propias de cada país<sup>(26,27,30)</sup>, los propósitos económicos de cada rancho<sup>(12)</sup>, así como de las condiciones y manejo que varían de un rebaño a otro<sup>(35)</sup> pueden estar generando los cambios observados entre países.

### **Parámetros genéticos**

La heredabilidad tuvo un rango entre 4 y 9 % para los PR estudiados, siendo más alta para EPP (9 %), del 5% para NSC, DAB y IEP, y la menor fue para IPPS con 4 % (Cuadro 2), similar a lo reportado previamente para características de fertilidad<sup>(12,26,27)</sup>.

La heredabilidad más baja obtenida fue para IPPS, con 4 %, similar al 3 % reportado en poblaciones de Túnez<sup>(25)</sup> y Canadá<sup>(26)</sup>, así como el 5 % de una población española<sup>(12)</sup>. Sin embargo, los resultados del presente trabajo fueron menores al 6 % que Italia<sup>(31)</sup> e Irán<sup>(30)</sup> que reportan, así como el 9 % estimado en Dinamarca<sup>(28)</sup>.

**Cuadro 2:** Heredabilidad en sentido estricto y repetibilidad en poblaciones Holstein incluyendo las del presente estudio

Autor	País	IPPS		NSC		DAB		IEP		EPP
		h <sup>2</sup>	r	h <sup>2</sup>						
6	USA	-	-	-	-	0.05	-	-	-	0.05
26	CAN	0.03	0.08	0.03	0.07	0.05	0.10	-	-	-
31	ITA	0.06	0.14	0.03	-	-	-	0.07	-	-
12	ESP	0.05	-	0.02	-	0.04	-	0.04	-	-
28	DNK	0.09	-	0.03	-	0.07	-	0.07	-	-
25	TUN	0.03	0.13	0.03	0.03	0.04	0.14	0.06	0.15	-
19	MEX	-	-	-	-	-	-	0.01	-	0.03
30	IRN	0.06	-	0.05	-	0.08	-	0.07	-	-
27	COL	-	-	0.04	0.07	0.08	0.1	0.09	0.09	-
32	CZE	-	-	-	-	-	-	0.03	0.09	0.03
PE	MEX	0.04 (0.003)	0.09 (0.003)	0.05 (0.004)	0.08 (0.003)	0.05 (0.004)	0.08 (0.003)	0.05 (0.004)	0.08 (0.003)	0.09 (0.007)

PR: parámetro reproductivo, IPPS: intervalo a primer servicio en días, NSC: número de servicios por concepción, DAB: días abiertos, IEP: intervalo entre partos en días, EPP: edad al primer parto en meses, h<sup>2</sup>: heredabilidad, r: repetibilidad, entre paréntesis error estándar, PE: presente estudio.

La heredabilidad estimada para NSC fue del 5 %, en concordancia con lo reportado en una población iraní<sup>(30)</sup>, en Colombia<sup>(27)</sup> con 4 %, y el 3 % reportados en poblaciones de España<sup>(12)</sup>, Túnez<sup>(25)</sup> y Canadá<sup>(26)</sup>.

En cuanto a DAB, la heredabilidad concuerda con la reportada en Canadá<sup>(26)</sup> y Estados Unidos<sup>(6)</sup> del 5 %, así como los estimados en España<sup>(12)</sup> y Túnez<sup>(25)</sup> con 4 %; por otra parte, un 7 % fue reportado en Dinamarca<sup>(28)</sup> y un 8 % estimado en poblaciones de Colombia e Irán<sup>(27,30)</sup>.

Para IEP se estimó una heredabilidad del 5 %, que también fue similar a trabajos previos realizados en Túnez (6 %)<sup>(25)</sup>, España (4 %)<sup>(12)</sup>, República Checa (3 %)<sup>(32)</sup> y menor al 7 % de Italia<sup>(31)</sup>, Dinamarca<sup>(28)</sup>, e Irán<sup>(30)</sup>. El valor de heredabilidad máximo reportado para este parámetro reproductivo es 9 % en Colombia<sup>(27)</sup>, y el menor valor reportado es del 1 %, en la misma población de estudio, en un periodo de tiempo de 1998-2003<sup>(19)</sup>.

La heredabilidad más alta obtenida en el presente estudio fue para EPP, con 9 %, superior al 5 % reportado en una población de Estados Unidos<sup>(6)</sup>, o al 3 % reportado en otra población mexicana<sup>(19)</sup> y en la República Checa<sup>(32)</sup>. Por lo que sería de esperar que en nuestra población la respuesta a la selección para esta característica tuviera un mejor resultado, debido a las diferencias en las heredabilidades.

La estimación de repetibilidad para NSC y DAB fue la misma, ligeramente mayor para IPPS e IEP con 9 % (Cuadro 2). Otros valores reportados para la raza Holstein son similares a los obtenidos en el presente estudio<sup>(26,27,32)</sup>.

Los parámetros genéticos de las características reproductivas incluidas en este estudio tienen valores relativamente bajos (heredabilidad < 10 % y repetibilidad < 15 %)<sup>(12,19,26)</sup> por lo que además de la genética, el ambiente tiene un efecto importante como fuente de variación<sup>(36)</sup>. Es decir, otros factores como la salud<sup>(29,36)</sup>, los aspectos nutricionales<sup>(36)</sup>, así como cuestiones administrativas de manejo (periodo de espera voluntario) por parte de los productores impactan a estas características<sup>(6,26,29)</sup>.

Es importante resaltar que, aunque las heredabilidades encontradas en este estudio son bajas, el mejoramiento genético puede permitir obtener beneficios positivos, permanentes y acumulativos en las poblaciones<sup>(11,16,17)</sup>.

Las correlaciones fenotípicas y genéticas estimadas fueron positivas para casi todos los parámetros reproductivos (Cuadro 3). Las mayores correlaciones genéticas se encontraron entre DAB e IEP (0.99), así como valores altos de 0.84 y 0.88 para NSC con DAB e IEP respectivamente. Para IPPS con DAB e IEP se encontró una correlación intermedia (0.55 y 0.51). Para las otras combinaciones de los rasgos de fertilidad se encontraron correlaciones bajas (de 0.09 a 0.22).

**Cuadro 3:** Correlaciones genéticas arriba de la diagonal (error estándar), debajo de la diagonal correlaciones fenotípicas (número de registros por cada par de características)

	<b>IPPS</b>	<b>NSC</b>	<b>DAB</b>	<b>IEP</b>	<b>EPP</b>
<b>IPPS</b>	-	0.13 (0.06)	0.55 (0.05)	0.51 (0.06)	0.09 (0.07)
<b>NSC</b>	-0.05 (202,545)	-	0.84 (0.02)	0.88 (0.02)	0.22 (0.08)
<b>DAB</b>	0.26 (192,527)	0.77 (194,816)	-	0.99 (0.002)	0.09 (0.08)
<b>IEP</b>	0.23 (138,277)	0.78 (139,901)	0.98 (137,158)	-	0.12 (0.11)
<b>EPP</b>	0.08 (103,467)	0.01 (84,675)	0.06 (80,467)	0.07 (62,999)	-

IPPS= intervalo a primer servicio en días, NSC= número de servicio por concepción, DAB= días abiertos,

IEP= intervalo entre partos en días, EPP= edad al primer parto en meses.

Todas las correlaciones fenotípicas tuvieron una  $P < 0.001$ .

En particular, la correlación genética más baja estimada fue para la asociación entre IPPS y NSC (0.13), similar al 0.12 reportada para estos parámetros en una población italiana<sup>(30)</sup> y también fue la más baja estimada para otra población mexicana<sup>(18)</sup> con un valor de 0.25. El IPPS y los DAB tuvieron asociación genética positiva y moderada de 0.55, en contraste en otra población de España<sup>(12)</sup> y México<sup>(18)</sup> obtuvieron un valor de 0.82 para esta asociación. El estimador de la correlación para IPPS e IEP indica que estas dos características

reproductivas muestran una asociación genética positiva y moderada (0.51), y menor que otra población mexicana (0.89)<sup>(18)</sup>.

La correlación entre NSC y DAB fue positiva y alta (0.84), aunque menor que lo reportado en España<sup>(12)</sup>, México<sup>(18)</sup> y Colombia<sup>(27)</sup> (0.94, 0.97, 0.98, respectivamente). Entre NSC e IEP se encontró un valor de correlación similar de 0.88, cercano al 0.89 reportado en España<sup>(12)</sup>, menor que el 0.95 y 0.97 de Colombia<sup>(27)</sup> y México<sup>(18)</sup> respectivamente; a diferencia del 0.61 reportado en Italia<sup>(30)</sup>. Altos valores de correlación genética indican la posibilidad de seleccionar para una característica, pues a medida que se pueda disminuir o aumentar una, se espera el mismo efecto sobre la otra. Además, la estrecha relación y dependencia de la tasa de detección del estro y la preñez que hay entre estas mediciones, puede explicar estos resultados, así como el hecho de que mismas regiones genéticas estén codificando estas características<sup>(29,37)</sup>.

Entre DAB e IEP se encontraron altos valores de correlación genética (0.99) idénticos a los reportados en España<sup>(12)</sup> e Irán<sup>(30)</sup> y similar al 0.98 reportado en Colombia<sup>(27)</sup>. Los resultados hallados son de esperarse, debido a que el IEP incluye DAB y la duración de la gestación<sup>(29)</sup>, como consecuencia, cualquier variación de los días abiertos debería resultar en cambios del intervalo entre partos. Adicionalmente, estas dos características al ser casi equivalentes, nos sugieren que son controladas por los mismos genes o regiones genéticas, lo que se conoce como efecto pleiotrópico<sup>(37)</sup>.

La edad al primer parto está influenciada por el medio ambiente y las prácticas de manejo comunes a las becerras y vaquillas nacidas en el mismo período (año o año-temporada)<sup>(6)</sup>, lo cual fue corroborado con las bajas correlaciones encontradas entre ésta y los otros PR (Cuadro 3), por lo que estos resultados sugieren independencia genética y fenotípica entre ellos.

## **Análisis por periodos**

### **Varianza genética aditiva**

Los resultados de las estimaciones las varianzas por periodos pueden ser divididos en dos grupos de comparaciones P1 vs P2 y P2 vs. P3 (Cuadro 4). En P1 vs P2 para las varianzas genéticas aditivas se observan valores similares en IPPS (12.48-11.17), NSC (0.15-0.16), DAB (229.8-214.6) e IEP (478-466.7), excepto para EPP (1.23-0.19) que mostró una disminución importante, posiblemente debida a la selección sobre la producción de leche durante este periodo, pues a medida que una vaca queda preñada comenzará su vida productiva.

**Cuadro 4:** Varianza genética aditiva y heredabilidad para cinco parámetros reproductivos en tres periodos de tiempo (P1: 2006-2009, P2: 2010-2013 y P3: 2014-2017)

Parámetro reproductivo	Periodo	Número de registros	$\sigma^2_a \pm EE$	$h^2$
IPPS	P1:06-09	71,667	12.48 $\pm$ 2.2	0.03
	P2:10-13	63,952	11.17 $\pm$ 2.0	0.03
	P3:14-17	43,233	19.88 $\pm$ 3.0	0.06
NSC	P1:06-09	71,667	0.15 $\pm$ 0.02	0.05
	P2:10-13	63,952	0.16 $\pm$ 0.02	0.05
	P3:14-17	43,233	0.10 $\pm$ 0.02	0.04
DAB	P1:06-09	69,417	229.8 $\pm$ 35.32	0.04
	P2:10-13	62,783	214.6 $\pm$ 33.87	0.04
	P3:14-17	42,790	194.8 $\pm$ 25.66	0.05
IEP	P1:06-09	54,005	478.0 $\pm$ 51.1	0.07
	P2:10-13	48,388	466.7 $\pm$ 52.5	0.07
	P3:14-17	25,801	266.8 $\pm$ 53.9	0.05
EPP	P1:06-09	31,542	1.23 $\pm$ 0.12	0.22
	P2:10-13	34,094	0.19 $\pm$ 0.04	0.04
	P3:14-17	31,222	0.15 $\pm$ 0.03	0.04

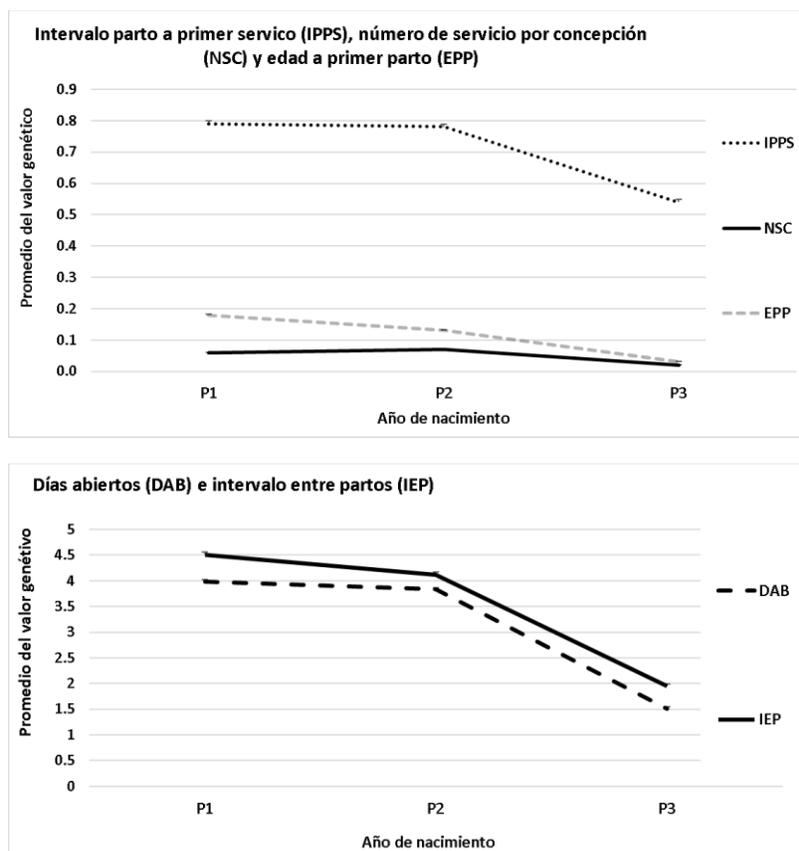
IPPS= intervalo a primer servicio en días, NSC= número de servicio por concepción, DAB= días abiertos, IEP= intervalo entre partos en días, EPP= edad al primer parto en meses,  $\sigma^2_a$ = varianza genética aditiva, EE= error estándar,  $h^2$ = heredabilidad en sentido estricto.

En P2 vs P3 se observó un aumento en IPPS (11.17-19.88) en la varianza genética aditiva, sugiere la diversidad genética y mientras más grande sea, mayor será la oportunidad de la respuesta a la selección<sup>(38)</sup>. Por el contrario, se observaron disminuciones para NSC (0.16-0.10), DAB (214.6-194.8) y en IEP (466.7-266.8), mientras que EPP fue similar al periodo anterior (0.19-0.15). La disminución en las varianzas genéticas aditivas de NSC, DAB e IEP, puede ser debida a una presión selectiva de estas características.

### Valores genéticos

Los cambios a través del tiempo entre grupos P1 vs P2, y P2 vs P3 se muestran en las Figuras 1a y 1b, donde se puede observar cómo, en general, las tendencias genéticas fueron similares entre P1 y P2, disminuyendo en P3. Estos resultados van en línea con los criterios de elección de semen de los ganaderos que durante los dos primeros períodos pusieron énfasis en el volumen de leche disminuyendo éste en P3 mientras que en caso de características reproductivas no hubo cambios en P1 y P2, pero sí se observó un cambio positivo en P3 [Durán C., 2022, datos no publicados].

**Figura 1:** Tendencias genéticas para IPPS, NSC y EPP (a) y para DAB e IEP (b) en tres periodos de tiempo (P1: 2006-2009, P2: 2010-2013 y P3: 2014-2017)



Para el grupo II (P2 vs P3), se puede observar una disminución en los valores genéticos promedio para IPPS, DAB, IEP y EPP, no así para NSC. Esta reducción en los valores genéticos es deseable, debido a que lo que se busca en estas características de fertilidad estudiadas es la disminución.

Estos cambios en características de fertilidad posiblemente podrían ser atribuidas la importación y uso de germoplasma de Estados Unidos desde 1950<sup>(39)</sup>, que desde 2003 ha mejorado características de fertilidad<sup>(17)</sup> y desde 2009 haciendo uso de la selección genómica<sup>(16)</sup>.

Para el NSC no se observaron cambios en los valores genéticos, probablemente porque esta característica depende de manera importante de las técnicas de inseminación, mismas que no dependen de la población de origen del germoplasma.

Los resultados de este trabajo muestran como la incorporación de la información genómica en los procesos de selección de los países de origen del germoplasma importado, aparentemente, ha tenido un efecto positivo en nuestra población (Figuras 1a y 1b),

independientemente de la baja heredabilidad y la dificultad de medición de las características de fertilidad<sup>(16,17)</sup>.

## Conclusiones e implicaciones

Las estimaciones de heredabilidad y repetibilidad de los parámetros reproductivos obtenidos en el presente estudio fueron bajas y similares a reportes previos en la raza. Sin embargo, la variación genética aditiva existente es suficiente para esperar resultados favorables y acumulativos (aunque lentos) en la selección de estas características. Las correlaciones estimadas entre los PR fueron positivas, destacando que fueron altas entre NSC, DAB e IEP, en particular la correlación entre DAB e IEP, con una correlación del 0.99, lo que sugiere que sería recomendable seleccionar solamente para un parámetro, ya que se pudiera considerar que sus efectos son controlados por las mismas regiones genéticas. Los resultados de las estimaciones de las varianzas genéticas aditivas y valores genéticos en diferentes periodos, muestran la existencia de cambios a través del tiempo en la población, posiblemente derivados de la implementación de la selección genómica en los países proveedores de germoplasma como lo son Canadá y los Estados Unidos.

## Agradecimientos y conflicto de interés

Este artículo forma parte de los requisitos necesarios para la obtención de grado de Doctora en Ciencias en el Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) de la primera autora CDA. Agradecemos al M. en C. Enoc Mejía, al M. en C. José Cortés y a la MVZ Marisol Morales por su asesoramiento en el manejo de las bases de datos, así como la Asociación Holstein de México por la información otorgada. El estudio fue financiado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) con el proyecto No. SIGI: 15352034772. También se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca no. 631475 proporcionada a CDA. Los autores declaran no conflicto de interés.

## Literatura citada:

1. Flaws JA, Spencer TE. Female reproduction, content and volume overview. In: Academic Press. Encyclopedia of reproduction. 2nd ed. USA: Academic Press Books – Elsevier; 2018: V2:1-2.
2. Walsh SW, Williams EJ, Evans ACO. A review of the causes of poor fertility in high milk producing dairy cows. Anim Reprod Sci 2011;123(3-4):127-138.
3. Banos G. Survey on genetic evaluation procedures for functional traits in cattle in various countries. Interbull Bulletin 1996;(12).

4. VanRaden PM, Sanders AH, Tooker ME, Miller RH, Norman HD, Kuhn MT, *et al.* Development of a national genetic evaluation for cow fertility. *J Dairy Sci* 2004;87(7):2285-2292.
5. Jorjani H. International genetic evaluation for female fertility traits. *Interbull Bulletin* 2006;(34):57.
6. Seykora AJ, McDaniel BT. Heritabilities and correlations of lactation yields and fertility for Holsteins. *J Dairy Sci* 1983;66(7):1486-1493.
7. Hageman WHD, Shook GE, Taylor WJ. Reproductive performance in genetic lines selected for high or average milk yield. *J Dairy Sci* 1991;74:4366–4376.
8. Peñagaricano F. Genetics and genomics of dairy cattle. In: Academic Press. *Animal Agriculture*. Texas, USA: Academic Press Books – Elsevier; 2020:101-119.
9. Van Arendonk JA, Hovenier R, De Boer W. Phenotypic and genetic association between fertility and production in dairy cows. *Livest Prod Sci* 1989;21(1):1-12.
10. Vollema AR. Selection for longevity in dairy cattle [doctoral thesis]. Wageningen, The Netherlands: Wageningen University and Research; 1998.
11. Pritchard T, Coffey M, Mrode R, Wall E. Genetic parameters for production, health, fertility and longevity traits in dairy cows. *Animal* 2012;7(1):34-46.
12. González-Recio O, Alenda R. Genetic parameters for female fertility traits and a fertility index in Spanish dairy cattle. *J Dairy Sci* 2005;88:3282-3289.
13. Henderson CR. Applications of linear models in animal breeding. Ontario, Canada: University of Guelph, Guelph; 1984.
14. Mrode RA. Linear models for the prediction of animal breeding values. SRUC UK: Cabi; 2005.
15. Meuwissen TH, Hayes BJ, Goddard ME. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. *Genetics* 2001;157:1819–1829.
16. Wiggans GR, Cole JB, Hubbard SM, Sonstegard TS. Genomic selection in dairy cattle: the USDA experience. *Annu Rev Anim Biosci* 2017;5:309-327.
17. García-Ruiz A, Cole JB, VanRaden PM, Wiggans GR, Ruiz-López FJ, Van Tassell CP. Changes in genetic selection differentials and generation intervals in US Holstein dairy cattle as a result of genomic selection. *Proc Natl Acad Sci* 2016;113(28):E3995-E4004.

18. Ríos-Utrera A, Calderón-Robles R, Rosete-Fernández J, Lagunes-Lagunes J. Análisis genético de características reproductivas de vacas Holstein criadas en un ambiente subtropical. *Agronomía Mesoamericana* 2010;21:245-253.
19. Montaldo HH, Castillo-Juárez H, Valencia-Posadas M, Cienfuegos-Rivas EG, Ruiz-López FJ. Genetic and environmental parameters for milk production, udder health, and fertility traits in Mexican Holstein cows. *J Dairy Sci* 2010;93(5):2168-2175.
20. Montaldo HH, Pelcastre-Cruz A, Castillo-Juárez H, Ruiz-López FJ, Miglior F. Genotype×environment interaction for fertility and milk yield traits in Canadian, Mexican and US Holstein cattle. *Span J Agric Res* 2017;15(2):e0402-e0402.
21. INTERBULL. International Bull Evaluation Service. National genetic evaluation forms provided by countries. 2020. <https://interbull.org/ib/geforms> Accessed Sep 1, 2020.
22. Patterson HD, Thompson R. Recovery of interblock information when block sizes are unequal. *Biometrika* 1971;58:545-554.
23. Misztal I, Aguilar I, Legarra A, Vitezica Z, Tsuruta S, Lourenco D. Manual for BLUPF90 family of programs. 2014. [http://nce.ads.uga.edu/wiki/lib/exe/fetch.php?media=blupf90\\_all7.pdf](http://nce.ads.uga.edu/wiki/lib/exe/fetch.php?media=blupf90_all7.pdf) Accessed Nov 1, 2020.
24. Falconer DS. Introduction to quantitative genetics. 2nd ed. New York, USA: Longman Scientific & Technical; 1981.
25. M'hamdi N, Aloulou R, Brar SK, Bouallegue M, Ben Hamouda M. Phenotypic and genetic parameters of reproductive traits in Tunisian Holstein cows. *Biotechnol Anim Husb* 2010;26:297-307.
26. Hayes JF, Cue RI, Monardes HG. Estimates of repeatability of reproductive measures in Canadian Holsteins. *J Dairy Sci* 1992;75(6):1701-1706.
27. Zambrano JC, Echeverri J. Genetic and environmental variance and covariance parameters for some reproductive traits of Holstein and Jersey cattle in Antioquia (Colombia). *Rev Bras Zootec* 2014;43(3):132-139
28. Sun C, Madsen P, Lund M, Zhang Y, Nielsen US, Su G. Improvement in genetic evaluation of female fertility in dairy cattle using multiple-trait models including dairy yield traits. *J Anim Sci* 2010;88:871-878.
29. Fonseca FA, Britt JH, McDaniel BT, Wilk JC, Rakes AH. Reproductive traits of Holsteins and Jerseys. Effects of age, milk yield, and clinical abnormalities on involution of cervix and uterus, ovulation, estrous cycles, detection of estrus, conception rate, and days open. *J Dairy Sci* 1983;66(5):1128-1147.

30. Ghiasi H, Pakdel A, Nejati-Javaremi A, Mehrabani-Yeganeh H, Honarvar M, González-Recio O, *et al.* Genetic variance components for female fertility in Iranian Holstein cows. *Livest Sci* 2011;139(3):277-280.
31. Biffani S, Canavesi R, Samore AB. Estimates of genetic parameters for fertility traits of Italian Holstein Friesian cattle. *Stocarstvo* 2005;59:145-153.
32. BrzÁková M, Zavadilová L, PŘibyl J, Pešek P, Kašná E, Kranjčevičová A. Estimation of genetic parameters for female fertility traits in the Czech Holstein population. *Czech J Anim Sci* 2019;64(5):199-206.
33. Cienfuegos-Rivas EG, Blake RW, Oltenacu PA, Castillo-Juarez H. Fertility responses of Mexican Holstein cows to US sire selection. *J Dairy Sci* 2006;89(7):2755-2760.
34. Castillo-Juarez H, Oltenacu PA, Blake RW, McCulloch CE, Cienfuegos-Rivas EG. Effect of herd environment on the genetic and phenotypic relationships among milk yield, conception rate, and somatic cell score in Holstein cattle. *J Dairy Sci* 2000;83(4):807-814.
35. Garcia-Peniche TB, Cassell BG, Pearson RE, Misztal I. Comparisons of Holsteins with Brown Swiss and Jersey cows on the same farm for age at first calving and first calving interval. *J Dairy Sci* 2005;88(2):790-796.
36. Weigel KA, Rekaya R. Genetic parameters for reproductive traits of Holstein cattle in California and Minnesota. *J Dairy Sci* 2000;83(5):1072-1080.
37. Bulmer MG. *The mathematical theory of quantitative genetics*. New York, USA: Clarendon Press, Oxford; 1980.
38. Woolliams JA, Oldenbroek JK. Genetic diversity issues in animal populations in the genomic era. In Oldenbroek JK editor. *Genomic management of animal genetic diversity*. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Academic Publishers; 2017:13-45.
39. Cienfuegos-Rivas EG, Oltenacu PA, Blake RW, Schwager SJ, Castillo-Juarez H, Ruiz FJ. Interaction between milk yield of Holstein cows in Mexico and the United States. *J Dairy Sci* 1999;82(10):2218-2223.