

# Modelos matemáticos y procesamiento digital de imágenes para la determinación de producción de leche de cabra

Katherine Elizabeth Chóez Franco  
<https://orcid.org/0000-0001-6027-3770>  
kattychoez@hotmail.com  
Investigador independiente  
Santa Elena, Ecuador

Miguel Ángel Lema Carrera  
<https://orcid.org/0000-0001-7934-8891>  
malema7@espe.edu.ec  
Universidad de las Fuerzas Armadas  
Quito, Ecuador

Verónica Cristina Andrade Yucailla  
<https://orcid.org/0000-0001-7909-2128>  
vandrade@upse.edu.ec  
Universidad Estatal Península de Santa Elena  
La Libertad, Ecuador

Recibido (01/12/2022), Aceptado (03/04/2023)

**Resumen:** Con la finalidad de desarrollar una aplicación en MATLAB para ayudar al productor en la selección del ganado caprino lechero se utilizaron dos técnicas de procesamiento de datos; perfilamiento matemático y procesamiento digital de imágenes, se muestrearon 10 cabras en estado de lactancia, se recolectó datos durante 60 días, divididos en tres periodos: inicial, media y final de lactancia. Se capturaron fotografías directamente de la ubre a una distancia de 50cm horizontalmente y una altura de 60 cm y se tomó las principales medidas de la ubre. Se creó una base de datos con la información fotográfica y se procesó en los softwares GeoGebra y MATLAB para la estimación de los volúmenes de las ubres. Los resultados mostraron que, no existe significancia estadística entre los métodos utilizados al calcular el tamaño de la ubre ( $P>0.05$ ), y el mejor modelo matemático que relacionó las variables estudiadas fue el modelo polinomial de grado 6 ( $R^2=0.881$ ).

**Palabras clave:** MATLAB, producción alimentaria, ganado caprino, Código UNESCO: 3104.04.

Mathematical models and digital image processing for the determination of goat milk production.

**Abstract.-** To develop an application in MATLAB to help the producer select dairy goats, two data processing techniques were used; mathematical profiling and digital image processing. Ten (10) lactating goats were sampled, and data were collected for 60 days, divided into three periods: initial, middle, and final lactation. Photographs were taken directly from the udder at a distance of 50 cm horizontally, and a height of 60 cm, and the main udder measurements were taken. A database was created with the photographic information and processed in GeoGebra and MATLAB software to estimate udder volumes. The results showed that there is no statistical significance between the methods used to calculate udder size ( $P>0.05$ ), and the best mathematical model that related the variables studied was the polynomial model of degree 6 ( $R^2=0.881$ ).

**Keywords:** MATLAB, food production, goat livestock, UNESCO Code: 3104.04



## I. INTRODUCCIÓN

Los productos lácteos son de importancia para la dieta del ser humano y la leche de cabra tiene características particulares que la distinguen de las demás leches de animales de consumo humano, tiene altas concentraciones de vitaminas, minerales, proteínas, grasas y azúcares, en tanto que alivia los trastornos gastrointestinales [1]. La producción mundial de leche de cabra creció de 12 millones de toneladas en 1993 a 19 millones de toneladas en 2017; de estos América contribuyó con 4,4%, siendo Asia el mayor productor con 57% en [2].

En Ecuador la crianza de caprinos se produce principalmente en pequeños productores con sistemas extensivos [3] dentro de este país se menciona que la provincia de Loja es la mayor productora con este sistema que representa el 73.10% de la producción nacional, seguida de Santa Elena con 6.19%, Guayas con 4.17%, Manabí con 4.13% y Chimborazo con 3.66% en [4]. La población de ganado caprino en Ecuador llega a 178366 cabezas, las mismas que se encuentran distribuidas en mayor proporción en la región Sierra (83%), Costa (15%) y con escasa producción en el Oriente, de estos el 93% corresponde a animales criollos, 6% son animales mestizos y el 1% son animales de pura sangre en [5]. Las problemáticas que más afectan el manejo del ganado caprino es la falta de información y el acceso a tecnologías adecuadas, que ayuden al productor a mejorar los rendimientos en sus rebaños; existen lagunas en la literatura científica sobre la cría de ganado caprino de leche en [6], esto dificulta obtener mejores rendimientos a los productores. Se señala que actualmente en Ecuador no existe una cultura de consumo del producto de la leche de esta especie animal por falta de información del aporte nutricional a la población humana [7], además, porque en las zonas donde tradicionalmente se encuentran las producciones caprinas son sistemas incipientes y con escasa tecnología.

Zaibet en [8], refieren que la extensión de la producción, del rebaño y la mano de obra familiar no influyen en la producción de agricultores técnicamente eficientes. En cambio, los factores que están afectando la productividad de la actividad caprina son las fuentes de ingresos no agrícolas, es decir, el productor paralelamente hace otras actividades que le reportan mayores beneficios, y otro factor es el costo de la alimentación para el ganado, ya que el forraje natural no es de la mejor calidad en la zona de estudio como se vio reflejado en las muestras representativas de la investigación.

Por lo expuesto anteriormente, la presente investigación tiene como objetivo crear una herramienta tecnológica desarrollada en MATLAB útil para el sector pecuario que facilite la selección del ganado caprino productor de leche en cabras a través del perfilamiento matemático y procesamiento digital de imágenes, relacionando el tamaño de la ubre con la producción de leche.

## II. DESARROLLO

En base a la cultura organizativa las empresas bananeras del mundo realizan varios procesos que debe desarrollar para poder crear cambios organizacionales, tal como puede ser la ejecución de los valores, principios, normas, creencias en la organización. El implementar la cultura con las actitudes de los seres humanos conlleva a tener los diversos estilos de comportamiento en las empresas. En estudios realizados sobre la cultura organizativa se identificó que está basada en tres dimensiones que son: social, económico y tecnológico para alcanzar el bienestar y crecimiento las organizaciones [3].

## A. Materiales

Los materiales utilizados para la ejecución del proyecto se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Especificaciones técnicas del material utilizado.

Descripción	Especificación técnica
Cámara fotográfica	Marca Sony
	14.5 mega pixeles
Flexómetro	Marca Singer
	1,5 metros
Calibrador	Tipo Vernier
	Nonio de 10 divisiones
Taza medidora	2 litros
Computador	Windows 10
	MATLAB R2020a
	GeoGebra
	Statgraphics centurión XVI, 16.1.11

### III. METODOLOGÍA

El método consistió en tres etapas definidas conscientemente con el periodo de lactancia. La muestra escogida fue de 10 cabras, se recolectó datos durante 60 días, divididos en tres periodos: inicial, media y final de lactancia. Debido a que la formulación de la relación matemática existente entre el tamaño de la ubre y la producción de leche, se realizó de acuerdo con cada período de lactancia. De cada cabra se recogió el ordeño durante 3 días consecutivos. El proceso consistió en separar las cabras lactantes de las crías con un día previo a la recolección de la leche, continuamente el ordeño de las cabras se realizó en horas de la mañana (8:00 am) durante un tiempo de 30min por animal. Las mediciones se efectuarán por medio de dos métodos; perfilamiento matemático y digitalización de imágenes.

Los datos recolectados de volumen fueron procesados en el software estadístico statgraphics, que incluyó medidas de tendencia central y dispersión, seguido de un test de comparación de medias pareadas t-test, para determinar las diferencias estadísticas entre los tamaños de la ubre calculados por el método de perfilamiento matemático y el método de procesamiento de imágenes, así como una descripción estadística de recolección y producción de leche en cada una de las cabras.

Al finalizar el análisis se comprobó los resultados obtenidos, mediante uso de apartados estadísticos sobre regresión no lineal, ajuste de curvas y un análisis a posteriori, que ayudaron a determinar el modelo matemático que mejor relacionó las variables, tamaño de la ubre con la producción de leche en las cabras estudiadas.

A. Registro del tamaño de la glándula mamaria

Se tomaron imágenes con la cámara fotográfica a una altura del piso de 40 a 60 cm y a una distancia de la cabra de 30 a 50 cm, para el registro del tamaño de la glándula mamaria se utilizó el flexómetro y vernier, para los parámetros siguientes (Fig. 1).

LLM: Longitud de ligamento medio suspensorio.

PGM: Perímetro de la glándula mamaria a nivel central.

LP: Longitud de pezón.

DP: Diámetro de pezón en la parte media.

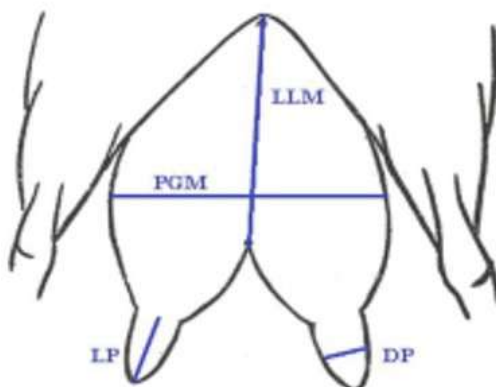


Fig. 1. Disposición de medidas.

B. Tamaño de la glándula mamaria por el método de perfilamiento matemático

Para el primer método de cálculo del tamaño de la ubre (volumen), se utilizó las fotografías (Fig. 2), y se las procesó en el software GeoGebra utilizando puntos, polinomios y funciones matemáticas, que posteriormente fueron integradas desde un límite inicial a un límite final para poder obtener el cálculo del volumen, a través de la siguiente fórmula [10].

$$V = \pi \int_b^a [f(x)]^2 dx \quad (1)$$

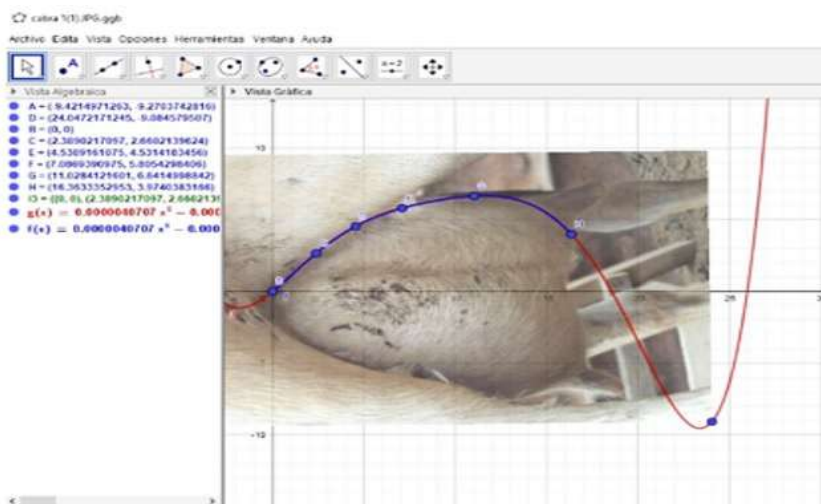


Fig. 2. Modelamiento de imagen.

### C. Tamaño de la glándula mamaria por el método de procesamiento de imágenes

Para llevar a cabo este método se siguieron los siguientes pasos:

Captura de las imágenes de las glándulas mamarias de las cabras en formato RGB (Fig. 3).

- C.1 Utilizando MATLAB se convirtió la imagen a escala de grises.
- C.2 Se transformó la imagen a escala binaria.
- C.3 Se determinó el perfil de la glándula mamaria.

C.4 Se utilizó el método de discos de cálculo integral para determinar el volumen de la ubre.



Fig. 3. Captura de imagen en RGB y transformación a escala de grises.

### C. Interfaz gráfica en MATLAB

Para el desarrollo de la interfaz gráfica y aplicación en MATLAB, que permite la estimación de leche producida en cabras, utilizando procesamiento digital de imágenes se desarrolló un programa con extensión .m cuyo funcionamiento se detalla a continuación (Fig. 4).

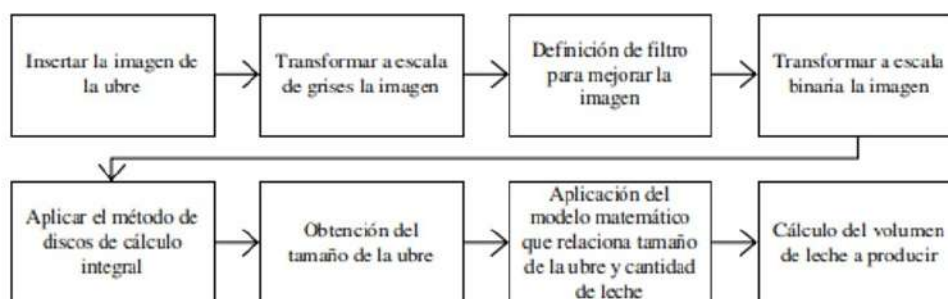


Fig. 4. Flujoograma para la entrada de datos en la interfaz gráfica de MATLAB.

## IV. RESULTADOS

### A. Dimensiones de la glándula mamaria

Las dimensiones de la ubre expresadas correspondientes a la caracterización fenotípica de la cabra criolla [11], son: longitud de ligamento medio suspensorio: 13,70cm; perímetro de la glándula mamaria: 25,55cm; longitud de pezón: 3,40cm; y diámetro de pezón: 0,69cm.

### B. Variación de volumen de la ubre en los diferentes periodos, método perfilamiento matemático

El método de perfilamiento matemático demostró que las cabras sufrieron pérdida de tamaño entre el periodo II y III en las ubres, mostrando volúmenes relativamente inferiores, este comportamiento de las ubres en el transcurso de cada periodo de estudio se debe a que las cabras múltiparas tienen glándulas abultadas en comparación con cabras de primer parto que sus glándulas están recogidas (tabla 2).

**Tabla 2.** Volumen de glándula mamaria, método de perfilamiento matemáticos.

Cabras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Periodo I. Inicial (cm<sup>3</sup>)</b>										
Día 1	1454.96	590.79	2058.34	996.79	1048.74	1181.21	1249.22	2363.20	1317.67	1104.52
Día 2	1357.43	570.38	943.67	508.73	673.89	1120.90	1422.68	1316.14	1479.06	1026.78
Día 3	1917.79	576.86	928.75	415.85	690.70	1120.12	1374.00	1082.65	938.10	847.97
<b>Periodo II. Medio (cm<sup>3</sup>)</b>										
Día 1	1862.51	771.95	1119.71	578.23	876.79	912.93	1431.37	1705.41	1942.51	826.72
Día 2	1850.50	771.59	926.36	632.82	894.59	1040.01	1142.94	2425.67	1186.35	1027.57
Día 3	2139.45	703.32	1102.59	494.45	898.81	1215.25	1320.38	1233.93	1812.69	985.55
<b>Periodo III. Final (cm<sup>3</sup>)</b>										
Día 1	1396.73	721.47	877.91	568.59	774.31	1167.93	1272.18	1272.46	1412.31	1002.54
Día 2	1280.89	767.11	931.28	429.03	577.56	823.89	1421.01	1861.19	1182.93	837.75
Día 3	1281.88	603.68	1022.56	673.26	487.63	1059.08	1250.28	1204.32	1304.41	934.59

### C. Variación de volumen de la ubre en los diferentes periodos, método procesamiento de imágenes

El método de procesamiento de imágenes demostró resultados muy similares al método anterior, de igual manera, se observa una variación en el volumen de la ubre sobre manera en los periodos II y III, esto es hacia el final del ciclo de producción y con estrecha relación entre cabras multíparas y de primer parto (tabla 3).

### D. Producción de leche en los diferentes periodos

La producción de leche está ligada estrechamente con la cantidad y calidad de alimento consumido y los nutrientes óptimos que requiera el animal en la etapa de lactancia, es decir que la producción de leche se relaciona con la zona en que se encuentre el animal, la disponibilidad de alimento o del sistema de crianza con que este se maneja. Algunos estudios de cabras lecheras han modelado curvas de lactancia utilizando una función matemática. Entre ellos, la función multifásica proporciona la información más útil, en [12]. Los factores que afectan tales características incluyen la raza, la paridad, la temporada de parto y el nivel de producción.

**Tabla 3.** Volumen de glándula mamaria, método de procesamiento de imágenes.

Cabras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Periodo I (cm)</b>										
Día 1	1425.54	575.12	2033.85	981.34	1036.05	1160.33	1230.86	2356.22	1299.60	1080.42
Día 2	1343.98	541.82	941.65	481.88	660.27	1105.56	1413.32	1315.19	1477.62	1031.17
Día 3	1892.08	568.69	909.65	403.92	687.03	1106.24	1347.41	1053.27	919.44	830.83
<b>Periodo II (cm)</b>										
Día 1	1851.69	760.45	1101.91	567.42	862.28	905.79	1425.94	1692.48	1934.60	812.36
Día 2	1826.79	762.37	908.3	623.60	883.97	1034.69	1110.25	2414.53	1166.78	1025.49
Día 3	2115.20	698.53	1088.12	483.29	888.63	1202.18	1300.08	1211.43	1780.33	956.75
<b>Periodo III (cm)</b>										
Día 1	1372.46	712.61	867.43	544.06	769.47	1163.60	1271.74	1260.86	1399.61	991.54
Día 2	1265.46	755.79	912.82	419.57	567.98	815.44	1418.89	1848.03	1170.46	820.43
Día 3	1281.81	592.50	997.26	657.15	479.80	1048.70	1222.26	1191.51	1293.83	917.97

Por otro lado, la producción de leche puede evaluarse mediante una evaluación visual del tamaño de la ubre [13], esto debido a que esta aumenta proporcionalmente en el ciclo de producción y está relacionado con la producción de leche, que depende del peso de la ubre vacía y la secreción por kilogramo de tejido mamario. Se necesita más investigación genética y fisiológica para comprender completamente las propiedades biológicas de las fases de la curva de lactancia en las cabras lecheras y para determinar su utilidad en el manejo y la selección (tabla 4).

## E. Correlación entre el método de perfilamiento matemático y procesamiento de imágenes

Al realizar la prueba estadística de comparación de medias pareadas se comprobó que no existe diferencias significativas en el tamaño de ubres de las cabras, tras ser procesadas mediante el método de perfil matemático (PM) y procesamiento de imágenes (PI), con un intervalo que fluctúa entre -0.857: 16.09 en las diferencias de sus medias, a un nivel de confianza del 95%. De esta manera se comprueba que el método PM es similar al método de PI y ambos tienen la efectividad para determinar el tamaño o volumen de las glándulas mamarias en cabras, observándose una fuerte correlación positiva entre estos métodos, como lo indica su coeficiente cuyo valor es  $R^2 = 0.9965$ .

**Tabla 4.** Producción de leche.

Cabras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Periodo I (cm<sup>3</sup>)</b>										
Día 1	80	50	60	75	75	75	80	50	75	150
Día 2	100	50	50.5	75	70	73.5	52	75	60	125
Día 3	75	45	50	50.5	55	50	50	55	50	95
Promedio	85	48.33	53.50	66.83	66.67	66.17	60.67	60.00	61.67	123.33
<b>Periodo II (cm<sup>3</sup>)</b>										
Día 1	70	10	35	7	10	25	75	65	15	20
Día 2	50	25	25	10	25	90	60	45	40	35
Día 3	35	10	25	5	10	35	85	25	25	50
Promedio	51.67	15.00	28.33	7.33	15.00	50.00	73.33	45.00	26.67	35.00
<b>Periodo III (cm<sup>3</sup>)</b>										
Día 1	15	5	15	80	5	10	35	30	10	5
Día 2	20	5	5	50	5	5	60	20	15	15
Día 3	25	5	5	60	5	5	5	10	25	30
Promedio	20.00	5.00	8.33	63.33	5.00	6.67	33.33	20.00	16.67	16.67

## F. Modelos matemáticos de correlación entre el tamaño de la ubre y la cantidad de leche recolectada

La Tabla 5, muestra los diferentes modelos matemáticos que se analizaron para establecer la mejor ecuación que relacionara el volumen de la ubre y la cantidad de leche producida en cabras. El modelo polinomial de grado 6 representó el mejor modelo ( $R^2 = 0.881$ ). Los resultados evidenciaron que los mayores rendimientos de leche se presentaron en la primera fase de lactancia, periodo en el que ocurre progresivamente el aumento de volumen de las glándulas mamarias, de esta manera se consideró que la relación de las variables volumen de ubre y cantidad de leche obtenida mediante el modelo polinomial de grado 6 es altamente relevante.

**Tabla 5.** Modelos de correlación entre volumen de la ubre y cantidad de leche producida.

Modelo	Ecuación	R <sup>2</sup>
Modelo exponencial	$y = 25.013e^{0.0004x}$	$R^2 = 0.2548$
Modelo lineal	$y = 0.0135x + 24.165$	$R^2 = 0.2374$
Modelo logarítmico	$y = 12.97\ln(x) - 51.024$	$R^2 = 0.2057$
Modelo cuadrático	$y = 1x10^{-05}x^2 - 0.0157x + 38.677$	$R^2 = 0.256$
Modelo cúbico	$y = -1x10^{-07}x^3 + 0.0005x^2 - 0.5039x + 194.84$	$R^2 = 0.3842$
Modelo polinomial de grado 4	$y = 6x10^{-10}x^4 - 3x10^{-06}x^3 + 0.0045x^2 - 3.1703x + 836.67$	$R^2 = 0.5443$
Modelo polinomial de grado 5	$y = 6x10^{-13}x^5 - 2x10^{-09}x^4 + 4x10^{-06}x^3 - 0.0018x^2 - 0.1318x + 265.63$	$R^2 = 0.5504$
Modelo polinomial de grado 6	$y = 2x10^{-14}x^6 - 1x10^{-10}x^5 + 3x10^{-07}x^4 - 0.0004x^3 + 0.2938x^2 - 115.62x + 18547$	$R^2 = 0.881$
Modelo potencial	$y = 3.0474x^{0.3624}$	$R^2 = 0.2253$

### G. Interfaz de simulación MATLAB.

La Fig. 5, representa el procedimiento llevado a cabo en el procesamiento de imágenes en MATLAB para la obtención de volúmenes y cantidad de leche mediante el teléfono celular, se observa la transformación de la imagen original de la ubre a escala de grises, pasando por un perfilamiento de la imagen para finalmente obtener la simulación tridimensional de la ubre, junto con ella se obtiene el volumen y la cantidad de leche, llegando a obtener resultados muy similares a los resultados obtenidos en la aplicación PC.

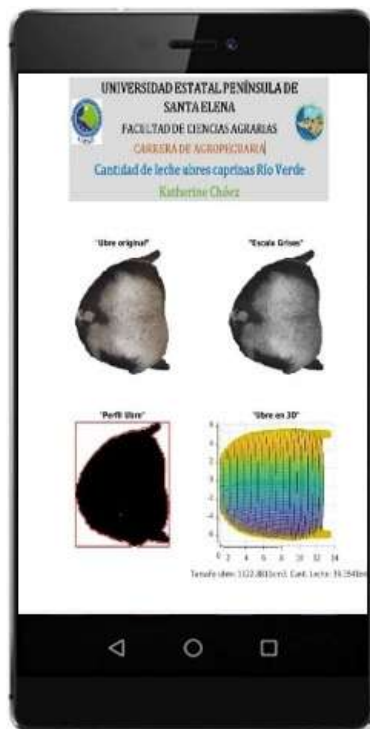


Fig. 5. Simulación en teléfono móvil.

## CONCLUSIONES

Mediante el estudio realizado se cotejó que el método de procesamiento digital de imágenes y el método de perfilamiento matemático presentaron un alto grado de similitud y de eficiencia al calcular el volumen de glándulas mamarias caprinas, al no existir diferencias estadísticas significativas entre los dos métodos, a un nivel de confianza del 95%.

Según el método de ordeño ejecutado se evidenció que, en la primera etapa de lactancia, se encontraron los mayores rendimientos lácteos de todo el ciclo de producción, llegando a un pico de producción al alcanzar la segunda etapa, para luego ir disminuyendo los beneficios.

Los resultados mostraron que, el modelo matemático polinomial de grado 6, es el mejor que describe la relación existente entre el tamaño de la ubre y la cantidad de leche producida en las cabras criollas, con un coeficiente  $R^2 = 0.881$ .

Se implementó una interfaz gráfica en MATLAB a través del cual con el análisis de fotografías de las glándulas mamarias nos permite determinar el rendimiento de leche en las cabras en cada una de sus etapas de lactancia haciendo uso del modelo matemático polinomial.



## REFERENCIAS

- [1] L. Crespo, A. Pérez, L. Ramos, E. García y L. Matos, «Estudio técnico-económico de la producción de leche de cabra en polvo,» EIA, vol. 17, nº 33, pp. 1 -13, 2020.
- [2] C. Lu y B. Miller, «Current status, challenges and prospects for dairy goat production in the Americas. » Asian-Australasian journal of animal sciences, vol. 32 , nº 8, p. 1244-1255., 2019.
- [3] L. Guerra, «Diseño de un modelo de gestión para una microempresa comunitaria de producción de derivados lácteos del ganado caprino en la provincia de Santa Elena,» Guayaquil, 2018.
- [4] J. Marcillo, «Buenas prácticas pecuarias en ganado caprino (Capra hircus hircus) en sistemas de producción extensivo en la parroquia Julcuy,» Provincia de Manabi.
- [5] Instituto Nacional de Estadística y Censos, «Módulo de Información Agroambiental y Tecnificación,» Ecuador,, 2020.
- [6] S. Belanger y E. Vasseur, «Graduate Student Literature Review: Current recommendations and scientific knowledge on dairy goat kid rearing practices in intensive production systems in Canada, the United States, and France,» Journal of Dairy Science, vol. 104, nº 6, p. 7323 – 7333, 2021.
- [7] O. Cruz y J. Vllacrés, «Estudio Socioeconómico de la ganadería caprina (Capra hircus) en siete comunas de la Parroquia Chanduy, Cantón Santa Elena,» Ecuador, 2015.
- [8] L. Zaibet, P. Dharmapala, H. Boughanmi, O. Mahgoub y A. Al-Marshudi, «Social changes, economic performance and development: the case of goat production in Oman,» Small Ruminan Research, vol. 54, nº 12, pp. 131-140, 2004.
- [9] R. Choy y A. Edelman, «Parallel MATLAB: Doing It Right,» Proceedings of the IEEE, vol. 93, nº 2, pp. 331-341, 2005.
- [10] M. Lema, «Empleo de simulaciones dinámicas en Matlab como parte del proceso de enseñanza-aprendizaje de la derivada, integral definida y cálculo de volúmenes,» Revista Científica y Tecnológica UPSE, vol. 5, nº 1, pp. 36-41, 2018.
- [11] O. Camacho, «Caracterización fenotípica de la cabra criolla y su sistema de producción,» Loja, Ecuador, 2018.
- [12] T. Gipson y M. Grossman, «Lactation curves in dairy goats: a review,» Small Ruminan Research, vol. 3, nº 4, pp. 383-396, 1990.
- [13] C. Gal, «Relationship Between Body Conformation and Production in Dairy Goats,» Journal of Dairy Science, vol. 63, nº 10, pp. 1768-1781, 1980.