



UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA
“Fructuoso Rodríguez Pérez”



FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

INSTITUTO DE CIENCIA ANIMAL
DPTO. DE BIOESTADÍSTICA APLICADA



Modelación matemática del crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus*
bajo el efecto de la época del año

Tesis presentada en opción al título de Máster en Biomatemática

Autora: Lic. Maricelis Hernández Castillo

Mayabeque, 2023
“Año 65 de la Revolución”



UNIVERSIDAD AGRARIA DE LA HABANA
“Fructuoso Rodríguez Pérez”



FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

INSTITUTO DE CIENCIA ANIMAL
DPTO. DE BIOESTADÍSTICA APLICADA



Modelación matemática del crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus*
bajo el efecto de la época del año

Tesis presentada en opción al título de Máster en Biomatemática

Autora: Lic. Maricelis Hernández Castillo

Tutores:

Dra. C. Magaly Herrera Villafranca

Dra. C. Dayleni Fortes González

Mayabeque, 2023
“Año 65 de la Revolución”

Pensamiento

*“El futuro de nuestro país tiene que ser necesariamente
un futuro de hombres de Ciencia, un futuro de hombres
de pensamiento”.*

Fidel Castro Ruz

Agradecimientos

- ❖ A la Dra. C. Magaly Herrera Villafranca por su gran dedicación, su preocupación, su apoyo incondicional y por haber tenido la paciencia necesaria para motivarme a seguir adelante en los momentos más difíciles.
- ❖ A mi amiga Yolaine Medina por ayudarme en todo momento cuando más lo necesitaba, muchas gracias de todo corazón.
- ❖ Al claustro de profesores de la maestría, por su contribución en mi formación profesional durante el transcurso de estos dos años.
- ❖ A la profesora Dra. C. Lucía Fernández Chaurey por su entrega y confianza, por alentarnos y convencernos de que sí se puede.
- ❖ A mis compañeros de clases, quienes me acompañaron en esta trayectoria de aprendizaje y conocimientos.
- ❖ Al Ms. C. Alejandro Mejías Caba por su apoyo en la realización de esta investigación y darme los consejos oportunos para la mejora del documento de tesis.

A todos muchas gracias

Dedicatoria

- ❖ A mis hijos Lairon y Lismari que han sido los eslabones más fuertes y de mayor motivación para mí.
- ❖ A mi esposo por haberme apoyado en todo momento, sobre todo con los niños.
- ❖ A mis padres por su dedicación para que todo fuera posible.
- ❖ A mi hermana por siempre estar ahí apoyándome en todo momento
- ❖ A mi abuela Irma y mi abuelo Roberto (E.P.D) por la crianza que me dieron siempre y sobre todo por sus buenos consejos.

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo modelar el crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus* bajo el efecto de la época del año. Se utilizó la información de experimentos generados por el departamento de Pastos y Forrajes, del Instituto de Ciencia Animal. Se empleó la estadística descriptiva para caracterizar las variables altura de la planta y rendimiento de materia seca. Se utilizó Análisis de Varianza en arreglo factorial para conocer el efecto entre la época del año y los clones CT-115 y CT-27. Además, se probaron modelos lineales y no lineales para describir el comportamiento del crecimiento de dichos clones. Para la selección de los modelos de mejor ajuste se tuvieron en cuenta diferentes criterios de bondad de ajuste. En la caracterización de la altura de la planta los clones evaluados fueron similares. El rendimiento de materia seca manifestó mayores resultados en el CT-115 en ambos períodos de estudio. Los modelos no lineales para la altura de la planta y rendimiento de materia seca, en los períodos lluvioso y poco lluvioso explicaron coeficientes de determinación superiores al 95%. La máxima velocidad de crecimiento en seca se alcanzó a los 42 días para el CT-115 y a los 43 días para el CT-27. El rendimiento de materia seca en el período lluvioso en ambos clones mostró un comportamiento lineal y explicó más del 70% de la variabilidad. Para el período lluvioso el modelo Logístico fue el que mejor describió la altura de la planta y el Gompertz para el rendimiento de materia seca.

Palabras clave: altura de la planta, rendimiento de materia seca, criterios estadísticos, velocidad de crecimiento.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I. REFERENTES TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS SOBRE LA MODELACIÓN DEL CRECIMIENTO DE CLONES DE CENCHRUS PURPUREUS	6
1.1 Modelo. Definición	6
1.2 Modelos matemáticos	7
1.2.1 Tipos de modelos	8
1.2.2 Propiedades deseadas de un modelo matemático	9
1.3 Modelación Matemática	10
1.3.1 Importancia de la modelación matemática	11
1.3.2. Modelos lineales y no lineales. Características	11
1.3.3 Criterios estadísticos para la selección del modelo de mejor ajuste	11
1.4 Aplicación de la modelación matemática de los pastos en Cuba	13
1.5 Etapas de Crecimiento	14
1.6 El género Cenchrus	15
1.6.1 Desarrollo de nuevas variedades	16
1.6.2 Características agronómicas y morfo fisiológicas	17
1.6.3 Factores que influyen en la producción de biomasa	18
1.6.3.1 Altura y frecuencia de corte o pastoreo	20
1.6.3.2 Fertilización y riego	21
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1 Introducción	23
2.2 Métodos de la investigación	23
2.3 Procedimiento experimental	25
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
3.1 Introducción	29
3.2 Caracterización de la altura de la planta y rendimiento de materia seca en el período lluvioso	29
3.3 Modelación de la altura de la planta con respecto a la edad de clones de <i>Cenchrus purpureus</i> en el período lluvioso	36
3.4 Modelación del rendimiento de materia seca con respecto a la edad de clones de <i>Cenchrus purpureus</i> en el período lluvioso y poco lluvioso	40

CONCLUSIONES	48
RECOMENDACIONES	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

LISTADO DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

cm	Centímetros
χ^2	Chi-cuadrado
R^2	Coeficiente de determinación
R^2_{aj}	Coeficiente de determinación ajustado
CV	Coeficiente de variación
CME	Cuadrado medio del error
D.E	Desviación estándar
EE estimac	Error estándar de estimación
DW	Estadístico Durbin Watson
°C	Grados celsius
g	Gramos
ha	Hectárea
ICD	Incremento corriente diario
kg/ha ⁻¹	Kilogramos por hectárea
Km	Kilómetro
kg/macolla	Kilogramo por macolla
LN	Latitud norte
LW	Longitud oeste
Máx.	Máximo
MAE	Media absoluta del error
m	Metro
m ²	metros cuadrados
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetros
mm/año	Milímetros al año
Mín.	Mínimo
%	Por ciento
n	Tamaño de la muestra
t	Tiempo
t/ha	Toneladas por hectárea
p	Valor de probabilidad

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Caracterización de la variable altura de la planta de los clones CT-115 y CT-27 para el período lluvioso.	29
Tabla 2. Caracterización de la variable rendimiento de MS por kg/macolla de los clones CT-115 y CT-27 para los períodos lluvioso y poco lluvioso	31
Tabla 3. Comportamiento de la altura de los clones de <i>Cenchrus purpureus</i> con respecto a la edad en el período lluvioso	33
Tabla 4. Comportamiento del rendimiento de MS (kg/macolla) de los clones de <i>Cenchrus purpureus</i> con respecto a la edad bajo el efecto de la época del año	34
Tabla 5. Modelos ajustados entre la edad y la altura de la planta para los clones CT-115 y CT-27 en el período lluvioso.	36
Tabla 6. Modelos ajustados entre la edad y el rendimiento de materia seca para los clones CT-115 y CT-27 en el período lluvioso.	41
Tabla 7. Modelos ajustados entre la edad y el rendimiento de materia seca para los clones CT-115 y CT-27 en el período poco lluvioso.	43

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Comportamiento de la altura de la planta con respecto a la edad del clon CT-115	38
Figura 2. Comportamiento de la altura de la planta con respecto a la edad del clon CT-27	38
Figura 3. Velocidad del crecimiento de la altura de la planta en el período lluvioso del clon CT-115	39
Figura 4. Velocidad del crecimiento de la altura de la planta en el período lluvioso del clon CT-27	40
Figura 5. Comportamiento del rendimiento de materia seca en el periodo poco lluvioso con respecto a la edad del clon CT-115	45
Figura 6. Comportamiento del rendimiento de materia seca en el periodo poco lluvioso con respecto a la edad del clon CT-27	45
Figura 7. Velocidad del crecimiento del rendimiento de materia seca en el período poco lluvioso del clon CT-115	46
Figura 8. Velocidad del crecimiento del rendimiento de materia seca en el período poco lluvioso del clon CT-27	46

INTRODUCCIÓN

Una de las herramientas más interesantes que en la actualidad se disponen para analizar y predecir el comportamiento de un sistema biológico son los modelos matemáticos, pues estos son muy útiles para estimar dichos sistemas. Unos de los objetivos importantes que se pretenden con la modelación matemática es apoyar de manera más fácil la comprensión de los fenómenos reales. Según Vázquez (2012), la modelación matemática tiene carácter de método científico general, cuyas bases están en las conquistas de la matemática, la cibernética y el enfoque sistémico en la investigación científica.

Torres y Cobo (2015) consideran que un modelo matemático es la expresión formal, mediante el uso del lenguaje matemático, de las relaciones entre los componentes de un sistema e informan que estas relaciones pueden ser descritas por una ecuación sencilla o por una red de ecuaciones interconectadas. Por otra parte, Ferrando *et al.*, (2017) refieren que es la representación matemática de una realidad o fenómeno donde tienen cabida diferentes elementos que le dan forma, como pueden ser los conceptos matemáticos implicados, las representaciones simbólicas de la realidad, así como los procedimientos matemáticos asociados a su uso.

Un modelo matemático se puede utilizar cuando se quiere investigar la relación que existe entre dos o más variables aleatorias, que explique de manera adecuada un fenómeno bajo estudio. Sin embargo, estos se diferencian por el tipo de variables que se analizan, es por ello que resulta prudente conocer que cuando la variable respuesta y la independiente son cuantitativas se emplea un análisis de regresión (Mejías, 2018).

Según Aduriz-Bravo (2012) y Cuevas (2014), un modelo es la representación ideal de un sistema y la forma en que este opera, cuyo objetivo es analizar o predecir el comportamiento futuro. Un caso particular lo constituyen los modelos matemáticos.

La obtención de nuevos datos mediante la experimentación agronómica es un proceso costoso Jones *et al.*, (2003) por lo que el empleo de herramientas estadísticas sería de gran utilidad para desarrollar estudios sobre esta variedad, de ahí que los modelos matemáticos y de simulación surgen como alternativa para dar respuesta a esta situación. Castro y Hétier (2015) plantean que los modelos matemáticos que más se utilizan en la agronomía se pueden categorizar en dos clases: los modelos solamente predictivos o empíricos y los modelos causales o mecanísticos.

La representación matemática del crecimiento de los vegetales, y específicamente de los pastos, ha sido objeto de estudio por múltiples instituciones científicas en el mundo, donde las bases de los modelos varían en dependencia del propósito y las condiciones para las cuales fueron confeccionados, sin embargo, en su conjunto persiguen como objetivo la representación matemática del crecimiento de los pastos, así como el estudio de los diversos factores que influyen en este proceso (Del Pozo y Herrera, 1995).

En la actualidad Cuba no dispone de las condiciones necesarias para realizar una inversión para el desarrollo y manejo de los pastos. Ante esta problemática, se impone la necesidad de buscar alternativas para conocer su producción bajo diferentes condiciones de manejo, así como el comportamiento de sus rendimientos productivos, lo que constituye un propósito fundamental de esta tesis. Por otra parte, son escasas las investigaciones donde se describa mediante la modelación matemática el comportamiento de nuevos clones a partir de esta especie, el empleo de esta herramienta estadística permitirá adoptar estrategias de manejo para conocer el momento óptimo de crecimiento y utilización de esta gramínea.

Por lo que se identifica como **problema científico**:

¿Cuál será la respuesta del crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus* bajo el efecto de la época del año?

Objeto de estudio

El crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus* bajo el efecto de la época del año.

Para dar respuesta al problema científico se planteó la siguiente **Hipótesis** de trabajo:

La aplicación de la modelación matemática en el crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus* bajo el efecto de la época del año brindará criterios sobre el máximo potencial de desarrollo de esta gramínea para su empleo en la alimentación animal.

Con el fin de dar solución al problema de investigación se definió como:

Objetivo general

Modelar el crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus* bajo el efecto de la época del año.

Objetivos específicos:

- Establecer los referentes teóricos y metodológicos que sirvan de sustento para la modelación matemática del crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus* bajo el efecto de la época del año.
- Caracterizar el crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus* con el efecto de la época del año.
- Modelar el comportamiento del crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus* bajo el efecto de la época del año.

Campo de acción:

Modelación matemática del crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus*.

Novedad científica

Se realiza la modelación matemática del crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus* bajo el efecto de la época del año para conocer su máximo potencial y contribuir a la toma de decisiones para el manejo adecuado de este cultivo en Cuba.

Aporte científico

Obtención de los modelos matemáticos de mejor ajuste para predecir el crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus* con el efecto de la época del año y conocer su máximo potencial, para contribuir a la utilización eficiente del cultivo como fuente de alimentación en la producción animal.

Aporte teórico

Contribución al conocimiento sobre el máximo potencial del crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus* con el efecto de la época del año en la aplicación de la modelación matemática como complemento a las investigaciones realizadas en el Instituto de Ciencia Animal.

Aporte práctico

Se obtienen los modelos matemáticos que mejor describen el comportamiento de la altura de la planta y el rendimiento de materia seca de *Cenchrus purpureus* los que permitirán establecer estrategias de manejo acertadas en correspondencia con las potencialidades del cultivo.

Estructura de la tesis

La tesis se compone de partes iniciales (presentación, dedicatoria, agradecimientos, resumen, listados de símbolos y abreviaturas, tabla de contenido, índice de figuras y tablas) y partes principales (introducción, capítulos, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas). Los capítulos aparecen estructurados en los contenidos que dan salida al objetivo propuesto, donde:

- ❖ En el Capítulo 1 se abordan los referentes teóricos y metodológicos relacionados con la modelación matemática, así como su aplicación en investigaciones de la producción de pastos en Cuba. Se exponen además las características agronómicas y morfo fisiológicas del *Cenchrus purpureus*, el desarrollo de nuevas variedades y los factores que influyen en la producción de biomasa.
- ❖ En el Capítulo 2 se presentan los materiales y métodos empleados para la caracterización, análisis de varianza y modelación matemática de clones de *Cenchrus purpureus*. Se informan los criterios estadísticos para la selección del modelo de mejor bondad y las expresiones matemáticas para describir el comportamiento de las variables en estudio, así como los programas estadísticos empleados para el procesamiento y análisis de los datos.
- ❖ En el Capítulo 3 se discuten los resultados obtenidos de la caracterización de las variables evaluadas para cada clon, así como del análisis de varianza en arreglo factorial y de la modelación. Además, se calcula la tasa de incremento corriente diario y momento en que se alcanza el punto de inflexión.

CAPITULO I. REFERENTES TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS SOBRE LA MODELACIÓN DEL CRECIMIENTO DE CLONES DE *CENCHRUS PURPUREUS*

1.1 Modelo. Definición

Según Ramos *et al.*, (2010) un modelo es, una herramienta de ayuda a la toma de decisiones. Por esta razón, sus resultados deben ser entendibles y útiles. Se puede entender simultáneamente como ciencia y como arte. Es una ciencia pues se basa en un conjunto de procesos estructurados: análisis y detección de las relaciones entre los datos, establecimiento de suposiciones y aproximaciones en la representación de los problemas, desarrollo o uso de algoritmos específicos de solución. Es un arte porque materializa una visión o interpretación de la realidad no siempre de manera unívoca.

Un modelo es la idealización de alguna cosa de tal forma que se simplifique algo que en su identidad real es sumamente complejo. Para construir un modelo hay que conocer de forma precisa los componentes y procesos que intervienen en el sistema, de tal forma que se pueda expresar mediante fórmulas matemáticas o ecuaciones que relacionan variables de estado, con el propósito de obtener determinada información del sistema (Hooker, 1994).

Jay (2012) y Cuevas (2014) plantean que un modelo es la representación ideal de un sistema y la forma en que este opera, en los cuales se destacan características relevantes del objeto en estudio, cuyo objetivo es analizar o predecir el comportamiento futuro, además es por excelencia la herramienta principal que utiliza la estadística para simbolizar problemas o situaciones de la vida. Un caso particular lo constituyen los modelos matemáticos.

Un modelo es la representación de aquellas características esenciales del objeto que se investiga, que cumple una función heurística, ya que permite descubrir y estudiar nuevas relaciones y cualidades de ese objeto de estudio con vistas a la transformación de la realidad (Valle *et al.*, 2021).

Un modelo puede entenderse como un sistema figurativo mental, gráfico o tridimensional que reproduce o representa la realidad en forma esquemática para hacerla más comprensible. Es una construcción o artefacto material o mental, un sistema –a veces se dice también “una estructura”– que puede usarse como referencia para lo que se trata de comprender; una imagen analógica que permite volver cercana y concreta una idea o un concepto para su apropiación y manejo (MEN, 2006: 52).

Por tanto, un modelo es la expresión matemática o gráfica que puede representar las características esenciales de un fenómeno dado y que puede simbolizar la realidad de dicho fenómeno. Resulta de gran utilidad en cualquier rama del conocimiento.

1.2 Modelos matemáticos

Es un sistema axiomático construido por términos indefinidos que son obtenidos por la abstracción y cualificación de ideas del mundo real. Se define como una construcción matemática dirigida a estudiar un sistema o fenómeno particular del mundo real. Este modelo puede incluir gráficas, símbolos, simulaciones y construcciones experimentales (Giordano *et al.*, 1997).

León-Velarde y Barrera (2003) informan que los modelos matemáticos describen relaciones entre variables y parámetros y de forma general son representaciones de las características importantes de un sistema para sintetizar el conocimiento científico. Los modelos matemáticos son una herramienta de gran utilidad para predecir el comportamiento de un determinado fenómeno, así como optimizar los procesos.

Según Lehrer y Shauble (2007), un modelo matemático es como una analogía que estandariza y representa, predice y elabora fenómenos en el mundo. El modelo matemático se puede definir como una ecuación o conjunto de ecuaciones que simulan de manera aproximada la relación estímulo respuesta

de un sistema de reglas semánticas que permiten interpretar el cálculo matemático formal y abstracto.

En los estándares para la práctica de las matemáticas definen el modelo como el proceso de seleccionar y utilizar las matemáticas a través de una simplificación de la realidad que se expresa en un lenguaje simbólico tomando la forma de ecuaciones, algoritmos, relaciones gráficas e incluso párrafos (Anhalt *et al.*, 2018). Es decir, los modelos matemáticos pueden expresarse de diferentes modos para desarrollar el pensamiento, mientras que su construcción y manipulación apoyan el desempeño de varias funciones cognitivas (Gilbert y Justi, 2016).

Según Muthuri (2009) un modelo matemático es un conjunto de ecuaciones, operaciones algebraicas, gráficos, etc., que representan las interconexiones en un sistema, y se puede trabajar a mano o con un ordenador. Las ecuaciones están escritas en términos de objetos matemáticos.

Los modelos matemáticos articulan principalmente los aspectos estructurales de los sistemas conceptuales que se describen utilizando datos cuantitativos y cumplen criterios específicos (Grant, 2012); es decir, los modelos matemáticos deben ser compatibles y modificables para que puedan ser utilizados para construir, explicar, predecir o controlar sistemas en un determinado contexto (Lesh y Doerr, 2003).

1.2.1 Tipos de modelos

Existen diferentes clasificaciones de los modelos. Una de las más generales es la presentada por Torres (1995), según la cual un modelo puede ser una réplica del objeto que representa. Cambiando la escala o el material con el que se construye se denomina isomórfico y cuando tiene algún grado de abstracción del objeto que representa, teniendo en cuenta solamente las variables más relevantes, se denomina homomórfico.

Es importante señalar que a mayor nivel de abstracción hay menor grado de similitud y uniformidad entre modelo y objeto representado y viceversa (Torres y Ortiz, 2005). De acuerdo con el nivel de abstracción, se pueden agrupar los modelos físicos y de escala como isomórficos y los análogos, matemáticos y de simulación como homomórficos.

Según Ramos (2021) los modelos matemáticos pueden clasificarse de acuerdo al resultado que predicen como: los modelos deterministas pronostican un mismo resultado en sus mediciones debido a que parten de un punto de vista determinado, esto se debe a que ignoran la variación aleatoria. Los modelos estocásticos son aquellos que predicen la distribución de los posibles resultados ya que son de naturaleza más estadística.

Dicho autor señala que los modelos mecanicistas son aquellos que utilizan bastante información teórica y describe lo que sucede en un nivel de la jerarquía al considerar procesos en niveles inferiores. Además de que tienen en cuenta los mecanismos a través de los cuales ocurren los cambios. Los modelos empíricos son aquellos donde se señala lo que ocurre, intenta dar una visión cuantitativa de los cambios asociados con diferentes condiciones. Es decir, en este tipo de modelos no se tiene en cuenta el mecanismo por el cual ocurren los cambios en el sistema.

1.2.2 Propiedades deseadas de un modelo matemático

Según Hestenes (1987) un modelo matemático tiene cuatro componentes: 1) Un conjunto de nombres para el objeto y los agentes que interactúan con él, así como para cualquier parte del objeto representado en el modelo. 2) Un conjunto de variables descriptivas (o descriptores) que representan propiedades del objeto. 3) Ecuaciones del modelo, describiendo su estructura y evolución temporal. 4) Una interpretación que relaciona las variables descriptivas con las propiedades de algún objeto que el modelo representa.

1.3 Modelación Matemática

La modelación matemática se concibe como el proceso cognitivo que se tiene que llevar a cabo para llegar a la construcción del modelo matemático de un problema u objeto del área del contexto (Camarena, 2008).

Por otra parte, Cruz (2010) plantea que la modelación matemática se entiende como un proceso intelectual en el cual se dispone de:

1. Una situación-problema dada en un contexto, generalmente de realizaciones prácticas, en la cual se requiere obtener una meta, respuesta o decisión acerca de cómo se deberá proceder o cómo se deberá usar un recurso para obtener el mejor resultado entre una variedad de ellos.
2. La formulación de la situación-problema del mundo real en términos matemáticos, generalmente a través de ecuaciones o relaciones entre variables que describen la situación dada (esto es, la construcción del modelo matemático en sí).
3. La solución y análisis del problema matemático obtenido.
4. La interpretación de los resultados matemáticos vistos en el contexto de la situación real original (por ejemplo, verificar si ella se corresponde con la pregunta originalmente propuesta o implícita en la situación-problema original).

Para Hestenes (2010), la modelación matemática trata de la investigación de las implicaciones de las formas de pensado en la realidad; es decir, se requiere expresar construcciones informales de la realidad de una manera formal y por lo tanto cambia su percepción (su aparición en la realidad social y personal).

La obtención de nuevos datos mediante la experimentación agronómica, además de generar resultados específicos para cada lugar en concreto en el espacio y el tiempo es un proceso costoso (Jones *et al.*, 2006), para conocer este fenómeno se hace necesaria la búsqueda de otras alternativas para dar respuesta a tal situación. Autores como Rodríguez *et al.*, (2010) y Rodríguez (2015) proponen el uso de la modelación.

Los modelos matemáticos se utilizan en diferentes ramas del conocimiento por la posibilidad de expresar matemáticamente las relaciones entre los fenómenos (Jay, 2012). Estos resultan herramientas de amplia utilización en los últimos años para lograr los objetivos propuestos.

1.3.1 Importancia de la modelación matemática

La verdadera importancia de un modelo desde el punto de vista didáctico radica según Bassanezi (2002) en tener un lenguaje conciso que expresa nuestras ideas de manera clara y sin ambigüedades, además de proporcionar gran cantidad de resultados que auxilian el uso de elementos computacionales para calcular sus soluciones numéricas.

El uso de modelos permite un mejor análisis de la situación. Si bien los modelos utilizan el lenguaje matemático para lograr esta representación, también suministran un consejo sobre la mejor decisión indicando cuál será el resultado obtenido en caso de seguir la indicación (Navarro, 2019).

1.3.2. Modelos lineales y no lineales. Características

García *et al.*, (2009) refieren que los modelos matemáticos pueden ser lineales (si todos sus operadores son lineales) o no lineales (si al menos un operador es no lineal). De forma general, los modelos lineales son más fáciles de manejar que los modelos no lineales, los cuales se pueden linealizar, pero se corre el riesgo que se pierdan aspectos relevantes del problema.

1.3.3 Criterios estadísticos para la selección del modelo de mejor ajuste

Chacín (1998), Kiviste *et al.*, (2002), Guerra *et al.*, (2003), Torres *et al.*, (2012) y Domínguez *et al.*, (2013) propusieron diversos criterios estadísticos para la selección de modelos, entre los que se encuentran:

- Coeficiente de determinación R^2 : declara que proporción de la variación de la variable dependiente es explicada por las variables predictoras.

- Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}): es una corrección o ajuste del coeficiente de determinación original de acuerdo a los grados de libertad del modelo.
- Cuadrado medio del error (CME): informa sobre la precisión de las estimaciones.
- Prueba de significación de los parámetros: determina la significación estadística de los parámetros del modelo.
- Error estándar de los estimadores de los parámetros: permite determinar los intervalos de confianza para los parámetros.
- Error medio en valor absoluto: da una idea de la magnitud media de los errores independientemente de su signo.
- Error estándar de la estimación: muestra la desviación normal de los residuos y puede utilizarse para la predicción de nuevas observaciones.
- Análisis gráfico de los residuos: Comportamiento de los residuos obtenidos de la diferencia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo.
- Diferencia agregada o Sesgo: evalúa la desviación media de los residuos del modelo respecto a los valores observados. El signo del error de predicción promedio expresa si la función examinada sobrestima (-) o subestima (+) el valor de los datos analizados.

En la literatura científica no existe una postura unánime sobre cuales criterios estadísticos utilizar para seleccionar el modelo de mejor ajuste. El comportamiento de los criterios de selección dependerá en gran medida de las características de la información como puede ser el tamaño muestral o la estructura del proceso que generó los datos (García, 1996). Es por ello que en gran medida le corresponde al investigador definir cuáles son los que debe seleccionar en el análisis de su información.

En las ciencias agropecuarias, diversos autores proponen criterios estadísticos para la selección del modelo de mejor ajuste Guerra *et al.*, (2003) y Augusto (2009), sin embargo, estos pueden variar de una investigación a otra. Entre los criterios que se utilizan con mayor frecuencia en las investigaciones se

encuentran: el coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajust), cuadrado medio del error (CME), error estándar de la estimación (EE), significación de los parámetros del modelo y la prueba de Durbin-Watson, esta última se emplea para el análisis de los residuos.

1.4 Aplicación de la modelación matemática de los pastos en Cuba

La modelación matemática y la simulación por computadora son herramientas de mucha utilidad en los diferentes campos del saber humano. En la actualidad, la modelación es un instrumento muy común en el estudio de sistemas y el desarrollo acelerado de las técnicas de computación han permitido este desarrollo. Desde la década de los 80 se ha venido utilizando la modelación por algunos investigadores cubanos con el objetivo de describir el crecimiento de cultivos (Torres y Ortiz, 2005).

Las aplicaciones de la modelación en Cuba tuvieron sus inicios en los trabajos de Del Pozo y Herrera (1995), Del Pozo (1998) y Torres *et al.*, (1999) en pasto estrella (*C.nlemfuensis*). Estos autores encontraron relaciones polinómicas entre las variables, sin embargo, en estos modelos los parámetros no tienen interpretación biológica. Posteriormente se modeló y simuló el comportamiento productivo del pasto estrella (*C.nlemfuensis*) bajo diferentes frecuencias de corte, niveles de fertilización y condiciones climatológicas adversas para el desarrollo de este cultivo. El modelo Gompertz utilizado ajustó los datos con coeficientes de determinación que estuvieron alrededor del 99% para los períodos lluvioso y poco lluvioso.

Los modelos matemáticos aplicados al crecimiento de las plantas permiten estimar o predecir su comportamiento temporal en diferentes condiciones (Thornley y France, 2007). Para su correcta utilización se deben tener en cuenta tres aspectos fundamentales: a) bondad del ajuste de los datos, b) capacidad de interpretación biológica, c) exigencias computacionales (Chacín, 1998). En la actualidad, este último no constituye una limitación, debido al desarrollo alcanzado por las ciencias computacionales.

Para la producción de forrajes, en gramíneas rastreras y de porte bajo, Del Pozo (1998) analizó el crecimiento del pasto estrella (*C.nlemfuensis*) en condiciones de corte y pastoreo, con y sin adición de fertilizante nitrogenado. En esta misma variedad, Torres *et al.*, (1999) estimaron un modelo para describir el crecimiento en condiciones de pastoreo, pero en función del tiempo de reposo. Estos autores recomendaron estudios similares en otras especies tropicales con hábito de crecimiento rastrero o erecto. Posteriormente López (2016) modeló y simuló el rendimiento de este mismo cultivo bajo diferentes condiciones de manejo y escenarios climáticos.

Autores como Díaz (2007), Martínez *et al.*, (2010), Rodríguez *et al.*, (2011), Fortes (2012) y Rodríguez *et al.*, (2013), estudiaron la dinámica de acumulación de biomasa del king grass (*P. purpureum*) y de algunos de sus clones con el empleo de modelos no lineales, sin embargo, en su generalidad solo se abordó el tema orientado a la bondad de ajuste del modelo y no a la interpretación biológica de los resultados.

En tal sentido se aprecia que son escasos los trabajos relacionados con el tema de la modelación de la producción de pastos y forrajes en el país y aunque existen modelos especializados que se puedan utilizar como elemento de partida, es necesario desarrollar modelos adaptados a nuestras condiciones que puedan servir como herramienta útil en la toma de decisiones.

1.5 Etapas de Crecimiento

El crecimiento de una planta o animal describe una curva de tipo sigmoidea y puede expresarse a través de su peso o altura. Según Crespo (2011) en el caso del crecimiento de las plantas se distinguen tres fases o estados biológicos:

- Primera fase: Es lenta y su duración depende de la especie y del grado de intensidad con que la gramínea es desfoliada, se le denomina fase logarítmica.

- Segunda fase: El crecimiento ocurre relativamente constante y expresa la tasa de máximo crecimiento del cultivo. Su duración depende de la especie de gramínea.
- Tercera fase: Predomina la pérdida de materia seca y la mayor acumulación de tallos, inflorescencia y material muerto en el pastizal.

Al representar el crecimiento en función del tiempo, se obtiene una curva donde se observan tres fases, la primera se denominada crecimiento inicial, donde existe poco desarrollo de la planta, la segunda, fase exponencial, donde se muestra la mayor tasa de crecimiento y la última fase, envejecimiento, donde la planta deja de crecer (Vilchez *et al.*, 2015).

1.6 El género *Cenchrus*

En América, el género *Cenchrus* se encuentra representado por 41 especies que crecen en una gran variedad de hábitats, constituyendo importantes componentes de la vegetación. De las especies que crecen en América, 11 son endémicas y ocho son adventicios y/o naturalizados según Gutiérrez (2015).

El género *Cenchrus* (anteriormente *Pennisetum*), en la mayoría de los países donde se cultiva, alcanza rendimientos anuales por encima de los obtenidos en otras gramíneas, incluso, en igualdad de condiciones. Los estudios que incluyen a este género señalan rendimientos anuales de materia seca (MS), que oscilan entre 20 y 28 t ha⁻¹, con gran variabilidad entre especies (Olivera-Castro *et al.*, 2017). Estas características le conceden vital importancia para la producción animal, por los altos volúmenes de biomasa logrados en tiempo relativamente cortos, así como la posibilidad de utilizarlos varias veces en el año (Leonard *et al.*, 2014).

Cenchrus purpureus (Schumach.) Morrone, tiene como centro de origen África subtropical (Singh *et al.*, 2013). Es una especie con fotosíntesis C4 de rápido crecimiento, crece bien en condiciones climáticas de trópico y suelos con

buena retención de humedad (De Morais *et al.*, 2012). Estudios recientes en esta especie se centran en temas como producción de etanol, celulosa para papel, combustión directa de biomasa, sustituto del carbón vegetal y como forraje para la alimentación animal (Rueda *et al.*, 2016).

1.6.1 Desarrollo de nuevas variedades

Se han obtenido nuevas variedades de *Cenchrus purpureus* tolerantes a la sequía por medio de herramientas biotecnológicas (Martínez *et al.*, 1996), además con el uso de mutágenos físicos (Herrera, 2009), se obtuvieron clones de *C. purpureus* con tolerancia a la sequía, salinidad y ambas condiciones estresantes (denominados mixtos).

Las nuevas variedades tolerantes a la sequía han demostrado un comportamiento agronómico positivo, y algunas (CT-601, CT-603 y CT-605) han superado a su progenitor (CT-115) en condiciones de intensa sequía estacional (Arias *et al.*, 2018); Ray *et al.*, 2016).

En Cuba se emplearon diferentes variedades desde el inicio del siglo XX, como fue el Napier el que se extendió por todo el país con gran rapidez debido, entre otros factores, a sus elevados rendimientos y aceptable composición química. Con posterioridad se introdujeron otras variedades, una de las cuales fue el *Cenchrus Purpureus*, que a mediados de la década del 80 del pasado siglo llegó a ocupar el 85 % de las áreas forrajeras del país y desplazó a las tradicionalmente utilizadas, lo que estuvo determinado por su alta capacidad de convertir la energía lumínica en biomasa, su plasticidad ecológica, adecuada calidad y altos rendimientos (Herrera, 2009).

Entre las vías para el mejoramiento de plantas está la fitotecnia de las mutaciones que utiliza técnicas biotecnológicas como: el cultivo de tejidos, de células, de protoplastos e ingeniería genética; radiaciones ionizantes provenientes de diferentes fuentes (mutágenos físicos); sustancias químicas (mutágenos químicos) y la combinación de ellas. Herrera (2005), refiere que

estas técnicas permiten, en menor tiempo, obtener y seleccionar plantas con las características deseadas, comparado con las vías de la genética clásica, y es el cultivo de tejidos una de las técnicas más utilizadas en Cuba.

Otros de los objetivos que se persiguió con la aplicación de la biotecnología fue la obtención de clones con mejores características agronómicas y con mayor calidad. Parra (2008), al evaluar diferentes clones en suelo ferralítico rojo, sin riego ni fertilización, encontró que algunos produjeron más MS que su progenitor (Cuba CT-115) y tuvieron mejor producción en el período poco lluvioso, así como diferente porte. En este sentido es importante conocer el comportamiento de *Cenchrus purpureus* antes diferentes factores que inciden en su producción de biomasa.

1.6.2 Características agronómicas y morfo fisiológicas

Este género se utiliza ampliamente en Cuba para la producción de forraje debido, entre otros aspectos, a su alta eficiencia de transformación de la energía luminosa en química, elevados rendimientos, aceptable calidad y se adapta, crece y desarrolla en amplia variedad de suelos y características climáticas (Herrera y Ramos, 2006). No obstante, exige de suelos profundos, bien drenados y de fertilidad media a alta para lograr la mejor respuesta biológica de la planta (Padilla y Ayala, 2006).

Las variedades y ecotipos de *C. purpureus* presentan ventajas morfológicas, fisiológicas y productivas que las hacen deseables en condiciones edafoclimáticas específicas (Ramos *et al.*, 2013), por lo que inicialmente se requiere una caracterización morfológica para conocer la diversidad del material, antes de su introducción y utilización en cada región agroecológica.

Según Febles y Herrera (2006) este género está formado por plantas anuales o perennes, generalmente de ciclo de crecimiento largo, con hojas comúnmente planas y panículas densamente espiciformes. Las espículas están en grupos de 2 o 3 o solitarias, con un involúcro de cerdas unidas sólo en la misma base y

caen junto con la espícula. La primera gluma más corta que la espícula, a veces diminuta o ausente; la segunda igual a la lemna estéril o más corta, lemna fértil lampiña y el margen delgado encerrando la pálea. Pueden alcanzar hasta 4 m de altura, pero en condiciones normales de explotación llega a 190 cm.

Florece entre noviembre y febrero, cuando la planta alcanza entre 1.0 y 1.5 m de altura. En este momento, puede detener su crecimiento y ocurre discreto adelgazamiento de las hojas y los tallos. Puede presentar brotes laterales en número mayor de 10 por planta florecida y el rendimiento generalmente se reduce. La inflorescencia alcanza 23.5 cm de longitud y su semilla botánica es fértil con 10-18% de germinación (Febles y Herrera, 2006).

1.6.3 Factores que influyen en la producción de biomasa

La producción de biomasa de los pastos se ve afectada principalmente por las condiciones ambientales y características del suelo, lo que limita en algunas ocasiones el rendimiento por hectárea y permanencia del cultivo. Dentro de las alternativas que se utilizan para mejorar el rendimiento de *C. purpureus* está el mejoramiento genético convencional, sin embargo, los cultivares obtenidos por esta técnica generalmente se caracterizan por florecer en momentos diferentes, las flores son pequeñas y el polen es de vida corta, lo que ocasiona una baja producción de semillas con una alta infertilidad (Pongtongkam *et al.*, 2006).

Entre los factores que más influye en los rendimientos y calidad de los pastos y forrajes es el suelo donde se desarrollan, que se puede alterar por causas naturales o provocadas por la actividad humana, donde los procesos de salinización desempeñan un papel primordial. Aproximadamente, el 43 % de la superficie terrestre utilizada para cultivar en el mundo se encuentra afectada por la salinidad que, en su mayoría, supera los niveles de tolerancia de las especies de cultivo tradicionales (Argentel *et al.*, 2016), incrementándose la tasa media de salinización a 0,5 % anual, debido fundamentalmente a las bajas precipitaciones, alta superficie de evaporación, irrigación con aguas de mala

calidad y por prácticas tradicionales de cultivo que favorecen el incremento de la concentración de sales en el suelo (Argentel *et al.*, 2013).

La temperatura ejerce influencia en el crecimiento y composición química de los pastos debido a la relación que tiene con la cinética de las reacciones bioquímicas y el mantenimiento de la integridad de las membranas (Del Pozo, 1998). El crecimiento de la planta se interrumpe cuando la temperatura sobrepasa determinado punto crítico o cae por debajo de cierto valor mínimo. Para las especies tropicales, el rango óptimo de temperatura para el máximo crecimiento está alrededor de 39 °C. Los pastos tropicales, mayoritariamente C4 (Ciclo de Hatch y Slack), presentan acentuada reducción en su tasa fotosintética cuando están expuestos a temperaturas inferiores a 15°C (Del Pozo, 1998). Esto pudiera estar determinado por la baja conversión de azúcares en los tejidos, debido a la disminución de los procesos de biosíntesis y por el déficit energético acarreado por la reducción de la tasa respiratoria.

La radiación solar es otro factor determinante en el crecimiento de los pastos a través de sus efectos en la fotosíntesis y en otros procesos fisiológicos, como la transpiración y, la absorción de agua y nutrientes. Fortes (2012) refiere que, de esta forma, los incrementos en la productividad, principalmente en plantas C4, están relacionados con aumentos en la intensidad luminosa, debido al importante papel de este factor en la fotosíntesis.

La duración del período luminoso es otro factor relacionado con la intensidad y calidad de la radiación, que puede influir en el crecimiento. Los días cortos característicos del invierno, unido a la baja intensidad de radiación, es una de las causas fundamentales de la disminución de la productividad de los pastizales, cuyo comportamiento es variable en dependencia de la especie de pasto (Del Pozo, 2004).

Faustino (2007) afirmó que las variaciones en la calidad y cantidad de luz absorbida, transmitida y reflejada por las diferentes partes de la planta determinan alteraciones en su morfología, como por ejemplo la relación hoja:

tallos. Las variaciones en el fotoperíodo desempeñan un papel importante en la inducción de la floración en muchas especies forrajeras, lo que influye en la calidad del forraje (Buxton y Fales, 1994). Dentro de los estudios de los pastos un aspecto que resulta necesario es conocer la manifestación de su crecimiento y desarrollo en las diferentes etapas de su ciclo biológico.

1.6.3.1 Altura y frecuencia de corte o pastoreo

Este es uno de los forrajes más utilizados por rumiantes en los países tropicales en desarrollo (Rahman *et al.*, 2019). Su utilización en sistemas de producción ganadera se ha incrementado como forraje para corte, pastoreo y forraje de reserva para períodos secos. Debido a sus valores altos en producción de materia seca (MS), proporción de hoja, rusticidad y plasticidad; los cuales, le permiten adaptarse a gran diversidad de tipos de suelo (incluyendo aquellos de baja fertilidad) y condiciones climáticas adversas de altas temperaturas y bajas precipitaciones (García *et al.*, 2018).

Los pastos y forrajes cuentan con mecanismos de adaptación para sobrevivir al efecto de las defoliaciones, ya sea por corte o pastoreo (Distel *et al.*, 2007). El efecto inmediato de la defoliación está dado por la reducción de área foliar, y por tanto, de la cantidad de luz interceptada, de las reservas de carbohidratos y del crecimiento de la raíz (Richards, 1993). Según Lemaire (2001), este proceso causa cambios en la economía del carbono y nitrógeno por lo que la altura y el momento de la defoliación constituyen elementos básicos en el manejo, por la influencia que estos ejercen en el comportamiento morfofisiológico y productivo del pastizal (Del Pozo, 2004).

Fortes (2012) refiere que en condiciones de pastoreo, la dinámica de crecimiento no sólo depende de las variaciones del clima y el suministro de nutrientes, sino de la acción de los animales en el pastoreo, cuyas interacciones son numerosas y complejas, con respuestas morfológicas y fisiológicas variables, en dependencia del hábito de crecimiento, mecanismos

de propagación y persistencia, y del sistema de manejo empleado en su explotación.

1.6.3.2 Fertilización y riego

Se plantea que la irrigación constituye una de las estrategias reguladoras de la producción y se utiliza como técnica de manejo para reducir el efecto de la estacionalidad de la producción de los pastizales (Mota *et al.*, 2010). Las respuestas productivas de los pastos a la irrigación parecen estar más ligadas a las condiciones climáticas, tanto al momento como a la frecuencia de irrigación, que a las características fisiológicas de las especies de gramíneas (Vitor *et al.*, 2009).

Los elementos minerales son esenciales para el crecimiento y desarrollo de la planta, debido a las variadas funciones que ellos desempeñan en el reino vegetal (Cabrera *et al.*, 2009). En este grupo se encuentran los llamados macronutrientes como el nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, azufre y magnesio. Los mismos forman parte de múltiples compuestos que se relacionan directamente con los diferentes procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento y la calidad de los pastos.

El potasio desempeña un papel fundamental en la regulación del potencial osmótico de las células de las plantas y también activa muchas enzimas involucradas en la respiración y la fotosíntesis, además de regular el sistema hídrico de las plantas a través de la apertura y cierre estomático (Taiz y Zeiger, 2010).

Cabrera *et al.*, (2009), plantean que las gramíneas que se utilizan en sistemas de corte son altamente demandantes de nutrientes, principalmente de Nitrógeno el cual es uno de los elementos más importantes que determina el nivel de producción de forraje por unidad de superficie. Según Fortes (2012) los nutrientes, que en mayor cantidad se requieren son el Nitrógeno, Fósforo y el Potasio. Otros nutrientes secundarios son: calcio, azufre y magnesio.

Aportar una herramienta estadística-matemática que permita a los investigadores integrar datos biológicos y climáticos, donde se obtenga una respuesta de dicho comportamiento resulta importante para definir estrategias de manejo adecuadas. En tal sentido, el empleo de la modelación resultaría una alternativa valiosa para los investigadores y productores.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

La descripción del crecimiento de una planta, o de un cultivo, a lo largo de su ciclo de vida o de producción, así como la evaluación de tratamientos capaces de modificar la producción de biomasa del mismo, requieren indicadores objetivos que puedan ser validados estadísticamente. Las técnicas de análisis del crecimiento y la producción de biomasa son herramientas útiles para estos fines.

Una vez realizada una profunda revisión bibliográfica respecto a los referentes teóricos existentes sobre la modelación de pastos y forrajes, así como los principales aspectos relacionados con el *Cenchrus purpureus*, es posible definir los métodos y herramientas a utilizar en la investigación. Para ello el presente capítulo recoge los siguientes aspectos: los métodos teóricos, empíricos y matemáticos - estadísticos, la metodología experimental empleada, el análisis estadístico matemático realizado para el desarrollo de la investigación, los modelos seleccionados para describir la producción de biomasa, así como las herramientas utilizadas para el procesamiento y análisis de la información.

2.2 Métodos de la investigación

Para el desarrollo de la investigación se tuvieron en cuenta los siguientes métodos de la investigación:

Métodos teóricos:

❖ **Histórico – Lógico:** permitió conocer la evolución y desarrollo de la modelación matemática, aplicadas al ámbito agropecuario y en particular al crecimiento de los pastos y forrajes en Cuba.

❖ **Tránsito de lo abstracto a lo concreto:** permitió comprender el objeto de la investigación: el crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus*, así como sus

características esenciales, que condicionará un conocimiento más profundo y de mayor contenido que se pueda llevar a la práctica.

Este método comprende fundamentalmente el empleo de procedimientos como el análisis y la síntesis.

❖ **Análisis – síntesis:** se utilizó con el objetivo de separar el objeto de la investigación en cada una de sus partes y descubrir sus interrelaciones. Además, permitió realizar un análisis de la información obtenida en las fuentes bibliográficas con el objetivo de profundizar en los conceptos y definiciones más importantes para la elaboración de la investigación.

❖ **Inducción – Deducción:** permitió realizar un análisis de los conceptos teóricos e investigaciones realizadas por diferentes autores, sobre el empleo de la modelación del crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus* y poder arribar a conclusiones, donde se establezca una relación entre lo singular, particular y general.

❖ **Enfoque de sistema:** Este método se utilizó para modelar el objeto (crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus*) mediante la determinación de sus componentes en el tiempo, así como las relaciones entre ellos, con el fin de determinar el comportamiento de su crecimiento.

❖ **Modelación:** Para la modelación del crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus*

Métodos empíricos:

❖ **Observación:** Se realizó con el objetivo de obtener información sobre el objeto de estudio con el fin de seleccionar los elementos que se desean analizar y diagnosticar para dar cumplimiento a la hipótesis de trabajo.

❖ **Análisis documental:** permitió realizar un análisis de los documentos encontrados durante el proceso de revisión bibliográfica relacionado con el tema de investigación, para la elaboración de la fundamentación teórica de la

investigación. La información que se selecciona debe ser confiable y actualizada tanto a nivel internacional como nacional, acerca de la modelación del crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus*, así como las características de la planta y la influencia de la variable edad con la altura y el rendimiento de materia seca.

❖ **Criterio de expertos:** se validará la propuesta de investigación teniendo en cuenta los criterios de investigadores conocedores de la temática que se investiga, a partir de los conocimientos alcanzados, experiencia y estudios bibliográficos.

Métodos estadístico - matemáticos:

❖ **Estadística descriptiva:** se utilizó para caracterizar los datos obtenidos en la experimentación.

❖ **Estadística inferencial:** permitió realizar inferencias sobre el comportamiento de crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus* basada en la información contenida en investigaciones desarrolladas en esta gramínea. Las inferencias se realizarán mediante el Análisis de Varianza, según diseño de bloques al azar en arreglo factorial. Se emplearán tablas y gráficos para representar la información obtenida y de esta forma lograr una mejor comprensión de los resultados de la investigación.

2.3 Procedimiento experimental

Se utilizó la información proveniente de investigaciones desarrolladas durante el año 2016 en el centro experimental “Miguel Sistach Naya” perteneciente al departamento de Pastos y Forrajes del Instituto de Ciencia Animal, situado en San José de las Lajas, provincia Mayabeque, Cuba, ubicado entre los 22° 53 LN y los 82° 02 LO, a 80 msnm Anon (1989).

El experimento se desarrolló en un suelo Ferralítico rojo típico (Hernández *et al.*, 2015). Se utilizó un diseño de bloques al azar, con cinco réplicas y la unidad experimental fue la parcela de 25 m². Se evaluaron cinco clones de *Cenchrus purpureus* con características para el pastoreo: CT-3, CT-7, CT-11,

CT-26, CT-27 y se compararon con su progenitor *C. purpureus* vc. Cuba CT-115. Para el estudio se seleccionó el CT-27.

El experimento se estableció en la primavera de 2015. Se realizó una preparación convencional del suelo, consistente en aradura y grada, con pases alternos de grada media y se mantuvieron limpias las parcelas hasta su establecimiento. Se plantaron semillas de cinco meses de edad en parcelas de 5 x 5 m, con distancia de siembra entre surcos de 0.90 m.

La investigación se realizó en condiciones de secano y sin fertilización. El corte se efectuó a machete a 10 cm sobre el nivel del suelo. La parcela se cortó dejando efecto de borde de los surcos externos, así como 50 cm por los extremos. Todo el material cortado se homogenizó, se pesó y se tomó una muestra aleatoria de 500 g por parcela. La muestra se separó manualmente en hojas y tallos las que se introdujeron en estufa de circulación de aire a 60°C hasta peso constante. Se evaluaron las variables altura de la planta en cm y RMS (kg/macollas) según la metodología de Herrera (2006b). En el caso de la variable altura de planta solamente se realizó el estudio en el período lluvioso por no contar con información en el poco lluvioso, no así para el rendimiento de MS.

Se realizó un análisis exploratorio de los datos y mediante la estadística descriptiva se obtuvieron los estadígrafos de posición (media) y de dispersión (desviación estándar y coeficiente de variación), así como los valores mínimos y máximos. Posteriormente se realizó análisis de varianzas según diseño de bloques al azar en arreglo factorial (2*7), los factores fueron los clones (CT-115 y CT-27) y las edades de crecimiento de la planta (15, 30, 45, 60, 75, 90 y 105 días), para la comparación de medias se aplicó la dócima de Duncan para $p < 0,05$ en los casos necesarios.

Se emplearon modelos de regresión lineal y no lineal para conocer el comportamiento de las variables en estudio en relación con la edad de la planta, cuyas expresiones se muestran a continuación:

❖ **Modelos de regresión lineal:**

Lineal $y_{(t)} = a + bt + \varepsilon$

Polinomial de 2^{do} orden $y_{(t)} = a + bt + ct^2 + \varepsilon$

❖ **Modelos de regresión no lineal:**

Logístico $y_{(t)} = \frac{a}{(1 + be^{-ct})} + \varepsilon$

Gompertz $y_{(t)} = ae^{-be^{-ct}} + \varepsilon$

donde:

$y_{(t)}$: variable dependiente en función de t

a, b y c: parámetros de los modelos

t: variable independiente y representa el tiempo medido en días

ε : error aleatorio, normalmente distribuido con media cero y varianza constante.

La estimación de los parámetros de los modelos lineales (lineal y cuadrático) se realizó por el método de los mínimos cuadrados ordinarios y para los no lineales (Logístico y Gompertz) se empleó el procedimiento iterativo de Levenberg-Marquardt. Para la selección del modelo con mejor bondad de ajuste a los datos, se tuvieron en cuenta los siguientes criterios estadísticos publicados por Guerra *et al.*, (2003) y Torres *et al.*, (2012):

- ❖ Coeficiente de determinación (R^2)
- ❖ Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj})
- ❖ Cuadrado medio del error (CME)
- ❖ Error Estándar de estimación (EE estimac)
- ❖ Media Absoluta del error (MAE)
- ❖ Significación de los parámetros del modelo
- ❖ Dócima de Durbin-Watson (DW)

Después de seleccionar el modelo de mejor ajuste para la variable altura de la planta y rendimiento de materia seca de los clones estudiados se calculó la velocidad de crecimiento de dichas variables mediante las curvas de evolución en el tiempo del incremento corriente diario (ICD) según Kiviste *et al.*, (2002) la cual se define como:

donde:
$$ICD = \frac{dy}{dt}$$

ICD: Incremento corriente diario.

$\frac{dy}{dt}$: Primera derivada del modelo con respecto al tiempo.

Posteriormente se calculó la segunda derivada del modelo en el paquete estadístico Derive 6 y se determinó el punto de inflexión para conocer el momento en que se alcanza la mayor velocidad del crecimiento y donde se producía el cambio de concavidad en la función mediante las fórmulas:

Punto de inflexión
$$\frac{d^2W}{dt^2} = \left[\frac{\ln(b)}{c}; \frac{a}{e} \right]$$

El procesamiento se realizó en varias etapas, para la determinación de los estadígrafos, el análisis de varianza y el ajuste de los modelos lineales y no lineales se utilizó el software estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2012) con el fin de conocer los valores iniciales de los parámetros y sus valores de probabilidad y para la selección adecuada del modelo de mejor bondad de ajuste el Statgraphics Plus (Anon, 1995) por aportar mayor cantidad de criterios estadísticos.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Introducción

En el presente capítulo se muestran resultados de la caracterización, análisis de varianza y modelación matemática del crecimiento de los clones CT-115 y CT-27 de *Cenchrus purpureus* en diferentes edades de corte para los dos períodos estacionales (lluvioso y poco lluvioso). Se muestra, además, la selección de los modelos de mejor ajuste para describir el comportamiento de la altura de la planta y el rendimiento de materia seca de los clones evaluados, así como se evaluará el momento óptimo de crecimiento y de mayor producción de biomasa.

3.2 Caracterización de la altura de la planta y rendimiento de materia seca en el período lluvioso

En la tabla 1 se muestran los resultados de la caracterización de la variable altura de la planta para cada momento de medición en el período lluvioso. Se observó que al inicio de la etapa de experimentación ambos clones manifiestan una altura media similar y en la medida que transcurrieron los tiempos de muestreos sus crecimientos fueron continuos.

Tabla 1. Caracterización de la altura de la planta de los clones CT-115 y C-27 para el período lluvioso.

Edad (días)	Clon-115					Clon-27				
	Media (cm)	D.E. (cm)	CV (%)	Mín.	Máx.	Media (cm)	D.E. (cm)	CV (%)	Mín.	Máx.
15	18,60	2,19	11,78	15,00	20,00	18,80	1,30	6,94	17,00	20,00
30	31,60	3,21	10,16	28,00	35,00	28,40	2,70	9,51	25,00	32,00
45	53,30	5,37	10,07	49,00	62,50	47,20	4,44	9,40	40,00	51,00
60	75,00	8,66	11,55	70,00	90,00	66,00	6,52	9,88	55,00	70,00
75	85,00	5,00	5,88	80,00	90,00	90,00	3,54	3,93	85,00	95,00
90	92,00	5,70	6,20	85,00	100,00	96,00	4,18	4,36	90,00	100,00
105	90,00	3,54	3,93	85,00	95,00	93,20	3,42	3,67	90,00	98,00

Se aprecia que el clon CT-115 presentó las mayores alturas hasta los 60 días, sin embargo, al finalizar la experimentación se observó que el clon CT-27 alcanzó un ligero incremento entre 3 y 5 cm en su altura promedio a partir de los 75 días. Estudio realizado por Herrera (2022) al evaluar el comportamiento

agronómico de nuevas variedades de *Cenchrus purpureus* (CT-600, CT-601, CT-602, CT-603, CT-605, CT-607, CT-608 y CT-609), tolerantes a la sequía, obtenidas por cultivo de tejidos *in vitro*, y compararlas con su progenitor (CT-115) encontró alturas de 90 cm similares a las de esta investigación.

Por otra parte, se apreció que ambos clones presentaron bajos valores de variabilidad con respecto a la media, los menores coeficientes de variación se observaron a los 105 días. Cabe señalar que, a los 15 días de inicio del muestreo el clon CT-115 fue el que presentó mayor variabilidad con respecto al valor medio de 11,78%. Mejías (2019) encontró valores de variabilidad por encima del 50%, para el clon CT-26. Este resultado pudiera estar dado a que en el período lluvioso existe mayor humedad del suelo, altas temperaturas y días más largos, lo que propicia que las plantas acumulen mayor cantidad de biomasa, y expresen su potencial de crecimiento de forma más dinámica Rodríguez *et al.*, (2011). Sin embargo, los resultados de este estudio no coinciden con los reportados por dichos autores.

Estudios realizados por Ledea *et al.*, (2017) en el oriente de Cuba sobre el crecimiento de las variedades CT-115 y CT-500 a los 90 días reportaron alturas superiores a las obtenidas para los clones CT-115 y CT-27 aunque evaluaron su crecimiento hasta los 120 días. Herrera (2022) desarrolló diferentes investigaciones en variedades de *Cenchrus purpureus* tolerantes a la sequía en la región occidental de Cuba y encontró resultados similares.

Martínez *et al.*, (2010) señalan que la especie *Cenchrus purpureus* se encuentra muy extendida por toda la zona tropical y es utilizada como base forrajera en la alimentación de las vacas, las ovejas y las cabras. Sin embargo, al pertenecer a la familia de las poaceas, tiene limitado su valor nutricional por su bajo contenido de proteína y de energía. No obstante, las variedades de *Cenchrus* convierten el 23 % de la radiación solar que reciben, valor superior al de una caña energética y al del resto de las gramíneas, y en su ciclo de crecimiento acumulan biomasa hasta los seis meses de edad. Por otra parte, Rueda (2015) refiere que en la medida que avanza la edad del CT-115 este presenta acortamiento de sus entrenudos lo que hace que disminuya su altura.

En la tabla 2 se observó que en el período lluvioso ambos clones mantuvieron un comportamiento similar en cuanto al rendimiento de MS hasta los 60 días de muestreo. Sin embargo, a partir de que transcurrieron los días se aprecia que el CT-27 manifiesta un mayor rendimiento promedio con valores entre 0,33 y 0,43 kg/macollas, con más rapidez al finalizar el proceso de experimentación. A pesar que su progenitor alcanzó menor rendimiento este fue más estable en el tiempo.

Tabla 2. Caracterización del rendimiento de MS por kg/macolla de los clones CT-115 y CT-27 para los períodos lluvioso y poco lluvioso

Edad (días)	Clon-115									
	Período lluvioso					Período poco lluvioso				
	Media (kg/mac)	D.E. (kg/mac)	CV (%)	Mín.	Máx.	Media (kg/mac)	D.E. (kg/mac)	CV (%)	Mín.	Máx.
15	0,01	0,002	25,62	0,01	0,01	0,01	0,002	36,99	0,003	0,01
30	0,06	0,03	49,83	0,04	0,12	0,01	0,001	10,10	0,01	0,01
45	0,17	0,05	33,24	0,11	0,22	0,03	0,01	26,23	0,02	0,03
60	0,27	0,10	36,44	0,15	0,36	0,03	0,01	32,00	0,02	0,05
75	0,30	0,02	7,44	0,27	0,33	0,05	0,003	6,44	0,05	0,06
90	0,31	0,07	21,41	0,19	0,34	0,06	0,001	2,18	0,06	0,06
105	0,32	0,06	19,83	0,22	0,40	0,06	0,003	4,25	0,06	0,07
	Clon-27									
	Media (kg/mac)	D.E. (kg/mac)	CV (%)	Mín.	Máx.	Media (kg/mac)	D.E. (kg/mac)	CV (%)	Mín.	Máx.
15	0,02	0,003	16,77	0,02	0,02	0,01	0,002	27,28	0,01	0,01
30	0,06	0,01	9,95	0,05	0,07	0,01	0,001	8,54	0,01	0,01
45	0,11	0,03	24,02	0,09	0,15	0,03	0,01	29,67	0,02	0,04
60	0,15	0,05	35,13	0,11	0,24	0,06	0,004	6,59	0,05	0,06
75	0,33	0,06	19,70	0,26	0,42	0,10	0,02	17,70	0,08	0,13
90	0,43	0,11	26,29	0,28	0,57	0,10	0,004	3,77	0,10	0,11
105	0,42	0,12	28,64	0,29	0,62	0,10	0,003	3,31	0,10	0,11

Fuente: Elaboración propia

Al analizar los coeficientes de variación en el período lluvioso estos fueron altos con respecto a su valor medio para ambos clones. Este comportamiento pudiera estar dado a la variabilidad que presentó el crecimiento de la especie asociado al período que se analiza. Fortes (2012) en similares condiciones edafoclimáticas, con la variedad CT-115 reportó un RMS de 0,25 kg/macolla a los 90 días por debajo del que se observó en los clones estudiados.

Sin embargo, este mismo autor cuando realizó esta investigación en condiciones de pastoreo y por un período de tiempo mayor, con el objetivo de determinar el tamaño de muestra adecuado obtuvo resultados de 0,71

kg/macolla superior al rendimiento de los clones CT-115 y CT-27 respectivamente. Por otra parte, Sosa *et al.*, (2008) en México al evaluar el rendimiento de otros clones de *Cenchrus*, en este mismo período de estudio encontraron valores de 0,023 kg/macolla de materia seca para el CT-115, inferiores al obtenido en este clon.

Velasco *et al.*, (2006) con el inicio de las lluvias y el incremento de las temperaturas alcanzó picos máximos en las tasas de crecimiento de forrajes tropicales, dando como resultado una alta producción de materia seca.

En cuanto al comportamiento del rendimiento de MS en el período poco lluvioso se apreció en ambos clones un rendimiento menor a los obtenidos en el período lluvioso, con un ligero incremento a partir de los 75 días para el clon CT-115 y de los 60 días para el clon CT-27. En cuanto a la variabilidad de los datos, se apreció una alta variación con respecto a sus valores medios, los mayores porcentos en este coeficiente se alcanzaron a los 15 y 45 días en ambos clones y a los 60 días para el clon CT-115.

Fortes *et al.*, (2015) señalaron que el género *Cenchrus* absorbe al género *Pennisetum*, dentro de la cual, actualmente se incluyen variedades de pasto que acumulan gran cantidad de materia seca (MS) en pie, lo cual se ve favorecido por el régimen de precipitaciones y asistencia con fertilizantes. Estos autores confirman que el crecimiento y desarrollo de *Pennisetum* está condicionado a la edad de rebrote y a las condiciones climáticas.

Según Rusinowski *et al.*, (2019) la producción de biomasa de los pastos se ve afectada principalmente por las condiciones ambientales y características del suelo, lo que limita en algunas ocasiones el rendimiento por hectárea y permanencia del cultivo.

El análisis de varianza para la altura de la planta por tratamientos para el período lluvioso mostró interacción significativa entre los factores edad y clones ($p=0,0074$) con mejor compartimiento el clon CT-27 a los 90 días con una

altura de 96,00 cm, sin embargo, este a su vez fue similar con respecto a su progenitor a los 90 y 105 días con alturas promedio de 92,00 y 90,00 cm (tabla 3).

Tabla 3. Comportamiento de la altura de los clones de *Cenchrus purpureus* con respecto a la edad en el período lluvioso

Variable	Clones Edad	CT-115	CT-27	EE y Signif.
Altura de la planta (cm)	15	18,60 ^h	18,80 ^h	±2,0896 p=0,0074
	30	31,60 ^g	28,40 ^g	
	45	53,30 ^e	47,20 ^f	
	60	75,00 ^c	66,00 ^d	
	75	85,00 ^b	90,00 ^{ab}	
	90	92,00 ^a	96,00 ^a	
	105	90,00 ^{ab}	93,20 ^a	

a,b,c,d,e,f,g,h: letras distintas indican diferencias significativas para p<0,05 Duncan (1955)

Arias *et al.*, (2019) desarrollaron un experimento factorial para evaluar la interacción entre diferentes edades de rebrote y variedades de *Cenchrus purpureus* y esta fue significativa. Las menores alturas se alcanzaron al inicio del experimento y en la medida que trascurrieron los días de muestreo fueron incrementándose, similar a lo reportado en este estudio para ambos clones. Por otra parte, Cruz *et al.*, (2017) estudiaron nuevas variedades de *Cenchrus purpureus* (CT-804 y CT-805) tolerantes a la sequía y salinidad y obtuvieron niveles superiores en su altura bajo estas condiciones experimentales con respecto a su progenitor CT-115.

Estudios realizados por Grajales *et al.*, (2018) en otras regiones latinoamericanas demuestran que el crecimiento de plantas del género *Cenchrus* se relaciona directamente con la edad de rebrotes. En Bolivia

Hinojosa *et al.*, (2014) informaron que la altura de maralfalfa (*Cenchrus spp.*) se incrementó con la edad alcanzando valores de 241 cm a los 75 días de crecimiento; muy superiores a los encontrados en dicha investigación.

Ledeo *et al.*, (2017) encontraron interacción significativa entre la edad de corte y diferentes clones y reportaron valores superiores de altura en la edad de 120 días para el clon CT-500 con respecto a su progenitor CT-115. Rodríguez *et al.*, (2013) informan que los pastos como *Panicum maximun* vc. Mombaza y *Pennisetum purpureum* vc. Cuba CT-115 son variedades que se caracterizan por un ciclo de crecimiento largo por más de 160 días.

En el análisis de varianza para el rendimiento de MS kg/macolla (tabla 4) se observó interacción significativa entre los efectos evaluados, con mejor comportamiento en el clon CT-27. Los mayores rendimientos para el período lluvioso se alcanzaron a los 90 y 105 días con valores similares de 0,43 y 0,42 kg/macolla respectivamente. Sin embargo, para el poco lluvioso los mejores valores se obtuvieron a partir de los 75 días, hasta el final de la etapa de experimentación, con comportamiento similar entre ellos y con valores inferiores al rendimiento obtenido en el período anterior.

Tabla 4. Comportamiento del rendimiento de MS (kg/macolla) de los clones de *Cenchrus purpureus* con respecto a la edad bajo el efecto de la época del año

Variable	Clones Edad	CT-115	CT-27	EE y Signif.
RMS (kg/mac) período lluvioso	15	0,01 ^f	0,02 ^{ef}	±0,0290 p=0,0009
	30	0,06 ^{def}	0,06 ^{def}	
	45	0,17 ^c	0,11 ^{cde}	
	60	0,27 ^b	0,15 ^{cd}	
	75	0,30 ^b	0,33 ^b	
	90	0,31 ^b	0,43 ^a	
	105	0,32 ^b	0,42 ^a	
RMS (kg/mac) período poco lluvioso	15	0,005 ^e	0,008 ^e	±0,0029 p<0,0001
	30	0,007 ^e	0,010 ^e	
	45	0,025 ^d	0,028 ^d	
	60	0,031 ^d	0,057 ^{bc}	

	75	0,051 ^c	0,098 ^a	
	90	0,062 ^b	0,102 ^a	
	105	0,061 ^b	0,102 ^a	

a,b,c,d,e,f: letras distintas indican diferencias significativas para $p < 0,05$ Duncan (1955)

Ventra Ríos *et al.*, (2022) estudiaron la respuesta del pasto Taiwan (*C. purpureus*) con varias frecuencias de corte e informaron que los rendimientos se incrementan con la edad de rebrote. Otros estudios realizados por Arias *et al.*, (2019) evaluaron variedades tolerantes a la sequía en la región oriental de Cuba y encontraron igual comportamiento en los rendimientos a medida que avanzaron los días de muestreo.

El género *Cenchrus purpureus* (anteriormente *Pennisetum purpureum*), en la mayoría de los países donde se cultiva, alcanza rendimientos anuales por encima de los obtenidos en otras gramíneas, incluso, en igualdad de condiciones. Los estudios que incluyen a este género señalan rendimientos anuales de materia seca (MS), que oscilan entre 20 y 28 t/ha⁻¹, con gran variabilidad entre especies Olivera-Castro *et al.*, (2017).

Las nuevas variedades de *Cenchrus purpureus* obtenidas por cultivo de tejidos, podrían mostrar rendimientos aceptables determinado por la edad lo que permite introducirlas en los sistemas de producción y sustituir aquellas gramíneas de menor productividad y más exigentes de insumos para expresar su potencial Aria *et al.*, (2019).

En el análisis se observó que en el período lluvioso esta planta expresa mejor rendimiento forrajero por lo que se identifica como una planta con características promisorias para el pastoreo. Según Nave (2007) cuando el régimen hídrico se combina con una adecuada disponibilidad de nutrientes e intercepción de luz se obtienen altas producciones de MS. Por otra parte, Ray *et al.*, (2016) informan que la poca disponibilidad de agua a los cultivos, es una limitante para el desarrollo favorable de su crecimiento, productividad y expresión del potencial productivo.

3.3 Modelación de la altura de la planta con respecto a la edad de clones de *Cenchrus purpureus* en el período lluvioso

En la tabla 5 se presentan los resultados de los criterios de comparación para la selección del modelo de mejor ajuste de la variable altura de la planta para los clones CT-115 y CT-27 de *Cenchrus purpureus* en el período lluvioso. Los modelos evaluados explicaron altos porcentaje de variabilidad superior al 90%, con excepción del Lineal que reportó aproximadamente el 89% de variación para el clon CT-115. Al analizar la significación de los parámetros se apreció que en ambos clones los modelos presentaron parámetros estadísticamente significativos con excepción del parámetro “a” en el modelo lineal para el clon CT-27 que fue no significativo.

Tabla 5. Modelos ajustados entre la edad y la altura de la planta para los clones CT-115 y CT-27 en el período lluvioso.

Clones	Criterios Modelos	R ² (%)	R ² aj (%)	CME	EE estimac	MAE	DW	Parámetros, EE y Signif.		
								a	b	c
CT-115	Lineal	88,97	88,64	90,18	9,50	7,41	1,03	11,26 ±3,59 P=0,0036	0,87 ±0,05 P<0,0001	
	Polinomial de 2 ^{do} orden	95,49	95,21	38,03	6,17	4,79	1,92	-13,30 ±4,30 P=0,0041	1,96 ±0,16 P<0,0001	-0,01 ±0,0013 P=0,0062
	Gompertz	96,06	95,82	33,20	5,76	4,36	2,10	98,75 ±3,41 P<0,0001	3,46 ±0,41 P<0,0001	0,04 ±0,004 P<0,0001
	Logístico	96,81	96,62	26,87	5,18	3,93	2,37	93,86 ±2,10 P<0,0001	12,31 ±2,25 P<0,0001	0,06 ±0,005 P<0,0001
CT-27	Lineal	92,28	92,05	72,86	8,54	6,70	1,47	5,49 ±3,23 P=0,0985	0,96 ±0,05 P<0,0001	
	Polinomial de 2 ^{do} orden	94,83	94,51	50,28	7,09	5,85	1,70	-11,03 ±4,94 P=0,0328	1,69 ±0,19 P<0,0001	-0,01 ±0,0015 P=0,0004
	Gompertz	96,09	95,85	38,05	6,17	4,82	1,86	110,52 ±5,62 P<0,0001	3,41 ±0,38 P<0,0001	0,03 ±0,004 P<0,0001
	Logístico	97,16	96,98	27,67	5,26	3,91	2,12	101,50 ±2,79 P<0,0001	13,19 ±2,23 P<0,0001	0,06 ±0,004 P<0,0001

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la bondad de ajuste de los modelos, el que presentó los mejores criterios estadísticos para ambos clones fue el Logístico con mayor porcentaje del coeficiente de determinación y los menores valores de CME, EE de estimación y MAE. Estos resultados repercutieron en los elevados valores de significación del modelo y sus parámetros. Además, el modelo que se seleccionó fue el que desde el punto de vista biológico logró explicar el comportamiento de los datos de la investigación. Con respecto al supuesto de incorrelación, no se observan problemas de incumplimiento, pues el estadístico Durbin-Watson resultó mayor que 1,4 en ambos clones (Anon, 1995).

Estudio desarrollado por Rodríguez *et al.*, (2011) al estimar la dinámica de crecimiento de *Pennisetum purpureum* vc. Cuba CT-169, encontraron que los modelos clásicos de mejor ajuste para las variables acumulación de materia seca y altura de la planta fueron el Gompertz para el período lluvioso y el Logístico para el poco lluvioso. Sin embargo, en este estudio este último modelo fue el de mejor ajuste para la variable altura de la planta en ambos clones en dicho período.

Mejía (2019) evaluó el comportamiento de la altura para el clon CT-26 en este mismo período de estudio y encontró que el modelo Logístico fue el que mejor describió la relación entre la edad y la altura de la planta, con elevados coeficientes de determinación (97%) y menores cuadrados medios del error.

Un estudio similar fue desarrollado por García *et al.*, (2007) con la variedad Mombaza y reportaron que el modelo Logístico fue el que mejor explicó la dinámica de crecimiento de la altura en función con la edad de la planta. En los estudios anteriores el ajuste es lógico si se considera que estos modelos se caracterizan por formar una curva sigmoidea que simula el crecimiento típico de las plantas Rodríguez (2015).

Sin embargo, autores como Martínez *et al.*, (2010) determinaron la dinámica de crecimiento de las variedades king grass, OM 22 y CT-169 y encontraron ajustes lineales con valores superiores a los 92%. Por otra parte, Grajales *et*

al., (2018) también observó un comportamiento lineal en esta misma variable, pero en pasto morado de la especie *Cenchrus purpureus*. Cabe señalar que los modelos reportados en estas investigaciones difieren de los seleccionados en este estudio para los clones CT-115 y CT-27, esto pudiera deberse a las condiciones edafoclimáticas en que se realizó cada estudio.

La figura 1 y 2 muestran los resultados del modelo ajustado a los datos para la variable altura de la planta de los clones CT-115 y CT-27. Ambas curvas describen el crecimiento de los clones a través del modelo Logístico. Se evidenció durante las primeras tres semanas un crecimiento lineal hasta los 45 días aproximadamente y a partir ese momento hay un ligero incremento en su altura hasta los 105 días donde se empieza a observar un comportamiento asintótico hasta alcanzar una altura máxima de 93,86 cm. En el análisis se manifiesta un crecimiento lento con una tasa intrínseca de 0,06 cm/días.

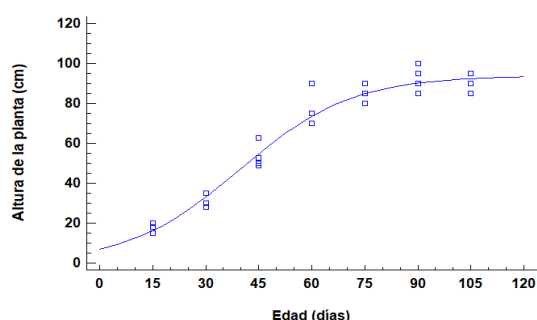


Figura 1. Comportamiento de la altura con respecto a la edad del clon CT-115

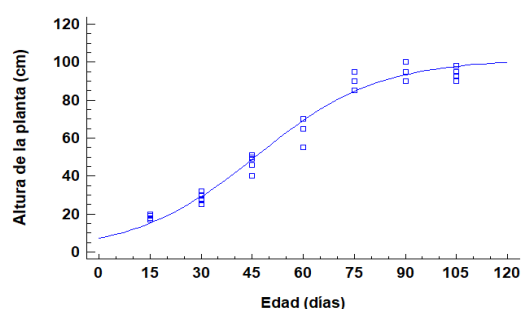


Figura 2. Comportamiento de la altura con respecto a la edad del clon CT-27

Pérez et al., (2004) y Thornley y France (2007) informan que los modelos Logístico y Gompertz se caracterizan por formar una curva sigmoidea que se ajusta al crecimiento típico de las plantas. Rodríguez et al., (2007) confirmaron que estos modelos presentaron buen ajuste con respecto a los datos experimentales de rendimiento y altura de otras especies y variedades de pastos, como *Panicum maximum* vc. Mombaza y *Pennisetum purpureum* vc. Cuba CT-115.

En la figura 3 se muestra los resultados de la primera derivada o velocidad de crecimiento del clon CT-115. En los primeros días de muestreo se observó un rápido desarrollo de la planta con tasas de incrementos entre 0,8 y 1,4 cm/días, hasta alcanzar el punto de inflexión a los 42 días. Entre los 35 y 50 días aproximadamente ocurrió un cambio de concavidad de la función, para posteriormente comenzar a disminuir su crecimiento hasta formar una asíntota a partir de los 105 días. Se apreció que a los 42 días este clon alcanzó una altura máxima aproximadamente de 47,15 cm.

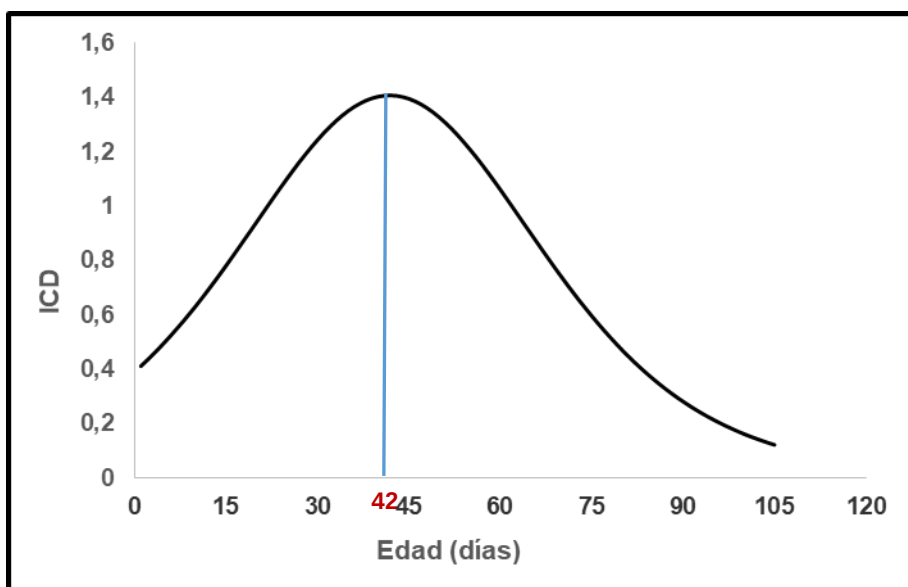


Figura 3. Velocidad de crecimiento de la altura de la planta en el período lluvioso del clon CT-115

El clon CT-27 presentó un comportamiento similar (figura 4), el punto de inflexión se alcanzó a los 43 días un día posterior a su progenitor, es importante destacar que los incrementos en su altura fueron iguales, así como el cambio de su concavidad. En este caso se observó que dicho clon mostró en ese momento una altura aproximada de 48,56 cm con 1,41 cm por encima del CT-115. La concavidad de la función se apreció entre 35 y 48 días aproximadamente, hasta decrecer su velocidad de crecimiento y mostrar su asíntota posterior a los 105 días donde comienza a estabilizarse.

Mejía (2019) evaluó el crecimiento del clon CT-3 y encontró a los 41 días una altura de la planta de 51,67 cm y para el clon CT-26 de 67,31 cm a los 48 días.

Sin embargo, en este estudio se alcanzaron alturas inferiores a las reportadas por dicho autor, que a pesar de que el clon CT-26 se demoró siete días más en alcanzar su altura esta fue mayor.

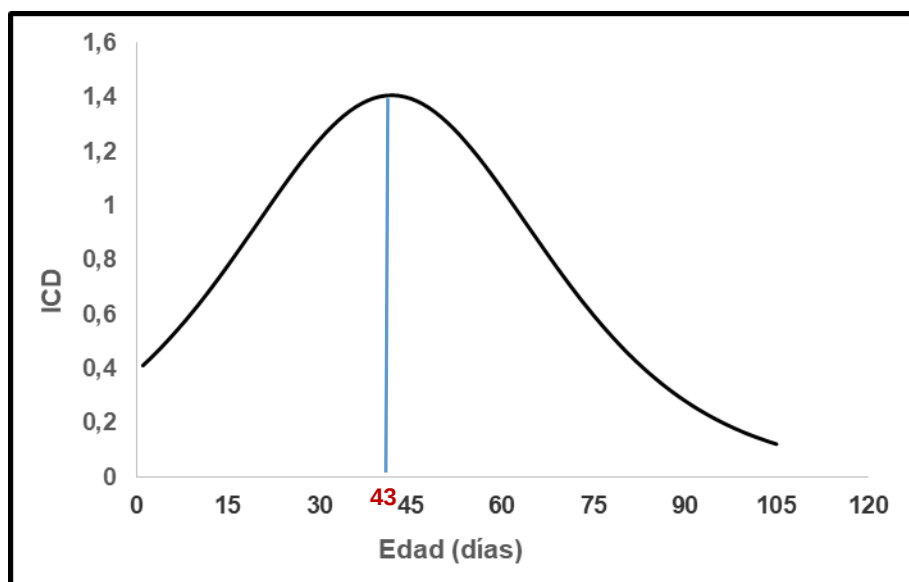


Figura 4. Velocidad de crecimiento de la altura de la planta en el período lluvioso del clon CT-27

Murillo *et al.*, (2015) relacionaron el rápido crecimiento inicial de estos cultivos con el desarrollo radicular de la planta, acotando que este proceso beneficia el desarrollo aéreo de la misma, pero que disminuye como resultado del incremento gradual en la senescencia y la reducción de la fotosíntesis neta por unidad de superficie (Beltrán *et al.*, 2005).

3.4 Modelación del rendimiento de materia seca con respecto a la edad de clones de *Cenchrus purpureus* en el período lluvioso y poco lluvioso

En la tabla 6 se presentan los criterios estadísticos de comparación para la selección del modelo de mejor bondad de ajuste para el rendimiento de materia seca para ambos clones. Los modelos explicaron una variabilidad moderada entre la variable en estudio y la edad de la planta en días en el período lluvioso, con valores superiores al 80% con excepción del Lineal que solo logró explicar un 74% de la variabilidad en el clon CT-115.

Tabla 6. Modelos ajustados entre la edad y el rendimiento de materia seca para los clones CT-115 y CT-27 en el período lluvioso.

Clones	Criterios Modelos	R ² (%)	R ² aj (%)	CME	EE estimac	MAE	DW	Parámetros, EE y Signif.		
								a	b	c
CT-115	Lineal	74,43	73,65	0,0045	0,07	0,05	1,48	-0,02 ±0,03 P=0,5297	0,0037 ±0,00038 P<0,0001	
	Polinomial de 2 ^{do} orden	81,99	80,87	0,06	0,0033	0,04	1,49	-0,14 ±0,04 P=0,0015	0,01 ±0,0015 P<0,0001	-0,000045 ±0,000012 P=0,0009
	Gompertz	83,86	82,85	0,0029	0,05	0,04	1,58	0,32 ±0,02 P<0,0001	13,69 ±9,60 P=0,1540	0,07 ±0,02 P=0,0005
	Logístico	84,11	83,12	0,0029	0,05	0,04	1,56	0,31 ±0,02 P<0,0001	111,18 ±124,80 P=0,3729	0,11 ±0,03 P=0,0002
CT-27	Lineal	80,43	79,84	0,006	0,08	0,06	2,08	-0,09 ±0,03 P=0,0037	0,01 ±0,00044 P<0,0001	
	Polinomial de 2 ^{do} orden	81,02	79,83	0,006	0,08	0,05	2,11	-0,05 ±0,05 P=0,3983	0,0031 ±0,0021 P=0,1459	0,000017 ±0,000017 P=0,3267
	Gompertz	82,98	81,92	0,0055	0,07	0,05	2,32	0,58 ±0,13 P=0,0001	7,65 ±3,90 P=0,0534	0,03 ±0,01 P=0,0092
	Logístico	84,29	83,31	0,005	0,07	0,05	2,45	0,48 ±0,05 P<0,0001	100,43 ±94,86 P=0,2875	0,07 ±0,02 P=0,0002

Fuente: Elaboración propia

En dicho clon los modelos que mejor describieron esta relación fueron los no lineales Logístico y Gompertz, seguido por el Polinomial de 2^{do} orden. El modelo Logístico fue el que presentó el mayor coeficiente de determinación (84%), menores errores estándar, sin embargo, no se seleccionó porque el parámetro “b” fue no significativo y mostró una sobreestimación, lo que influyó en un elevado valor de su error estándar.

Otro modelo que seguía con los mejores valores de los criterios de comparación fue el Gompertz, sin embargo, dicho parámetro también fue no significativo mostró valores de sus parámetros no significativo. El polinomial de 2do orden presentó una subestimación del parámetro “c” y de su error estándar con valores de -0,000045 y 0,000012 respectivamente. Considerando estas deficiencias se decide por el Lineal que indica que por cada unidad de aumento

de los días de muestreo el rendimiento de MS se incrementó en 0,0037 kg/macolla.

Al igual que en el análisis anterior los modelos que mejor describieron el comportamiento del rendimiento de materia seca para el clon CT-27 fue el Logístico, Gompertz y Polinomial de segundo orden, sin embargo, los criterios estadísticos no mostraron los mejores resultados. En este sentido se asume el modelo lineal con mejor bondad de ajuste que indica que por cada unidad de aumento de la edad en días se incrementó el rendimiento de MS en 0,01 kg/macolla. Al evaluar el supuesto de incorrelación en ambos clones, no se observaron problemas de incumplimiento, pues el estadístico Durbin-Watson se encontró dentro de los valores adecuados reportados por la literatura científica.

Mejía (2019) y Mejías *et al.*, (2022) al evaluar el comportamiento del rendimiento de materia seca en el período lluvioso encontró ajuste de modelos no lineales como el Gompertz y el Logístico para los clones CT-3 y CT-26 respectivamente. Sin embargo, en esta investigación estos modelos no fueron los que mejor describieron la relación de esta variable con la edad de la planta.

Vinay-Vadillo *et al.*, (2021) evaluaron el comportamiento del crecimiento del cultivar Taiwán con y sin fertilización en la llanura Veracruzana. Los resultados mostraron un ajuste polinomial de tercer orden para el rendimiento de materia seca con valores del coeficiente de determinación cercanos al 99%.

Al comparar los criterios estadísticos para la selección del modelo de mejor bondad de ajuste del rendimiento de materia seca para ambos clones en el período poco lluvioso (tabla 7), se observó que los modelos explicaron una alta variabilidad entre la variable en estudio y la edad de la planta en días, con valores superiores al 92%.

Tabla 7. Modelos ajustados entre la edad y el rendimiento de materia seca para los clones CT-115 y CT-27 en el período poco lluvioso.

Clones	Criterios Modelos	R ² (%)	R ² aj (%)	CME	EE estimac	MAE	DW	Parámetros, EE y Signif.		
								a	b	c
CT-115	Lineal	93,72	93,53	0,00003	0,006	0,0051	1,02	-0,01 ±0,0022 P=0,0004	0,00072 ±0,000033 P<0,0001	
	Polinomial de 2 ^{do} orden	93,89	93,51	0,00003	0,006	0,0050	1,05	-0,01 ±0,0040 P=0,0063	0,00086 ±0,00015 P<0,0001	-0,000001 ±0,0000013 P=0,3564
	Gompertz	95,83	95,57	0,00002	0,005	0,0038	1,52	0,07 ±0,005 P<0,0001	6,08 ±1,21 P<0,0001	0,04 ±0,005 P<0,0001
	Logístico	96,20	95,96	0,00002	0,005	0,0035	1,63	0,07 ±0,0027 P<0,0001	38,38 ±12,21 P=0,0026	0,06 ±0,007 P<0,0001
CT-27	Lineal	92,38	92,15	0,00013	0,01	0,0092	1,50	-0,02 ±0,0042 P=0,0001	0,0013 ±0,000063 P<0,0001	
	Polinomial de 2 ^{do} orden	92,67	92,21	0,00012	0,01	0,0090	1,53	-0,03 ±0,01 P=0,0022	0,0016 ±0,00030 P<0,0001	-0,000003 ±0,0000024 P=0,2707
	Gompertz	97,51	97,35	0,00004	0,006	0,0053	1,91	0,11 ±0,004 P<0,0001	16,67 ±4,91 P=0,0011	0,06 ±0,006 P<0,0001
	Logístico	98,35	98,25	0,00003	0,005	0,0039	1,92	0,11 ±0,002 P<0,0001	149,02 ±51,73 P=0,0052	0,09 ±0,007 P<0,0001

Fuente: Elaboración propia

En el caso del clon CT-115 el modelo que mejor explicó esta relación fue el Gompertz con el mayor porcentaje del coeficiente de determinación (95,83%) y los menores valores del CME (0,00002), EE de estimación (0,005) y MAE (0,0038). Además de que todos sus parámetros fueron estadísticamente significativos, presentó un valor del estadístico DW (1,52), que proporciona información sobre el grado de independencia existente entre los residuos. Requisito que indica que el modelo presenta un buen ajuste. En este análisis no se seleccionó el modelo Logístico porque sobreestimó el parámetro “b”.

Al estudiar el clon CT-27 se evidenció que al igual que su progenitor el modelo de mejor bondad de ajuste fue el Logístico. Sin embargo, no se selecciona porque sobreestimó el parámetro “b” lo que repercutió en el elevado valor de su error estándar. Seguido de este modelo se encuentra el Gompertz que también mostró valores adecuados en los criterios estadísticos, todos sus parámetros

fueron estadísticamente significativos y desde el punto de vista biológico estimó de forma adecuada el comportamiento de los datos de la investigación. Para este clon no se observó problemas de incumplimiento en el supuesto de incorrelación ya que se alcanzaron valores superiores a 1,4.

Chamorro *et al.*, (2011) plantean que una característica de las variedades de *Cenchrus purpureus* es que poseen abundantes hojas, que les permite generar gran cantidad de biomasa, debido a la estrecha relación que existe entre las hojas, área foliar y eficiencia fotosintética. Este rasgo contribuye además a proveer a los animales de los elementos nutritivos necesarios para su crecimiento y desarrollo (Álvarez *et al.*, 2016) con calidad química y nutritiva.

Rodríguez *et al.*, (2013) describieron la dinámica de acumulación de biomasa en *Pennisetum purpureum* vc. king grass en el occidente de Cuba con el empleo de modelos lineales y no lineales. En dicho estudio los autores encontraron que el modelo Gompertz fue el de mejor ajuste para el rendimiento de MS acumulado. Resultado similar fue el obtenido en esta investigación para los clones en estudio.

Teniendo en cuenta la estimación de parámetros en modelos de crecimiento es posible describir o caracterizar el sujeto modelado en el tiempo, así como, estimar el comportamiento de otros indicadores de interés como la tasa de madurez según la edad de rebrote, el rendimiento a la edad en que se alcanza el punto de inflexión y el momento óptimo para la utilización de la planta (Rodríguez, 2015).

La figura 5 y 6 muestran los resultados del modelo ajustado a los datos para la variable rendimiento de materia seca de los clones CT-115 y CT-27. Ambas curvas describieron el crecimiento de los clones a través del modelo Gompertz. Al inicio del crecimiento se observó un comportamiento lineal hasta aproximadamente los 45 días para el CT-115 y para el CT-27 hasta los 30 días. Posteriormente se apreció un incremento en el rendimiento del clon CT-115 hasta los 95 días con una acumulación de biomasa de 0,0611 kg/macolla y

para el CT-27 hasta los 90 días con un rendimiento de 0,1020 kg/macolla. Según Herrera (2006) este comportamiento pudiera estar dado al balance positivo que se produce entre la fotosíntesis y la respiración. Por otra parte, Villanueva-Avalos (2008) refiere que en esta primera fase del crecimiento el rebrote es lento y existe poca área foliar. La cantidad de luz que intercepta la planta es muy baja y como consecuencia lo es también la fotosíntesis (Richards, 1993).

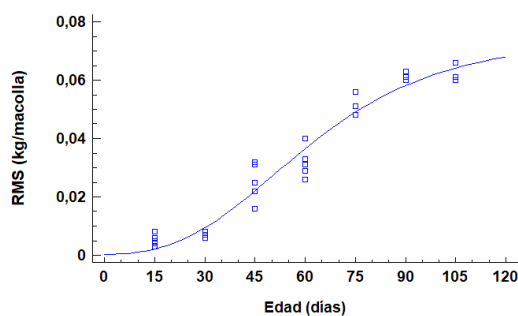


Figura 5. Comportamiento del rendimiento de materia seca en el período poco lluvioso con respecto a la edad del clon CT-115

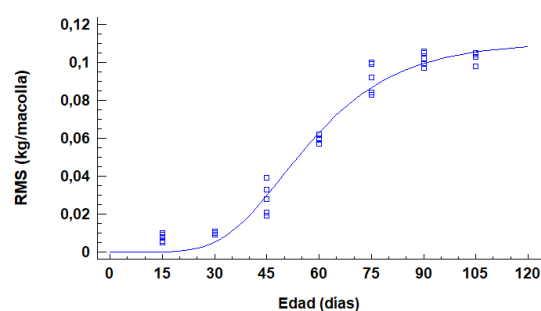


Figura 6. Comportamiento del rendimiento de materia seca en el periodo poco lluvioso con respecto a la edad del clon CT-27

Estudios realizados por Martínez *et al.*, (2010), Rodríguez *et al.*, (2011), Rodríguez *et al.*, (2013a) y Rodríguez (2015) en condiciones edafoclimáticas similares confirman que el modelo de Gompertz fue el que presentó mejor ajuste con respecto al comportamiento del RMS con variedades de la misma especie como el OM-22 y el king grass.

Las figuras 7 y 8 muestran el comportamiento de la velocidad de crecimiento de los clones evaluados. El CT-115 mostró un ligero crecimiento de 15 a 45 días, con tasas estimadas de 0,0003 y 0,0010 kg/macolla/días. Entre los 40 y 50 días aproximadamente se produjo un cambio de concavidad de la función, que indicó la razón de cambio de la velocidad de crecimiento y el punto de inflexión se alcanzó a los 45 días. A partir de este momento, el crecimiento fue menor en el tiempo y sus tasas comenzaron a estabilizarse.

En el caso del CT-27 se observó desde el inicio un rápido incremento en su rendimiento hasta los 47 días de muestreo, momento en que se alcanzó el

punto de inflexión con un RMS de 0,04 kg/macolla y una tasa intrínseca de crecimiento ligeramente superior a la de su progenitor de 0,0024 kg/macolla/día. Los bajos acumulados del rendimiento en este período estacional pudieran relacionarse con las bajas temperaturas, baja humedad del suelo y menor duración del día que caracterizan el período poco lluvioso (Rodríguez *et al.*, 2011).

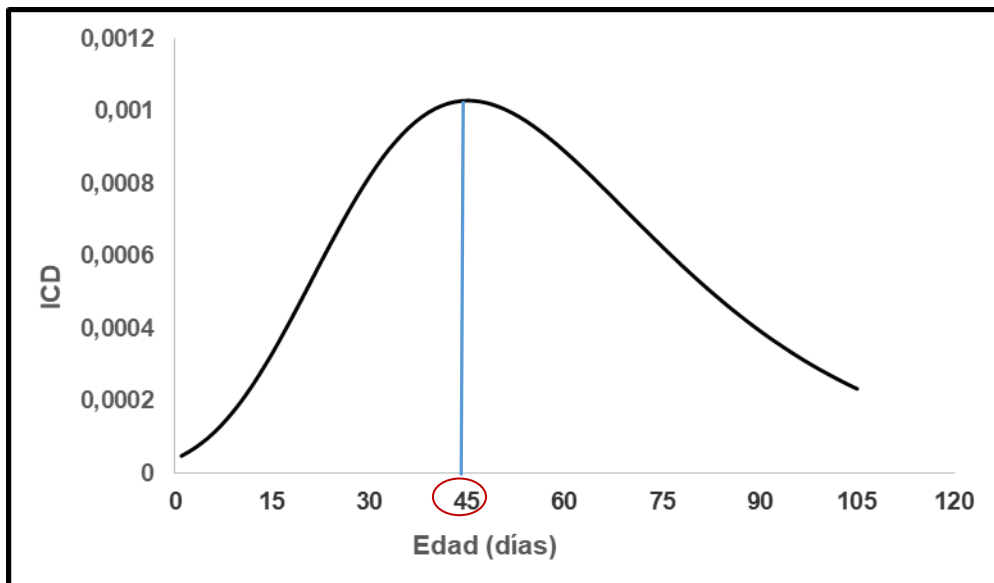


Figura 7. Velocidad de crecimiento del rendimiento de materia seca en el período poco lluvioso del clon CT-115

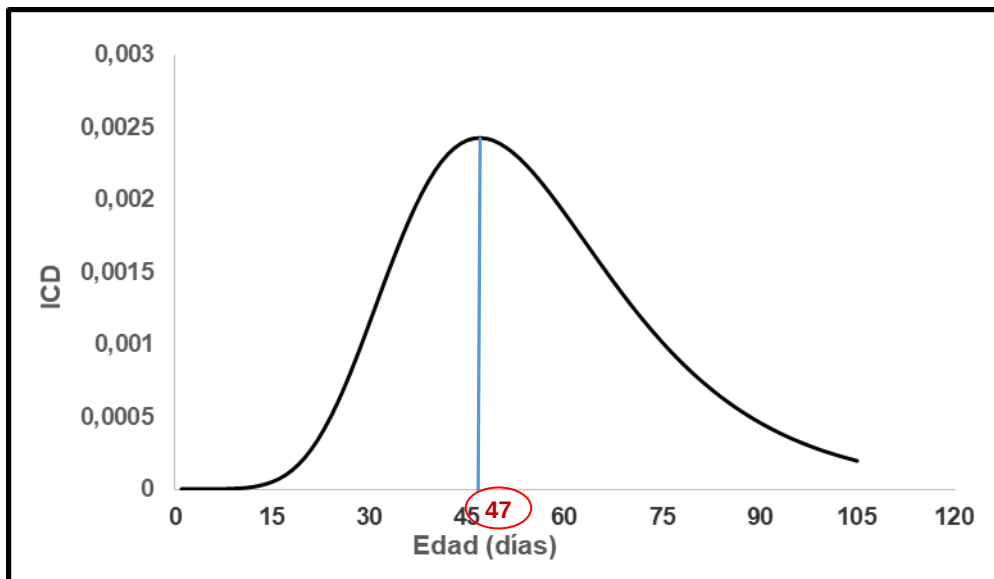


Figura 8. Velocidad de crecimiento del rendimiento de materia seca en el período poco lluvioso del clon CT-27

En sentido general, los resultados obtenidos demostraron la influencia que tiene la edad de la planta con la altura y el rendimiento de materia seca para los clones CT-115 y CT-27 de la especie *Cenchrus purpureus* con el efecto de la época del año. Al comparar el periodo lluvioso el clon CT-27 alcanzó mayor altura a los 90 días con respecto a su progenitor, sin embargo en el rendimiento de materia seca para este mismo período mantuvo los mejores resultados; para poco lluvioso los valores más altos se alcanzaron a partir de los 75 días.

El empleo de los modelos mostró que para la altura de la planta en el período lluvioso el Logístico fue el que presentó los mejores criterios de bondad de ajuste para ambos clones. En el caso del rendimiento de materia seca para el período lluvioso, los modelos lineales describieron el comportamiento de esta variable, resultados que no coinciden por algunos estudios de la literatura científica. Para el periodo poco lluvioso el modelo de Gompertz mostró algunas características de dicho rendimiento, además se pudo conocer el máximo rendimiento de materia seca de esta especie, así como su tasa de incremento en centímetros por días. Estos resultados muestran un conocimiento sobre el comportamiento de esta planta con el efecto de la época del año. El empleo de esta herramienta estadística permitirá adoptar estrategias de manejo, que ayudará a la toma de decisiones de productores e investigadores.

CONCLUSIONES

- ✓ El análisis de los referentes teóricos - metodológicos permitió definir que entre los modelos que mejor describen el crecimiento de *Cenchrus purpureus* se encuentran los lineales y no lineales.
- ✓ El efecto de la época del año incidió en el comportamiento de los clones evaluados, con similar altura en la lluvia, sin embargo, en el rendimiento de materia seca en ambos períodos el clon CT-27 mostró mejores resultados.
- ✓ El modelo Logístico fue el que mejor describió la altura de la planta en el período lluvioso para los clones CT-115 y CT-27.
- ✓ El modelo lineal fue de mejor ajuste para el rendimiento de materia seca en el período lluvioso, y el Gompertz para el poco lluvioso en los clones CT-115 y CT-27.

RECOMENDACIONES

- ✓ Profundizar en el comportamiento de otros componentes morfológicos de clones de *Cenchrus purpureus* bajo diferentes condiciones con el fin de validar los modelos propuestos.
- ✓ Utilizar otras combinaciones con el efecto del muestreo, variables climáticas y de fertilización para la estimación de la altura de la planta y el rendimiento de materia seca.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aduriz, B. A. 2012. A "Semantic" View of Scientific Models for Science. Science & Education
- Álvarez, G. R., García, A. R., Cabezas, R. R., Samaniego, M. C., Jacho, T. E. & Rivera, C. M. 2016. Asociación del pasto *Cenchrus purpureum* vc. Morado con dos leguminosas a diferentes edades de corte. Rev. REDVET; 17(6):1-9.
- Anhalt, C., Staats, S., Cortez, R., y Civil, M. (2018). Mathematical modeling and culturally relevant pedagogy. In Y. J. Dori, In Cognition, metacognition, and culture in STEM education (pp. 307-330). Cham: Switzerland: Springer.
- Anon. 1989. Atlas Nacional de Cuba. (ed.). Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba e Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía. Impreso por el Instituto Geográfico Nacional de España.
- Anon., 1995. Software estadístico Statgraphics Plus. versión 5.1 sobre Windows.
- Arias, R.C., J.L. Ledea, D.G. Benítez, J.V. Ray, and J.L. Ramírez de la Rivera. 2018. Performance of new varieties of *Cenchrus purpureus*, tolerant to drought, during dry period. Cuban. J. Agric. Sci. 52(2):1-12.
- Arias, R.C., Reyes, J.J., Ledea, J.L., Benítez, D.G., Ray, J. V and Hernández, L.G., 2019. Respuesta agroporproductiva de nuevas variedades de *Cenchrus purpureus*. Tropical and subtropical Agroecosystems, 22, pp.79-86.
- Argentel, L., Fonseca, I., González, L. M. y López, A. R. (2013). Efectos de la salinidad en las variables hídricas potenciales hídrico y osmótico y ajuste osmótico en cultivares cubanos de trigo (*Triticum aestivum* L. y *T. durum* L.). Revista de Cultivos Tropicales, 34 (4), 43-48.
- Argentel, L., Garantúza, J., Yépez, A. E., Santos, V. S. (2016). Evaluación de la tolerancia de variedades mexicanas de trigo a la salinidad, a través de indicadores fisiológicos, bio-químicos y agronómicos, cultivados en Cuba en condiciones de campo. Rev. Cultivos Trop., 37 (1), 91-101.
- Augusto, T., (2009). *Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de Pinus taeda L. en el sur de Brasil*. Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 6 (16), p. 16-20.

- Bassanezi, R. (2002). Ensino-aprendizagem com modelagem matemática. São Paulo, Brasil: Contexto.
- Buxton, D.R. y Fales, S.L. 1994. Plant environment and quality. En: Forage quality, evaluation and utilization. Fahey, G.C. (Ed.) Madison: American Society of Agronomy. p.155.
- Bernal J., Espinoza, J 2003. Manual de nutrición y fertilización de pastos. Potash and Phosphate Institute of Canada. 94 p.
- Beltrán, L. S., Hernández, G. A., García, M. E., Pérez, P. J., Kohashi, S. J., Herrera, H. J. G., 2005. Efecto de la altura y frecuencia de corte en el crecimiento y rendimiento del pasto Buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) en un invernadero. Rev. Agrociencia, 39 (2), pp: 137-147.
- Cabrera, E.J., Sosa, E.E. Castellanos, A.F., Gutiérrez, A.O. y Ramírez, J.H. 2009. Comparación de la concentración mineral en forrajes y suelos de zonas ganaderas del estado de Quintana Roo, México. Vet. Méx., 40: 167.
- Camarena, G. P (2008). Reporte de investigación titulado: La matemática en el contexto de las ciencias: las competencias profesionales. ESIME-IPN, México.
- Casas, G.A., Rodríguez, D. y Afanador, G., 2010. Mathematical properties of the Gompertz model and its application to the growing pig. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 23, pp. 349-358.
- Castro, I y Hétier J.M. 2015. Modelización y experimentación agronómica Tierras llaneras de Venezuela: tierras de buena esperanza. [libro] Mérida: Consejo de Publicaciones de la Universidad de los Andes, [En Línea] En <<https://numerisud.ird.fr/documents-et-films/publications/Modelizacion-y-experimentacion-agronomica>>[recuperado 15 de marzo de 2018].
- Chacín, F. (1998). *Análisis de regresión y superficie de respuesta*. Cásares. R. Segovia, A. Gaskin. D. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Pp.111.
- Chamorro, D., Parra, M. H., Ramírez, M., Herrera, C., Velazco, D, & Moreno, J. 2011. Evaluación morfofisiológica y producción de biomasa de materiales de *P. purpureum* como componente herbáceo de sistemas silvopastoriles. Resultados proyecto “Evaluaciones, selección e incorporación de nuevos

materiales de especies forrajeras en sistemas de producciones ganaderas en el trópico bajo colombiano". ACCI, y Ministerio de la Agricultura, COL.

- Crespo, G. 2011. Comportamiento de la materia orgánica del suelo en pastizales. . Rev. Cuban. Cienc. Agríc. 45 (4): 343
- Cruz, C. 2010. La enseñanza de la modelación matemática en ingeniería. Rev. Fac. Ing. UCV v.25 n.3 Caracas sep .Universidad Central de Venezuela / Universidad Metropolitana.
- Cruz, J.M., Ray, J.V., Ledea, J.L., Arias, R.M. 2017. Establecimiento de nuevas variedades de *Cenchrus purpureus* en un ecosistema frágil del Valle del Cauto, Granma. Rev. Cubana de Prod. Animal. 29(3): 29-35. ISSN 2224-7920.
- Cuevas, R. (2014). *Matemáticas para la toma de decisiones*. Recuperado el 2 de Noviembre de 2017, de <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r76474.pdf>
- Distel, R.A., Moretto, A.S. y Didoné, N.G. 2007. Regrowth capacity in relation to defence strategy in *Stipa clarazii* and *Stipa trichotoma*, native to semiarid Argentina. Austral Ecology. 32: 651.
- Del Pozo, P.P. 2004. Bases ecofisiológicas para el manejo de los pastos tropicales. Producción Bovina de Carne. Disponible en: <[http://www.produccionanimal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/00 pastoreo%20sistemas.htm](http://www.produccionanimal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pastoreo%20sistemas/00%20pastoreo%20sistemas.htm)>. Consultado: 22 febrero 2011.
- Del Pozo, P. P. y Herrera, R. S. (1995). Modelado del crecimiento del pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*). Modelo multiplicativo con control de la curva de crecimiento y los efectos ambientales. Revista de Pastos y Forrajes 18(2):171-177.
- Del Pozo, P.P. 1998. Análisis del crecimiento del pasto estrella (*C. nlemfuensis*) bajo condiciones de corte y pastoreo. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias agrícolas. La Habana, Cuba.
- Díaz, D. (2007). *Evaluación agronómica de nuevas variedades Pennisetum purpureum en condiciones de sequía el Valle del Cauto*. Tesis en opción al Título Académico de Máster en Pastos y Forrajes. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos", 84 p.

- Di Rienzo, J.A., Balzarini, M., Casanoves, F., González, L., Tablada, M., Guzmán, W. y Robledo, C.W., 2012. InfoStat, versión 2012. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- Domínguez, J., Rodríguez, F.A., Núñez, R., Ramírez, R., Ortega, J.A. y Ruiz, A., (2013). Adjustment of nonlinear models and estimation of growth parameters in tropicane cattle. *Agrociencias*, 47(1), p. 25-34.
- Faustino, M. G. 2007. Modelagem de algumas características qualitativas de capins do gênero *Panicum* em função de variáveis climáticas. Tesis en opción al grado de Máster en Agronomía. ESALQ, Piracicaba, 75 p.
- Febles, G.J. y Herrera, R.S. 2006. Introducción y características botánicas. En: *Pennisetum purpureum* para la ganadería tropical. R. S. Herrera, G. J. Febles y G. J. Crespo (Eds.). EDICA, Instituto de Ciencia Animal, Cuba. p. 2.
- Ferrando, I., Albarracín, Ll., Gallart, C., García, Ll., Gorgorió, N., 2017. Analisis de modelos matemáticos producidos durante la resolución de problemas de Fermi. *Bolema: Boletim de Educação Matemática*. 31(57), pp 220-242.
- Fortes, D. (2012). *Comportamiento morfofisiológico de Pennisetum purpureum vc. Cuba CT-115 utilizado como banco de biomasa*. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. 102 p.
- Fortes, D., Herrera, R., García, M., Cruz, M., Romero, A. 2015. *Pennisetum purpureum vc. Cuba CT-115 utilizado como banco de biomasa. Indicadores morfofisiológicos*. Cuban Journal of Agricultural Science 49(4): 521-527. ISSN: 2079-3480
- García, C., Martínez, R., Tuero, R., Cruz, A., Romero, A., Estanquero, L. (2009). Evaluación de *Pennisetum purpureum* y modelación de indicadores agronómicos durante tres años en un suelo ferralítico rojo típico de la provincia La Habana. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 43(2), 297-302.
- García, C. (1996). Estabilidad de algunos criterios de selección de modelos. Recuperado el 15 de Enero de 2018, de <http://dialnet.unirioja.es/>
- García, C.R., Martínez, R.O., Tuero, R., Cruz, A.M., Romero, A., Estanquero, L. & Noda, A., 2007. Caracterización de la dinámica de crecimiento y calidad del *Panicum maximum* vc. Mombaza en un suelo ferralítico de provincia La Habana. II Congreso de Producción Animal Tropical. Eds. M.F. Díaz, R.S. Herrera, T. Ruíz. Cuba. p. 231

- Garcia, L. M.; Mesa, A. M. y Hernández, M. 2018. Potencial forrajero de cuatro cultivares de *Pennisetum purpureum* en un suelo pardo de las tunas. Pastos y Forrajes . 37(4):413-419. [Links]
- Gilbert, J., y Justi, R. (2016). Modellingbased teaching in science education (Vol. 9). Switzerland: Springer international publishing Switzerland.
- Giordano, F., Weir, M.; Fox, W. A first Course in Mathematical Modelling. Brooks/Cole Publishing Company. 1997.
- Grant, M. (2012). Modeling In Math Learning. In L. Perlovsky, Mathematical Models/Theories of Learning. In: Seel N.M. (eds) (pp. 2113- 2115). Boston: Encyclopedia of the Sciences of Learning. Springer.
- Grajales, R., Alonso, J., Ocampo, E. M., Hernández, B., Jimenes, Y. J., Aguilar, J. O., Pérez, L. I., Aguilar, E., Tuero, R., 2018. Evaluación de cultivares de *Cenchrus purpureus* para la producción de forraje. Investigación ganadera para el desarrollo rural. 30(2).
- Guerra, C.W., Cabrera, A. y Fernández, L., 2003. Criterios para la selección de modelos estadísticos en la investigación científica. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 37(3), pp. 3-10.
- Gutiérrez, H. F. 2015. Las especies americanas del género *cenchrus* S.L. (Poaceae, Panicoideae, Paniceae). Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral, 86-Kreder 2805, 3080HOF Esperanza, Santa Fe, Argentina; hgutierrez@fca.unl.edu.ar
- Herrera, R.S. 2005. Mejoramiento de *Pennisetum purpureum* en Cuba. Memorias I Congreso Internacional de Producción Animal. II Fórum Latinoamericano de Pastos y Forrajes. Ciudad de La Habana. Cuba.
- Herrera, R.S. & Ramos, N. 2006. Factores que influyen en la producción de biomasa y la calidad. En: *Pennisetum purpureum* para la ganadería tropical. R. S. Herrera, G. J. Febles y G. J. Crespo (Eds.). EDICA, Instituto de Ciencia Animal, Cuba. p. 79.
- Herrera, R.S. 2006. Crecimiento y desarrollo. En: Fisiología, producción de biomasa y sistema silvopastoriles en pastos tropicales. Abono orgánico y

biogás. 1ra Ed. Herrera, R.S., Rodríguez, Idalmis D., Febles, G.J. Ed. EDICA, La Habana, Cuba, p. 53.

Herrera, R. S., 2006b. Fisiología, calidad y muestreos. En: Fisiología, producción de biomasa y sistemas silvopastoriles en pastos tropicales. Abono orgánico y biogás. R.S. Herrera, I.Rodríguez y G. Febles (Eds.). EDICA, La Habana con la colaboración de la Universidad de Santa Catarina, Brasil. p. 361.

Herrera, R.S. 2009. Mejoramiento del *Pennisetum purpureum* en Cuba. Rev. Cub. Cienc. Agríc. 43:345-349.

Herrera, R.S. 2009. Mejoramiento de *Pennisetum purpureum* en Cuba. I Taller de tecnologías Ganaderas Sostenibles para Ambientes Adversos y Degradados. Instituto de Investigaciones Agropecuarias Jorge Dimitrov, Granma, Cuba. [Links]

Herrera, R.S. 2022. Evaluación de variedades de *Cenchrus purpureus* olerantes a la sequía en la región occidental de Cuba. Cuban Journal of Agricultural Science, Volume 56, Number 2,

Hernández, J., Pérez, J., Bosch, I., Castro, S., 2015. Clasificación de los suelos de Cuba. Ed. Ediciones INCA, Mayabeque, Cuba. ISBN 978-959-7023-77-7. 93p.

Hestenes, D. (1987). Toward a modeling theory of physics instruction. American journal of physics, 55(5), 440-454.

Hestenes, D. (2010). Modeling theory for math and science education. In R. Lesh, P. Galbraith, C. Haines, & A. Hurford, Modeling students' mathematical modeling competencies (pp. 13- 41). Boston: Springer Science+ Business Media.

HINOJOSA, L. A.; YÉPEZ, N. D.; RODAL, C. F.; RÍOS, A.; CLAROS, B. R.; SUÁREZ, N. T. *et al.* (2014). Producción y características agronómicas de cuatro variedades de pasto de corte del genero *Pennisetum*, en Trinidad, Bolivia. *Rev. Cient. Agro. Amaz.*, 20 (3), 28-35. Recuperado el 20 de febrero de 2014, de http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2307-96062014000100004&lng=es&nrm=iso.

- Hooker, C. (1994). *Value and system: notes toward the definition of agri-culture*. Journal of Agriculture and Environmental Ethics, 7, 1-84.
- Jay, O. (2012). *Metodología para la comparación de tratamientos en modelos de regresión no lineal aplicados a procesos biológicos*. Tesis presentada en opción al título de Doctor en Ciencias Veterinarias. Instituto de Ciencia Animal.
- Jones, J. W; Hoogenboom, G; Porter, C. H; Boote, K. J; Batchelor, W D; Hunt, L. A; Wilkens, P W; Singh, U; Gusman, A. J. & Ritchie, J. T. 2003. The DSSAT Cropping System Model. Eur. J. Agron, 18. p.235.
- Jones, W., Makowsky, D., y Wallach, D. (2006). *Working with Dynamic Crop Models: evaluation, analysis, parameterization and applications*. Amsterdam, Holanda: Elsevier
- Kiviste, A., Álvarez, J.G., Rojo, A. y Ruíz, A.D., 2002. *Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal*. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Monografías INIA: Forestal No.4. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Madrid. 190 p.
- Ledeza-Rodríguez, J. L., La O-León, O. & González-García, H. 2017. "Tasa de pasaje ruminal de la materia seca y orgánica de variedades de *Cenchrus purpureus*". Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ. XIV: 39-47, ISSN: 2007-042X.
- Lehrer, R.; Schauble, L. A developmental approach for supporting the epistemology of modelling. IN W. BLUM, P. L. GALBRAITH, H.-W. HENN; M. NISS (Org.), *Modelling and applications in mathematics education: The 14th ICMI study* (New ICMI Study Series, Vol 10. New York: Springer, 2007. p. 153-159.
- León V, C., y Barrera, V. 2003. *Métodos biomatemáticos para el análisis de sistemas agropecuarios en el Ecuador*. Quito, Ecuador: INIAP y CIP.
- Lesh, R., & Doerr, H. (2003). *Beyond constructivism: Models and modeling perspectives on mathematics problem solving, learning, and teaching*. Lawrence Erlbaum Associates Publishers
- López, J.L. (2016). *Modelación y simulación del rendimiento del pasto estrella (C. nlemfuensis) bajo diferentes condiciones de manejo y escenarios climáticos*. Tesis presentada en opción al título de Máster en Biomatemática, Universidad Agraria de La Habana.

- Lemaire, G. 2001. Ecophysiology of grasslands: dynamics aspects of forage plant population in grazed swards. Proc. XIX International Grassland Congress. São Paulo, Brasil. p. 29.
- Leonard, I., Uvidia, H., Andino, M. and Ramírez, J.L., 2014. The growth curve of the *Pennisetum purpureum* vs King grass in the Amazonía Ecuatoriana. Revista Electrónica de Veterinaria, 15(7), pp.1-10. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20143309753>
- Martínez, R. O., Tuero, R., Torres, Verena y Herrera. R. S. (2010). *Modelos de acumulación de biomasa y calidad en las variedades de hierba elefante, Cuba CT-169, OM-22 y king grass durante la estación lluviosa en el occidente de Cuba*. Revista Cubana de Ciencias Agrícolas. 44: 189.
- Martínez, J.D.; Vázquez, C.; Salazar, E.; Zúñiga, T. y Trejo, H. (2010). Sistemas de labranza y fertilización en la producción de maíz forrajero. Phytom, Buenos Aires. 79(1): 47-54. On line: ISSN 1851-5657
- Martínez, R.O., R.S. Herrera., R. Cruz, y V. Torres. 1996. Cultivo de tejidos y fitotecnia de las mutaciones en pastos tropicales. *Pennisetum purpureum*: otro ejemplo para la obtención de nuevos clones. Rev. Cub. Cienc. Agríc. 31(1):1-10
- Mejías, A. 2018. Modelación matemática para describir el crecimiento y producción de biomasa de la especie *Pennisetum purpureum*. Ciencia Universitaria. Vol 16 No1.
- Mejías, A. 2019. Modelación de la dinámica de crecimiento de clones de la especie *Cenchrus purpureus* en la época lluviosa. Tesis en opción al título de Master en Biomatemática. Universidad Agraria de La Habana. Cuba
- Mejías, A., Herrera, M., Fernández, L., Medina, Y., Fortes, D., 2022. Aplicación de la modelación estadístico-matemático para describir el crecimiento de clones de *Cenchrus purpureus*. Ingeniería Agrícola, ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761, Vol. 12, No. 3 (julio-agosto-septiembre pp. 53-57)
- MEN (Ministerio de Educación Nacional). *Estándares básicos de competencias*. Bogotá:Magisterio, 2006.
- Morais, R. F.; Quesada, D. M.; Reis, V. M.; Urquiaga, S.; Alves, B. J. R. and Boddey, R. M. 2012. Contribution of biological nitrogen fixation to elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.). Plant Soil. 356:23-34. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0944-2>. [Links]

- Mota, V.J.G., Reis, S.T., Sales, E.C., Rocha Júnior, V.R., Oliveira, F.G., Walker, S.F., Martins, C.E. & Cóser, A.C. 2010. Lâminas de irrigação e doses de nitrogênio em pastagem de capimelefante no período seco do ano no norte de Minas Gerais. *Rev. Bras. Zootec.* 39: 1191.
- Muthuri, C. (2009). Mathematical Models. In K. C. Muir-Leresche, Graduate Environmental and Agricultural Research (GEAR): A Guide to Effective and Relevant Graduate Research in Africa (Second ed., pp. 231-341). Africa: ReserarchGate. doi:10.13140/2.1.2005.0569
- Murillo, L., Chacon, E., De la Rivera, J., Álvarez, G., Álvarez, P., Plúa, K., (2015). Rendimiento y calidad de las especies del género *Pennisetum* en Ecuador. *REDVET*, 16 (8), pp: 1-10.
- Navarro, P., Zúñiga L.; J.A.; Govaerts B.; Luna, G., M. y Dendooven L. 2019. The effect of different tillage and residue management practices on soil characteristics, inorganic N dynamics and emissions of N₂O, CO₂ and CH₄ in the central highlands of Mexico: a laboratory study. *Plant and Soil* 314: 231-241.
- Nave, A. 2007. Evaluación de dos cultivares de *Pennisetum purpureum* tolerantes a la sequía en la región de Cauto Cristo, Granma, Cuba. *Rev. Ciencia y Tecnología Ganadera*, 9(1):23-29. ISSN: 1998-3050
- Olivera, C. Y., y Castañeda, P., Caridad, O., Pérez, L., 2017. Morphobotanical characterization of *Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone plants from a national collection. *Pastos y Forrajes*. 40(3), pp.184-187.
- Padilla, C. y Ayala, J.R. 2006. Plantación y establecimiento. En: *Pennisetum purpureum* para la ganadería tropical. R. S. Herrera, G. J. Febles y G. J. Crespo (Eds.). EDICA, Instituto de Ciencia Animal, Cuba. p. 39.
- Parra, W. 2008. Evaluación de clones de *Pennisetum* para la producción de biomasa. Tesis de Diploma. Instituto de Ciencia Animal. La Habana, Cuba.
- Parsons, A.J., Johnson, I. R. & Harvey, A., 1988. Use of a model to optimize the interaction between frequency and severity of intermittent defoliation and to provide a fundamental comparison of the continuous and intermittent defoliation of grass. *Grass and Forage Science*, 43(1), pp.49-59.

Pérez, F. & Martínez, J.B. 1994. Introducción a la Fisiología Vegetal. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 217 p.

Pérez, A.J.A., García, M.E., Enríquez, Q.J.F., Quero, C.A.R., Pérez, P.J. y Hernández, G.A., 2004. A growth analysis, specific leaf area and leaf nitrogen concentration in "mulato" grass (*Brachiaria híbrido cv.*). *Rev. Téc. Pec. México*, 42(3), pp. 447- 458.

Pongtongkam, P., Peyachoknagul, S., Arananant, J., Thongpan, A. and Tudsri, S., 2006. Production of salt tolerance dwarf Napier grass *Pennisetum purpureum* cv. Mott) using tissue culture and gamma irradiation. *Kasetsart Journal - Natural Science*, 40(3), pp.625–633.

Ramos, A; Sánchez, P; Ferrer, J. M; Barquin, J; Linares P. 2010. MODELOS MATEMÁTICOS DE OPTIMIZACIÓN. [http://www.doi.icae.upcomillas.es/intro_simio.htm].

Ramos, E. 2021. Análisis de modelos matemáticos aplicables al comportamiento de biopolímeros con énfasis en quitosano durante el proceso de coagulación/floculación de sólidos suspendidos en agua. Trabajo de titulación modalidad revisión bibliográfica previo a la obtención del Título de Químico. Universidad Central Del Ecuador. Facultad De Ciencias Químicas, Quito.

Ramos, T. O.; Canul, J. R. y Duarte, F. J. 2013. Producción de tres variedades de *Pennisetum purpureum* fertilizadas con dos diferentes fuentes nitrogenadas en Yucatán, México. *Rev. Bio Cienc.* 2(2):60-68. [Links]

Ray, J., R.S. Herrera, D. Benítez, D. Díaz, and R. Arias. 2016. Multivariate analysis of the agronomic performance and forage quality of new clones of *Pennisetum purpureum* drought tolerant in Valle del Cauto, Cuba. *Cuban J. Agric. Sci.* 50:639-648.

Rahman, M. M.; Syafieqa, N. E.; Mohd, N. A. B.; Gondo, T.; Khalif, R. I. and Akashi, R. 2019. Growth characteristics, biomass yield and mineral concentrations in seven varieties of napier grass (*Cenchrus purpureus*) at establishment in kelantan, malaysia. *Tropical Grasslands.* 7(5):538-543. [https://doi.org/10.17138/TGFT\(7\)538-543](https://doi.org/10.17138/TGFT(7)538-543). [Links]

- Richards, J.H. 1993. Physiology of plant recovering from defoliation. Proc. XVII International Grasslands Congress. Palmerston North, New Zealand. p. 95.
- Rodríguez, L., Torres, V., Martínez, O., Herrera, M., Noda, A. & Jay, O. 2007. Modelación matemática de la dinámica de producción del pasto *Pennisetum purpureum* Cuba CT-115 en época de lluvia. II Congreso de Producción Animal Tropical. I Taller de Informática y Bioestadística Aplicada a las Ciencias Agropecuarias. Eds. M.F. Díaz, R.S. Herrera, T. Ruíz. 368 p.
- Rodríguez, J., Gutiérrez, E., y Rodríguez, H. (2010). *Dinámica de sistemas de pastoreo*. México: Editorial Trillas.
- Rodríguez L., V. Torres, R. O. Martínez, O. Jay, A. C. Noda y M. Herrera (2011) Models to estimate the growth dynamics of *Pennisetum purpureum* cv. Cuba CT-169. Cuban Journal of Agricultural Science 45:349-354.
- Rodríguez, L. (2015). *Modelación y simulación de la producción de biomasa de Pennisetum Purpureum Schum vc. king grass y su aplicación en la alimentación animal*. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Veterinarias, Instituto de Ciencia Animal.
- Rodríguez, L., Torres, V., Martínez, R.O., Jay, O., Noda, C. y Herrera, M. (2011). *Modelos para estimar la dinámica de crecimiento de (Pennisetum purpureum) vc. Cuba CT-169*. Revista Cubana de Ciencias Agrícolas. 45:349.
- Rodríguez, L. Larduet, R., Martínez, R.O., Torres, V., Herrera, M., Medina, Y. y Noda, C. (2013). *Modelación de la dinámica de acumulación de biomasa en Pennisetum purpureum cv. King grass en el occidente de Cuba*. Revista Cubana de Ciencias Agrícolas. 47:119
- Rueda, J. A.; Ortega, J. E.; Hernández, A.; Enríquez, J. F.; Guerrero, J. D. y Quero, A. R. 2016. Growth, yield, fiber content and lodging resistance in eight varieties of *Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone intended as energy crop. Biomass and Bioenergy. 88:59-65. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.03.007>. [Links]
- Rueda B.J.A. 2015. Evaluación agronómica de ocho variedades de *Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone con potencial para producción de bioetanol o forraje. Tesis Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados.

- Rusinowski. M, T., Cabreira- Jobim, C., Schmidt, P. and Nussio, L.G., 2019. Production and utilization of silages in tropical areas with focus on Brazil. *Grass and Forage Science*, 74(2), pp.188–200.
- Shapiro, S. & Wilk, B., 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(2), pp. 591-611.
- Singh, P. B.; Singh, P. H. and Obeng, E. 2013. Elephantgrass. In: biofuel crops. Singh, P. (Ed.). Production, physiology and genetics. 271-291 pp. <https://doi.org/10.1079/9781845938857.0271>. [Links]
- Sosa R.E.E., Cabrera T.E., Pérez R.D., Ortega R.L. 2008. Producción estacional de materia seca de gramíneas y leguminosas forrajeras con cortes en el estado de Quintana Roo. *Técnica Pecuaria México* 46(4):413-426.
- Taiz, L. & Zeiger, E. 2010. *Plant Physiology*. Fifth Edition, Sinauer Associates, Inc. 623 p.
- Thornley, J. y France, J. (2007). *Mathematical Models in Agriculture. Quantitative Methods for the Plant. Animal and Ecological sciences*. (Second Edition ed.). Trowbridge: Cromwell Press.
- Torres, V. 1995. Contribución a la modelación de un área de pastoreo. Seminario Científico Internacional XXX Aniversario del Instituto de Ciencia Animal, Instituto de Ciencia Animal, La Habana, Cuba.
- Torres, V., Cobo, R., 2015. La Matemática Aplicada en las investigaciones del Instituto de Ciencia Animal, cincuenta años de experiencia. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 49(2), pp 117-125.
- Torres, V., Lazo, J., Ruiz, T.E. & Noda, A. 1999. Empleo de la modelación matemática en el estudio del pasto *C. nlemfuensis*. *Rev. Cubana de Cienc. Agríc.* 33:363.
- Torres, V., y Ortiz, J. 2005. Aplicaciones de la modelación y simulación en la producción y alimentación de animales de granja. *Revista Cubana Cienc. Agríc.*, 39:397p.
- Torres, V., Sampaio, I., Meyer, R., Noda, A., y Sarduy, L., 2012. Criterios de bondad de ajuste en la selección de modelos no lineales en la descripción de comportamientos biológicos. *Rev. Cubana Cienc. Agríc.*, 46(4), pp. 345-350.

- Uyanto, S.S., 2020. Power comparisons of five most commonly used autocorrelation tests. Pakistan. *Journal of Statistics and Operation Research*. pp. 119-130.
- Valle, C.B., Euclides, V.P.B., Macedo, M.C.M., 2001. *Selecting new Brachiaria for Brazilian pasture*. En: International Grassland Congress, 19, São Pedro. Piracicaba, FEALQ (CDRom).
- Vázquez, Y., 2012. Modelación Estadístico-Matemática con variables mixtas para el estudio de la sostenibilidad social en una empresa ganadera bovina. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias veterinarias, Universidad Agraria de la Habana, San José de las Lajas, Cuba. 99 p.
- Velasco Z.M.E., Hernández A.G., Perezgrovas G.R., A., Sánchez M.B. 2006. Producción y Manejo de los Recursos Forrajeros Tropicales. Universidad Autónoma de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez Chis., México. pp: 75-97.
- Ventra Ríos., Duncan, D.B. 2022. "Multiple Range and Multiple F Tests". *Biometrics*, 11(1): 1-42, ISSN: 0006-341X. <https://doi.org/10.2307/3001478>.
- Vílchez, J., Martínez, L., Albany, N., 2015. Comparación del crecimiento en vivero entre plántulas y vitroplantas de guayabo cultivar enana roja cubana Eea-1840. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de America*. 40(4), pp 270-274.
- Vinay-Vadillo JC, Herrera-Sotero MY, Juárez-Jiménez A, Montero-Lagunes M, Villegas-Aparicio Y, Enríquez-Quiroz JF, Bolaños-Aguilar ED, Mendoza-Pedroza SI (2021) Crecimiento y macronutrientes en *Cenchrus purpureus* cv. Taiwán con y sin fertilización en Veracruz. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* Núm. Esp. II: e2942. DOI: 10.19136/era.a8nII.2942za-Pedroza
- Vitor, C.M., Fonseca, D.M., Cóser, A.C., Martins, C.E., do Nascimento, J .D. y Ribeiro, J.I. 2009. Produção de matéria seca e valor nutritivo de pastagem de capim-elefante sob irrigação e adubação nitrogenada. *R. Bras. Zootec.*, 38: 435.
- Villanueva-Avalos, J.F. 2008. Effect of defoliation patterns and developmental morphology on forage productivity and carbohydrate reserves in WW-B. Dahl grass [*Bothriochloa bladhii* (Retz) S.T. Blake]. Tesis en opción al grado de Doctor en Agronomía. Texas Tech University, USA. 311 p