



**SIMULACION ESTOCASTICA PARA PRADERAS DE PASTO BUFFEL
(*Cenchrus ciliaris* L.) EN MARIN, N. L., MEXICO**

**[STOCHASTIC SIMULATION FOR BUFFELGRASS (*Cenchrus ciliaris* L.)
PASTURES IN MARIN, N. L., MEXICO]**

**José Romualdo Martínez-López^{1*}, Erasmo Gutiérrez-Ornelas²,
Miguel Ángel Barrera-Silva² and Rafael Retes-López²**

¹ *Departamento de Agricultura y Ganadería-Universidad de Sonora. Carretera a Bahía de Kino Km. 21, Hermosillo, Sonora. México.*

Email: romualdo.martinez@guayacan.uson.mx

² *Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Campus de Ciencias Agropecuarias – UANL, Calle Francisco Villa S/N, Ex Hacienda El Canadá, Escobedo, Nuevo León.*

** Corresponding author*

SUMMARY

A stochastic simulation model was constructed to determine the response of net primary production of buffelgrass (*Cenchrus ciliaris* L.) and its dry matter intake by cattle, in Marín, NL, México. Buffelgrass is very important for extensive livestock industry in arid and semiarid areas of northeastern Mexico. To evaluate the behavior of the model by comparing the model results with those reported in the literature was the objective in this experiment. Model simulates the monthly production of dry matter of green grass, as well as its conversion to senescence and dry grass and eventually to mulch, depending on precipitation and temperature. Model also simulates consumption of green and dry grass for cattle. The stocking rate used in the model simulation was 2 hectares per animal unit. Annual production ranged from 4.5 to 10.2 t of dry matter per hectare with annual rainfall of 300 to 704 mm, respectively. Total annual intake required per animal unit was estimated at 3.6 ton. Simulated net primary production coincides with reports in the literature, so the model was evaluated successfully.

Key words: System analysis; simulation; aboveground net primary production; voluntary intake.

RESUMEN

Se construyó un modelo de simulación estocástico para conocer la respuesta de la producción primaria neta y el consumo voluntario de materia seca del pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) por ganado bovino, para el área de Marín, N.L., México. El pasto buffel, constituye la clave para la ganadería del noreste de México. El objetivo del presente experimento fue evaluar el comportamiento del modelo, comparando los resultados del modelo con los reportados en la literatura. Este modelo simula la producción mensual de materia seca del pasto verde, su senescencia y conversión a pasto seco y, finalmente, su incorporación a mantillo, en función de la precipitación y temperatura; además incluye el consumo de pasto verde y seco por el ganado. La carga animal utilizada en la simulación fue de 2 hectáreas por unidad animal. La producción anual varió de 4.5 a 10.2 ton MS ha⁻¹ con precipitaciones anuales de 300 a 704 mm, respectivamente. El consumo total anual de materia seca requerido por unidad animal se estimó en 3.6 ton. La Producción Primaria Neta simulada coincide con reportes disponibles en la literatura, por lo que el modelo se evaluó satisfactoriamente.

Palabras clave: Análisis de Sistemas; simulación; producción primaria neta; consumo voluntario.

INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento poblacional y el incremento en la demanda por alimento son tópicos de gran importancia a nivel mundial, por lo que para satisfacer la demanda de carne bovina se ha tenido que multiplicar la cantidad de ganado que se alimenta de los pastizales (Ridder *et al.* 1986) deteriorando el

ecosistema prístino de los antiguos pastizales de las zonas áridas y semiáridas de Norteamérica, cambiándolos de pastizales abiertos a matorrales, con diferentes grados de densidad (Levy, 1994).

Desde el siglo pasado, los científicos han abordado una amplia variedad de temas relacionados al manejo de los pastizales en su afán por mejorar las

condiciones actuales de los pastizales (Runge y Schuster, 1985; Cox, *et al.* 1988; Cox, 1991; Hanselka y Johnson, 1991). Desafortunadamente, el tiempo y la gran variedad de tópicos, aunado a los altos costos de investigación, han propiciado que la mayoría de estas investigaciones se realicen de una forma aislada, con poca atención hacia una síntesis interpretativa de esta información. La temática diversa en manejo de pastizales, que incluye varias disciplinas, y la dificultad asociada con la identificación de un esquema organizativo, han contribuido a la ausencia de un marco conceptual unificado para su estudio (Briske y Heitschmidt, 1991). Por lo tanto, estudiar los pastizales en forma integral, implica hacer investigación de un sistema inherentemente complejo (Haefner, 1996; Grant *et al.* 1997) que necesita resolver problemas desde un enfoque de análisis de sistemas.

El pasto buffel común o T-4464 fue colectado en el desierto de Turkana, situado en el norte de Kenya e introducido a los Estados Unidos de América en 1946 (Holt, 1985). Hoy en día se encuentran 680,000 ha de praderas de pasto buffel sembradas en el sur de Texas y 1'230,000 ha en México, de las cuales, 820,000 se encuentran en los estados de Tamaulipas y Nuevo León (Hanselka y Johnson, 1991), convirtiéndose en el componente fundamental de los sistemas de ganadería moderna de ésta región. El pasto buffel es un pasto de fácil establecimiento, altamente productivo, muy apetecible y digestible para el ganado, y además, tolera el pastoreo intensivo y es relativamente resistente a las sequías. Muchos estudios han evaluado la producción de buffel pero ninguno ha intentado evaluar su productividad influenciado por el clima (Martín *et al.* 1995). La precipitación y temperatura tienen el mayor impacto en el crecimiento del buffel, llegando a explicar hasta el 92% de su producción primaria neta en el noreste de México (Gómez de la Fuente *et al.* 2007). El buffel inicia su rebrote cuando la temperatura sobrepasa los 15°C y tenga una acumulación de precipitación mínima de 20 mm mensuales. En Sonora, el buffel produjo 19.8 kg ha⁻¹ mm⁻¹ de precipitación durante el verano (Martín *et al.* 1995).

Por otro lado, los factores que regulan la producción primaria neta y el consumo de materia seca (CMS) por los rumiantes, son complejos y no están totalmente entendidos, por lo que los modelos que predicen el consumo son empíricos por naturaleza y es difícil explicar los numerosos factores fisiológicos (composición corporal, sexo, estado fisiológico, edad, raza, etc.), ambientales (temperatura ambiental, estacionalidad, fotoperíodo, etc.) y de manejo (ganado pastoreando, ganado en corrales de engorda, implantes que promueven el crecimiento, deficiencias alimenticias, etc.) que pueden afectar tanto la

producción primaria neta como el consumo de alimento (Holecheck, *et al.* 1998; NRC, 1996). En forrajes, el NRC (1996) desarrolló ecuaciones que predicen con bastante exactitud los consumos de pasto verde y pasto seco, los que incluyen efectos lineales y cuadráticos de la concentración de energía neta de mantenimiento (EN_m) e incluye el peso metabólico corporal dietado (SBW^{0.75}).

En el presente trabajo se pretende realizar un modelo de simulación que permita mejorar el entendimiento de la producción de las praderas de pasto buffel considerando la influencia de la precipitación y la temperatura; lo que permita diseñar estrategias de manejo que reditúen en un uso más sustentable de estos sistemas productivos. Por lo anteriormente expuesto, en este trabajo se plantea el siguiente objetivo general: Evaluar la congruencia entre el comportamiento del modelo y datos del sistema real; y los siguientes objetivos específicos: Comparar **a)** la precipitación real y la simulada por el modelo, **b)** la producción de biomasa simulada con datos de la literatura sobre producciones de biomasa de pasto buffel en la región, **c)** el comportamiento del consumo voluntario con datos reales reportados en la literatura.

MATERIALES Y MÉTODOS.

El presente trabajo incluye la construcción y evaluación de un modelo para realizar una simulación de una pradera de pasto buffel bajo la influencia de la precipitación y la temperatura mensual, con una carga animal bovina de 2 hectáreas por Unidad Animal (ha UA⁻¹), utilizando para ello el software STELLA RESEARCH Ver. 7.0.1 (High Performance Systems, Inc., 2001). El trabajo original y completo fue realizado por Martínez-López (2000).

Aquí se utilizó la metodología de análisis de sistemas y simulación descrita por Grant *et al.* (1997), la cual se resume a grandes rasgos a continuación:

Descripción General del Sistema.

El sistema de interés identifica los límites de los componentes del sistema real que deben incluirse en el modelo de simulación (Grant *et al.* 1997). Al igual que en la investigación tradicional, se consideran únicamente las variables con mayor impacto, para alcanzar los objetivos planteados. Para el pasto buffel común (T-4464), se han identificado tres principales variables que explican su producción anual (82-92%) en el noreste de México: la precipitación pluvial, la temperatura y el suelo (Martín *et al.* 1995; Gómez de la Fuente *et al.* 2007; Cox, *et al.* 1988.). Para el presente trabajo, se consideró una pradera artificial de pasto buffel común (T-4464) de 100 hectáreas en

la región de Marín, N. L., México, ubicado a 25°53' Latitud Norte y 100°03' Longitud Oeste. El suelo de esta región es de textura migajón areno-arcilloso, con 50 % de arena, 23 % de limo, 27 % de arcilla, conductividad eléctrica de 3.5 mS cm⁻¹, pH de 7.2, materia orgánica de 1.5 %. En esta simulación se contempló como parámetros principales del modelo a: la Precipitación (PP) y la Temperatura (TEMP), la Producción de Pasto Verde (PV), Pasto Seco (PS), y su Descomposición (DESCOPM), así como el Consumo del Pasto Verde (CPV), Consumo del Pasto Seco (CPS) y el Consumo de Suplemento (CS) por bovinos con peso máximo en marzo de 550 kg y peso mínimo en julio de 450 kg. La PP y la TEMP se generaron basados en datos mensuales obtenidos de la Estación Meteorológica de la FAUANL durante los años comprendidos de 1978 a 1996. Por otro lado, el algoritmo utilizado para la simulación fue el Método de Euler con intervalo de tiempo mensual.

La producción primaria neta (PPN) de la pradera se simuló basándose en la PP y TEMP de la región y considerando que en los meses de Enero y Febrero no

hay PPN por carecer estos meses de la temperatura promedio mínima requerida para la producción del Buffel, la cual es considerada en 15°C (Cox *et al.* 1988; Patrocipes, 1995), por lo que para satisfacer el consumo de materia seca cuando el consumo de ganado excedió la reserva del pasto en la pradera, se utilizó un suplemento externo. El ganado consumió tanto PV como PS cuando ambos estuvieron disponibles, pero variando las proporciones, según la cantidad de cada tipo de pasto disponible.

Información Específica Disponible del Sistema

La información del sistema se dividió en dos rubros:

1) Información de estados históricos del sistema. Esta información incluye únicamente los registros de TEMP y PP de la Estación Meteorológica de la Facultad de Agronomía de la UANL, ubicada dentro de la misma, en el municipio de Marín, N.L. (Tablas 1 y 2).

Tabla 1. Promedios mensuales de Temperatura de la Estación Meteorológica de la FAUANL, en Marín, N.L.

Temperatura Media						
<u>Año</u>	<u>Ene</u>	<u>Feb</u>	<u>Marzo</u>	<u>Oct</u>	<u>Nov</u>	<u>Dic</u>
96	13.46	17.10	18.10	23.12	18.74	15.98
95	15.30	19.00	20.00	23.75	19.13	15.20
94	13.50	15.50	20.00	25.25	22.50	16.65
93	15.30	17.80	19.50	22.00	16.60	16.50
92	13.00	14.40	20.50	24.00	16.25	15.00
91	14.00	16.85	22.50	22.00	14.00	15.75
90	19.50	18.00	20.10	22.00	19.30	13.60
89	16.50	14.75	20.25	21.00	18.50	10.65
88	10.00	14.20	19.00	22.50	19.75	14.55
87	11.55	14.90	16.05	22.00	17.05	15.05
86	14.35	18.00	21.35	22.25	15.40	12.50
85	10.85	14.95	21.55	24.50	21.00	13.25
84	12.30	16.70	15.80	24.10	20.80	18.45
83	13.21	16.00	19.25	22.75	21.10	11.50
82	-	-	-	22.45	17.05	14.00
81	12.10	14.60	18.30	23.55	19.50	16.15
80	16.00	14.75	20.35	20.80	14.70	14.70
79	8.85	12.5	17.95	24.25	17.60	13.95
78	-	-	-	20.75	18.40	11.00
Promedio	13.51	15.88	19.44	22.79	18.28	14.44
Des Std	2.58	1.73	1.79	1.29	2.29	2.03

2) Información sobre procesos que ocurren dentro del sistema. Se incluyeron los datos sobre la tasa de producción primaria neta del buffel en función de la cantidad de lluvia durante los meses de Marzo a Diciembre dependiendo de la Temperatura, así como el cambio de PV a PS, también la transformación de PS a mantillo (DESCOPM) y el consumo del ganado en base a su Peso Metabólico ($W^{0.75}$). La producción neta del buffel fue un valor aleatorio entre 18.8 y 20.8 kg. de materia seca (MS) por hectárea por cada mm de precipitación pluvial mensual (PP MENSUAL), cuando esta última fue igual o mayor a 20 mm y la Temperatura promedio mensual sobrepasó los 15°C (Martín *et al.* 1995), teniendo una cobertura basal del pasto buffel del 15%. El peso del ganado varió de 450 kg en julio a 550 kg en marzo, dada la distribución pluvial. Se estimó un consumo aleatorio mensual en función del Peso Metabólico y la EN_m del pasto (NRC, 1996).

Formulación del Modelo Conceptual.

El Modelo Conceptual se formuló procesando la descripción general del sistema y los objetivos del modelo. Basado en los objetivos del modelo, los componentes de interés fueron: la precipitación mensual, la temperatura mensual, la producción primaria, la dinámica del pastizal y el consumo del pasto. Estos componentes y la relación entre ellos formaron lo que denominamos modelo conceptual, y se representa diagramáticamente usando símbolos que indican la naturaleza específica de cada relación (Figuras 1 y 2).

También se indicaron los patrones del comportamiento que esperamos como predicciones del modelo. Estos patrones frecuentemente se describen en términos de la dinámica temporal general de los componentes más importantes del sistema. Los patrones esperados fueron:

- No debe existir diferencia estadística significativa entre la Precipitación Simulada Anual y la Precipitación Real Anual.
- Debe existir una correcta congruencia entre las predicciones del modelo y los datos de la literatura u opinión de expertos.

Formulación del Modelo Cuantitativo.

- El objetivo es describir las reglas que gobiernan el flujo de materiales en el modelo conceptual usando ecuaciones matemáticas. Primero se

escogió una estructura cuantitativa general, después se determinó la fórmula funcional para cada variable, posteriormente se desarrollaron las ecuaciones específicas que colectivamente explicaron el modelo. El siguiente paso fue escoger el tipo de información que tenemos, finalmente se codificó el modelo a la computadora y formalmente se presentaron las ecuaciones del modelo (Martínez-López, 2000).

La estructura cuantitativa del sistema consiste de un formato de compartimentos del modelo que incluyen grupos de Ecuaciones de Diferencia para variables externas, variables auxiliares, transferencias de materiales y variables de estado. Se escogió esta estructura porque es muy simple y puede representar modelos complejos grandes. Al inicio de la simulación se especificaron las condiciones iniciales de las variables de estado y los valores de las constantes. También se resolvieron todos los grupos de ecuaciones secuencialmente, comenzando por las variables externas, luego las variables auxiliares, transferencias de material, y por último las variables de estado, determinando el valor para cada variable en cada intervalo de tiempo.

Los datos de Temperatura para los meses de Abril a Septiembre no se incluyeron en la tabla 1 por tener temperaturas adecuadas para el crecimiento del buffel. Actualmente no existe información que relacione la productividad del buffel con la PP de la región por lo que se utilizó información de investigaciones realizadas en Sonora, México (Martín *et al.* 1995).

La dinámica de la biomasa del PV y PS giró en torno a intervalos de tiempo mensuales. El intervalo de tiempo mensual es razonable por permitir una adecuada resolución para dirigir nuestros objetivos, representando apropiadamente cambios temporales debido a los procesos que ocurren dentro del sistema. En el ANEXO 1, se presentan las ecuaciones que describen el modelo en el lenguaje original del software utilizado, así como la referencia bibliográfica, cuando fue posible. Una ventaja del uso del análisis de sistemas y simulación, es que permite encontrar la carencia de información; asumir su comportamiento en base a la experiencia de los investigadores y eventualmente, obtener dicha información mediante la investigación experimental.

Tabla 2. Datos y parámetros de la Precipitación Pluvial (mm) de la Estación Meteorológica de la FAUANL, en Marín, N.L.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
1996	5	0	0	0	0	41	45	180	89	48	13	3	424.8
1995	12	18	22	3	80	73	31	185	33	28	11	30	528.9
1994	87	24	32	10	17	45	71	38	30	26	12	22	418.5
1993	21	30	45	4	51	233	5	0	111	36	25	0	564.0
1992	77	10	6	13	84	17	3	51	33	46	26	15	383.9
1991	14	9	2	2	26	97	54	35	109	25	16	45	438.7
1990	2	4	25	14	34	0	37	115	178	16	5		433.2
1989	20	14	0	10	3	4	88	115	60	23	1	41	384.2
1988	29	20	0	22	30	48	66	160	1092	15	0	0	503.8
1987	16	17	13	12	50	152	73	106	83	8	4	9	550.2
1986	0	2	9	23	106	151	35	12	189	89	24	77	722.5
1985	45	3	17	122	22	30	35	28	118	113	5	6	550.1
1984	89	5	0	0	110	28	30	2	70	21	0	38	397.7
1983	29	40	16	0	141	20	51	111	69	25	0	9	516.5
1982	30	14	15	22	6	15	9	1	5	44	22	41	229.5
1981	71	23	32	113	55	101	47	98	98	29	1		673.8
1980	12	8	0	0	107	0	5	153	117	35	38	14	491.1
1979	4	1	36	30	94	19	43	77	213	0	30	44	594.8
Prom	33.6	14.6	21.2	29.0	60.2	67.6	40.7	86.6	95.5	37.2	15.8	28.4	489.2
PP max	58.8	25.6	37.1	50.8	105.5	118.4	71.2	151.6	167.2	65.2	27.7	49.8	
PP min	8.4	3.6	5.3	7.2	15.0	16.9	10.1	21.6	23.9	9.3	3.9	7.1	
Des Std.	29.6	10.8	12.6	38.5	41.6	64.2	24.7	61.6	56.3	26.7	11.5	20.7	
Prom-Des Std	3.9	3.8	8.6	-9.5	18.5	3.4	15.9	24.9	39.2	10.5	4.2	7.6	
Prom+Des Std	63.2	25.4	33.8	67.6	102.0	131.9	65.4	148.3	151.9	64.0	27.4	49.2	
mes_0mm_PP	1	1	5	4	1	2	0	1	0	1	3	4	
% sequía	0.05	0.05	0.27	0.22	0.05	0.11	0	0.05	0	0.05	0.17	0.22	
% lluvia	0.94	0.94	0.72	0.77	0.94	0.88	1	0.94	1	0.94	0.83	0.77	
PP > 20 mm	10	5	6	7	14	12	14	14	17	14	6	8	

Parámetros calculados sin considerar los meses de 0 precipitación pluvial
donde: PP max = Prom + (Prom * 0.75) y PP min = Prom - (Prom * 0.75)

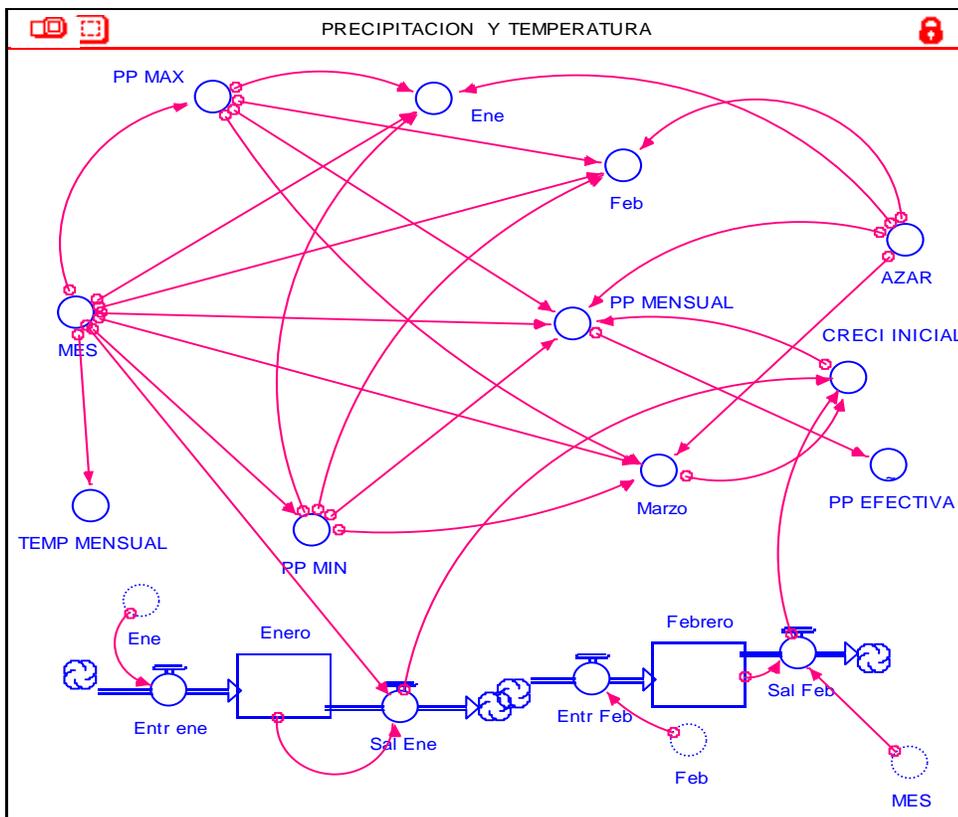


Figura 1. Submodelo conceptual de precipitación y temperatura mensual.

Evaluación del Modelo

La tercera etapa del análisis de sistemas consiste en determinar si el modelo es apropiado o no para cumplir con los objetivos planteados en la investigación. En la literatura comúnmente se usa el término “validación” del modelo, pero a menudo, e incorrectamente se tiende a destacar de sobremanera las comparaciones estadísticas entre las predicciones del modelo y las observaciones del sistema real como único criterio de validación. La evaluación del modelo es un proceso que se basa en todos los aspectos de la estructura y comportamiento, que hacen que el modelo sea potencialmente útil y congruente con el sistema real. Dependiendo de los objetivos del modelo, se puede profundizar en la interpretación de las relaciones entre los componentes del modelo o en su capacidad predictiva (Grant *et al.* 1997).

Para evaluar el modelo de simulación se utilizaron los datos de la Precipitación real (PP REAL) y se compararon a los datos generados por la simulación

(PP SIM), ya que el resto de la dinámica de los submodelos depende directamente de PP MENSUAL y además no se cuenta con datos del sistema real que correlacione la productividad del Buffel a la PP MENSUAL. La PP MENSUAL real fue sumada anualmente y este dato usado para su análisis estadístico. Se hicieron dos corridas de simulación de 21 años, eliminándose el primer año para evitar el sesgo de las condiciones iniciales de las variables de estado. Por lo anterior, se tienen 19 repeticiones de PP REAL, que se compararon a las 40 repeticiones de PP SIM.

Se realizó una prueba *t* (Steel *et al.* 1996) para comparar los datos de PP SIM de las dos simulaciones y otra para comparar PP REAL vs. PP SIM, mediante la misma prueba. Igualmente se evaluó la congruencia del comportamiento del modelo para la PPN, con datos del sistema real, reportados en la literatura y se determinó si el modelo era o no congruente con el sistema de interés.

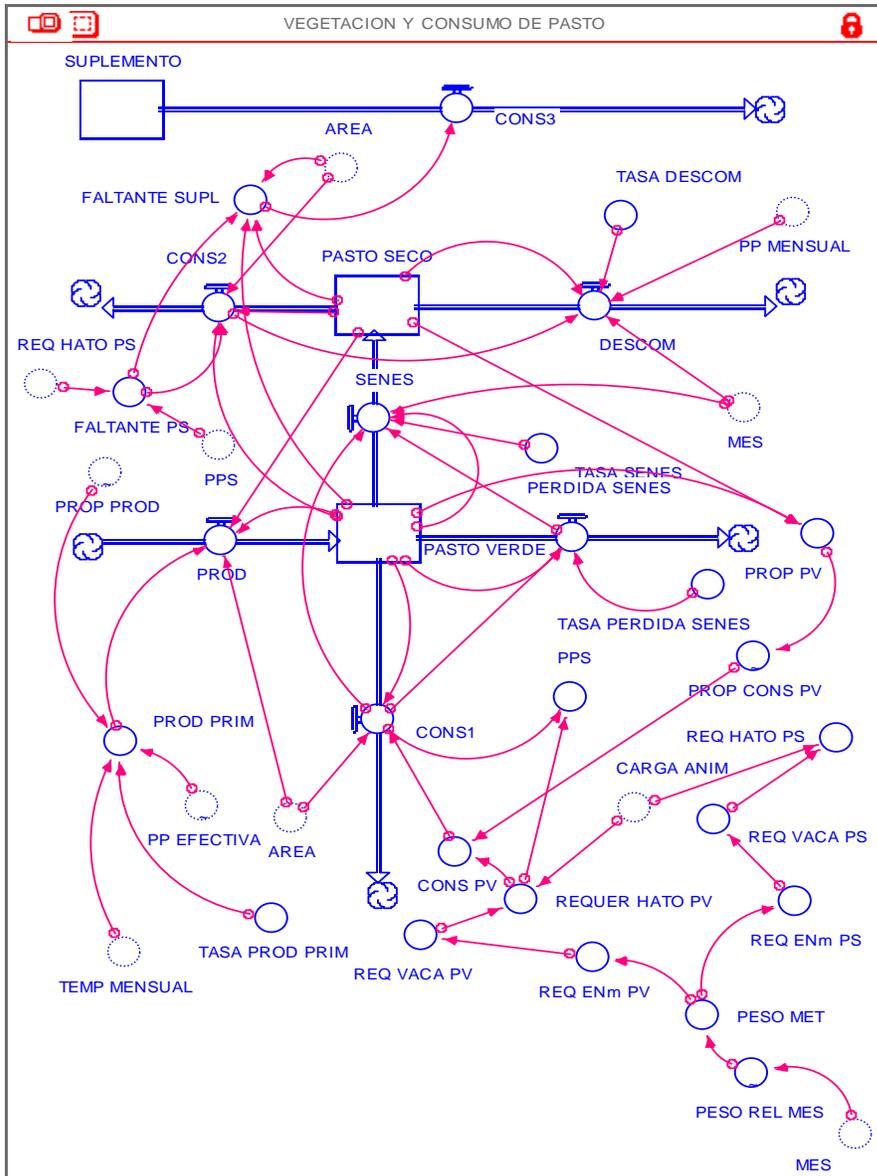


Figura 2. Submodelo conceptual de la pradera y consumo voluntario.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Un conocimiento completo de las características físicas del ecosistema del pastizal, es esencial para el entendimiento integral del mismo. Estas características físicas incluyen el clima, el suelo y la topografía, donde la precipitación es el factor más importante para determinar la productividad primaria neta en un ecosistema. El segundo factor limitante en importancia, en ecosistemas desérticos de Norteamérica es la temperatura (Holecheck, *et al.* 1998; Martín *et al.* 1995). La producción primaria neta del pasto buffel está fuertemente influenciada por la precipitación y temperatura de marzo a noviembre, factores que explican el 85 y 92% de la

producción de este pasto en Sonora y Tamaulipas, respectivamente (Martín *et al.* 1995, Gómez de la Fuente *et al.* 2007).

En este modelo, la PP SIM varió de 300 a 704 mm anuales, dando un promedio de 478 mm. Por su parte, PP REAL varió de 229 a 722 mm anuales con un promedio de 489 mm, lo que refleja que la Precipitación fue correctamente simulada. No se encontró diferencia significativa entre corridas de PP SIM ($P > 0.05$) ni entre PP SIM y PP REAL ($P > 0.05$). La menor variación de PP SIM se explica por la reducción hecha a sus rangos de precipitación mensual (Fig. 3).

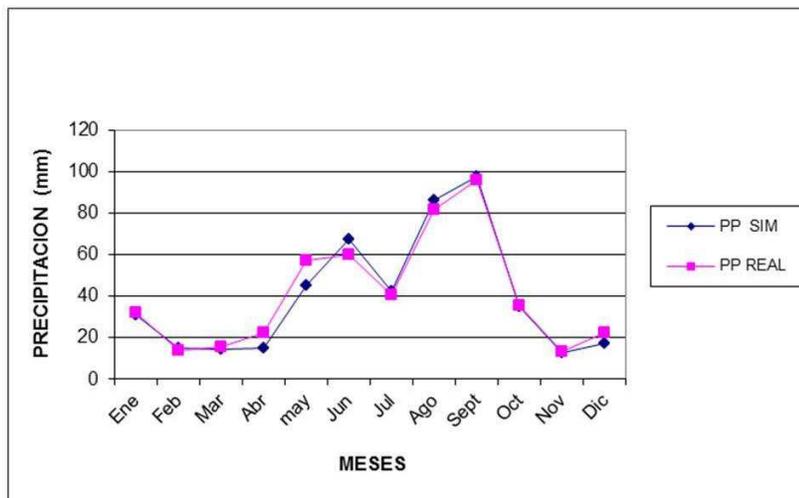


Figura 3. Variación Mensual de la Precipitación Real y Simulada.

Este modelo fue diseñado para generar una temperatura inadecuada para el crecimiento del buffel en los meses de enero y febrero (12°C), adecuada para el periodo de marzo a octubre (23°C) y, al azar para noviembre y diciembre, basado en la regresión de la temperatura promedio para los meses de octubre a noviembre (Ver TEMP_MENSUAL, en Anexo 1). La temperatura promedio simulada, generada por la regresión $64.4 - 4.17 \cdot \text{MES}$, para los meses de noviembre y diciembre fue de 18.5°C y 15.0°C , respectivamente. La temperatura real para noviembre y diciembre fue de 18.3°C y 14.4°C . La desviación estándar de TEMP_MENSUAL simulada, fue menor que la real, ya que esta última no tiene distribución normal. Sin embargo, la temperatura mensual real de noviembre y diciembre, tienen 2 y 10 meses con temperaturas inferiores a 15°C , respectivamente, mientras que TEMP_MENSUAL simulada tiene 1 y 8, para los mismos meses, considerándose muy buena congruencia de estos parámetros (Tabla 3) con la temperatura real.

PPN fue programada para no producir en los meses de Enero y Febrero, por temperatura inadecuada. Diciembre fue el mes que promedió PPN más baja con 31 kg/ha y Septiembre fue el mes más productivo con 1489 kg/ha , lo cual es de esperarse, ya que son los meses con menor y mayor precipitación, respectivamente. Diciembre es el mes más frío de los meses que producen buffel, aunado a que es de los meses que presentan las Precipitaciones más bajas. A la fecha, desafortunadamente no se cuenta con datos que relacionen la productividad del buffel con la precipitación, en intervalos mensuales, a excepción de aquellos de donde proviene la ecuación de la que se derivan los datos del presente trabajo, por lo que no es válido usarlos para evaluar el modelo. Sin embargo, la producción anual promedió 7294 kg/ha

variando de 4573 a 10257 kg/ha . Aranda (1986) reportó $7162 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, en Marín, N.L. siendo el mismo lugar de donde se obtuvieron los datos para la presente simulación. Utilizando los datos climáticos del año en que se realizó dicho estudio (1984) se calculó una PPN de $6827 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Hanselka (1985) reportó producciones que varían desde los 2676 hasta los 6150 kg/ha al año. Sanderson *et al.*, (1999), Martín *et al.* (1995), y Hanselka y Johnson (1991) reportaron 8369 , 6950 y 7000 kg ha^{-1} anuales, respectivamente. Es muy probable que estas diferencias se deban a diferencias en los parámetros climáticos y edáficos, así como a sus interacciones. Existen muchos otros factores que intervienen en la producción primaria neta, sin embargo, están implícitos en el trabajo realizado por Martín *et al.* (1995) por lo que no se incluyeron en el presente trabajo. Gómez de la Fuente *et al.* (2007) estudiaron las variables tasa de crecimiento, índice de área foliar y la relación hoja:tallo, de pasto buffel en el centro de Tamaulipas, en función de los parámetros precipitación, temperatura, índice de radiación, unidades heliotérmicas y evapotranspiración, encontrando que la tasa de crecimiento del buffel se explica por la precipitación en un 92%. La razón hoja:tallo e índice de área foliar, responden de manera compleja a las condiciones del ambiente y no fue posible predecirlas en forma confiable con los datos recabados en ese estudio. El resto de los parámetros estudiados por estos autores tuvieron poca importancia en este estudio, sin embargo son importantes en investigación básica. En esta misma región, se estimó una producción de pasto buffel entre 4497 y 4657 kg MS/ha para el año 1999 y 4342 kg MS/ha para el 2000, con precipitaciones de marzo a octubre de 603 y 661 mm de precipitación, respectivamente (Díaz Solís, *et al.* 2007).

Tabla 3. Evaluación de la congruencia entre la temperatura mensual simulada y la temperatura mensual real

TEMP SIMULADA			TEMPERATURA REAL		
Año	Nov	Dic	Año	Nov	Dic
1	19.4	15.4	96	18.7	16.0
2	20.6	15.4	95	19.1	15.2
3	19.1	16.5	94	22.5	16.7
4	20.0	16.5	93	16.6	16.5
5	17.4	13.6	92	16.3	15.0
6	19.0	13.5	91	14.0	15.8
7	18.5	17.2	90	19.3	13.6
8	18.3	16.2	89	18.5	10.7
9	17.3	18.1	88	19.8	14.6
10	18.4	15.6	87	17.1	15.1
11	17.9	16.1	86	15.4	12.5
12	14.5	15.3	85	21.0	13.3
13	21.5	16.3	84	20.8	18.5
14	16.3	13.8	83	21.1	11.5
15	22.1	13.6	82	17.1	14.0
16	17.3	12.2	81	19.5	16.2
17	19.5	16.0	80	14.7	14.7
18	17.3	14.7	79	17.6	14.0
19	18.8	11.0	78	18.4	11.0
20	16.8	13.9			
Promedio	18.5	15.0	Promedio	18.3	14.4
Des Std	1.8	1.7	Des Std	2.3	2.0
MES < 15°C	1	8		2	10

Al alimentar el modelo de simulación con las precipitaciones mensuales del estudio de Díaz Solís *et al.* (2007), se obtuvo una producción de materia seca de 4697.3 y 4504.5 para el año 1999 y 2000, respectivamente. Como puede observarse, existen mínimas diferencias en las predicciones del modelo, con respecto a lo encontrado por Díaz Solís *et al.* (2007), sin embargo mantiene la tendencia de predecir menor producción en el año con mayor Precipitación. El modelo predijo 2.6 y 3.7% mayor PPN que lo reportado por los autores. Gómez de la Fuente *et al.* (2007) explican este comportamiento por considerar que existe un límite máximo de la tasa de crecimiento del buffel, el que ubicó en el 20% de saturación del suelo a los 20 cm de profundidad. En el modelo de simulación, este límite máximo de crecimiento del buffel se fijó en 2500 kg de MS de Pasto verde. Al existir precipitación y temperatura adecuadas, esta se incrementaría a un 25% de su tasa de producción primaria TASA PROD PRIM. Por otro lado, la lluvia efectiva mensual (PP EFECTIVA) se

fijó hasta 90 mm mensuales, por lo que si en un mes, se presentan lluvias que sobrepasen este umbral, el pasto solo producirá como si solo se presentara una precipitación de 90 mm.

La textura y contenido de materia orgánica del suelo, igualmente, afectan el contenido de agua que un suelo puede retener y estar disponible para las plantas (Ojeda, *et al.* 2006); sin embargo, su determinación es compleja debido a la gran variedad de suelos y climas en los que el buffel está establecido, aunado a la vegetación asociada y al variable manejo a que es sujeto (Ibarra, *et al.* 1995). Aun cuando COTECOCA presenta información consistente para la República Mexicana, esta información no puede considerarse en este trabajo ya que los coeficientes de agostadero se consideran permanentes y se calculan para condiciones naturales, es decir, sin considerar el disturbio provocado por mal uso o mejoras de las condiciones de los sitios evaluados. Por lo anterior, COTECOCA no considera la introducción de pastos,

como el buffel. Para la región de Marín, Nuevo León, COTECOCA (1969) determina una producción primaria neta entre 2501 y 5000 kg MS ha⁻¹ Año⁻¹ y una capacidad de carga entre 4.3 y 49.2 ha UA⁻¹. En el presente trabajo, se demostró que el buffel soporta una UA en 2 ha UA.

Con los resultados anteriores, se observa que el modelo es congruente con lo reportado en la literatura, por lo que su evaluación es satisfactoria, aun con la carencia de análisis estadísticos, los que no son imprescindibles en la evaluación de modelos de simulación estocásticos (Grant, *et al.* 1997). Igualmente el PASTO TOTAL tuvo su mayor acumulación en Octubre, siendo esta de 5437 kg/ha y su menor acumulación en Mayo (1816 kg/ha), lo que es bastante aceptable debido a las altas producciones forrajeras a finales de verano y principios de otoño, en contraste con las bajas producciones de Invierno y Primavera, aunado a los altos consumos por parte del ganado en los meses de Enero a Marzo (Fig. 4). Esta información es generada por el modelo de simulación y no puede ser comparada estadísticamente con datos de la literatura, dado que no se publican las bases de datos experimentales.

El CONSUMO TOTAL simulado promedió 3605 kg UA⁻¹ anualmente, siendo el mes de Marzo en donde se presentó el máximo consumo y Julio el mínimo, correspondiendo sus valores a 320 y 284 kg de MS UA⁻¹, respectivamente. Investigaciones realizadas en Sonora, estimaron consumos voluntarios en praderas de pasto buffel con valores de 15, 10, 8 y 6.5 kg de MS d⁻¹ para las épocas de primavera, verano, otoño e invierno respectivamente (Ramírez *et al.* 1996). Promediando estos valores y multiplicando por 365 días, se obtiene un consumo voluntario anual de 3604

kg, lo que demuestra la confiabilidad del modelo y las ecuaciones propuestas por el NRC (1996) para estimar el consumo voluntario en pasto verde y seco.

La evaluación del modelo, se hace estadística, cuando es posible, en caso contrario, se considera la congruencia del comportamiento del modelo (Grant, *et al.*, 1997), con datos de la literatura y con observaciones del sistema real que aun requieren investigación. Por lo anterior, el modelo fue evaluado satisfactoriamente.

Finalmente, se encontraron oportunidades de investigación en lo referente a la tasa de senescencia del pasto buffel, tasa de pérdidas por senescencia, tasa de descomposición del pasto buffel, entre otras.

CONCLUSIONES.

El modelo simula congruentemente la Precipitación Anual y Mensual, lo que a su vez, conduce a una buena simulación de la Producción Primaria Neta concordando con información de la literatura. Por otro lado, el consumo voluntario anual, fue estimado en forma similar al reportado en la literatura, aun cuando son fuentes de información distintas.

La estructura del modelo fue evaluada satisfactoriamente en base al comportamiento del propio modelo, ya que se simularon condiciones muy similares a las que se encuentran en praderas reales de pasto buffel de la región.

El modelo representa una herramienta útil para identificar las opciones que permitan diseñar investigaciones de campo mejor estructuradas para hacer uso sostenible del pasto buffel.

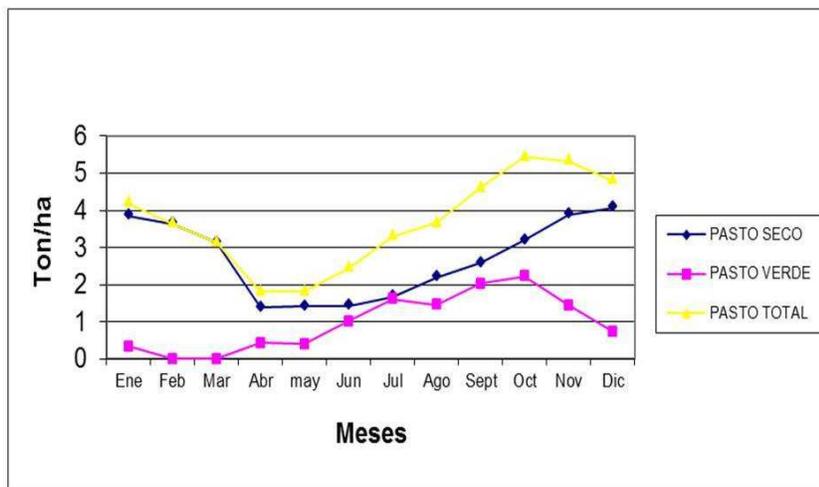


Figura 4. Variación del Pasto Total, Pasto Seco y Pasto Verde a través del año.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios. Su ayuda fue fundamental para la obtención de mi grado de Maestro en Ciencias en Producción Animal. A la Fundación Produce Nuevo León, A.C. por el financiamiento para el desarrollo de este trabajo, a través del proyecto “Modelos de crecimiento que incluyan el efecto de la intensidad de pastoreo sobre la producción y valor nutritivo de gramíneas en el Noreste de México”.

REFERENCIAS.

- Aranda Ruiz, J. 1986. Variación de las Características Morfológicas, Fisiológicas y Aspectos Anatómicos en Diferentes Colecciones de *Cenchrus ciliaris* L. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, N. L., México.
- Briske, D. D. and Heitschmidt, R. K. 1991. An Ecological Perspective. In: Heitschmidt, R. K. and Stuth, J. W. (eds). *Grazing Management: An Ecological Perspective*. Timber Press, Portland, Oregon. Pp.11-26.
- COTECOCA. 1969. Coeficientes de Agostadero de la República Mexicana: Estados de Baja California, Sonora, Chihuahua, Zacatecas, Coahuila, Tamaulipas, Nuevo León Durango y San Luis Potosí. SAG, México, D.F.
- Cox, J.R., Martin M.H., Ibarra, F., Fourie, J.H., Rethman, N.F.G., y Wilcox, D.G. 1988. The influence of climate and soils on the distribution of four african grasses. *Journal Rangeland Management*. 41:127-139.
- Cox, J. R. 1991. El Pasto Buffel: Historia y Establecimiento. Un Acercamiento Internacional para Seleccionar Sitios de Siembra e Implicaciones en la Agricultura del Futuro. En: Aguirre, A., Candanosa, E. y Gómez E. (eds.). *Aprovechamiento Integral del Pasto Buffel*. Simposium Internacional. Séptimo Congreso Nacional. SOMMAP. Victoria, Tamps. Mex.
- Díaz Solís, H., Gómez de la Fuente, E., Saldívar Fitzmaurice, A., Briones Encinia F., Vargas Tristán, V. y Grant, W. E. 2007. Crecimiento y desarrollo del buffel [*Cenchrus ciliaris* (L.) Link] en la zona centro de Tamaulipas, México. En: XX Reunión Latinoamericana De Producción Animal (ALPA), XXX Reunion Anual de la Asociación Peruana de Producción Animal (APPA). Cusco, Perú.
- Gómez de la Fuente, E., Díaz Solís, H., Saldívar Fitzmaurice, A., Briones Encinia, F., Vargas Tristán V. y Grant, W.E. 2007. Patrón de crecimiento de pasto buffel [*Pennisetum ciliare* L. (Link.) Sin. *Cenchrus ciliaris* L.] en Tamaulipas, México. *Técnica Pecuaria México*. 45(1):1-17.
- Grant, W.E., Pedersen, E.K. y Marin, S.L. 1997. *Ecology and Natural Resource Management: Systems Analysis and Simulation*. John Wiley & Sons. 373p.
- Haefner, J.W. 1996. *Modeling Biological Systems: Principles and Applications*. Chapman & Hall. New York, N.Y. 473p.
- Hanselka, C.W. 1985. Grazing Management Strategies for Buffelgrass. In: Runge, E. C. A. y J. L. Schuster. 1985. *Buffelgrass: Adaptation, Management and Forage Quality Symposium*. Texas Agr. Exp. Sta. MP-1575. College Station, Texas.
- Hanselka, C.W. y D. Johnson. 1991. Establecimiento y Manejo de Praderas de Pasto Buffel Común en el sur de Texas y en México. En: Aguirre, A., Candanosa, E. y Gómez E. (eds.). *Aprovechamiento Integral del Pasto Buffel*. Simposium Internacional. Séptimo Congreso Nacional. SOMMAP. Victoria, Tamps. Mex.
- High Performance Systems, Inc. 1994. *Stella II: Technical Documentation*. High Performance Systems, Inc. Hanover, NH. USA.
- Holecheck, J.L., Pieper, R.D. and Herbel, C. H. 1998. *Range Management. Principles and Practices*. Third Edition. Prentice Hall Ed. New Jersey. 542 p.
- Holt, E. C. 1985. Buffelgrass- A Brief History. In: Runge, E. C. A. y J. L. Schuster. 1985. *Buffelgrass: Adaptation, Management and Forage Quality Symposium*.
- Ibarra, F., Cox, J. R., Martin, M. H., Crowl T. A. and Call C.A. 1995. Predicting Buffelgrass Survival Across a Geographical and Enviromental Gradient. *Journal Rangeland Management*. 48:53-59.
- Levy N., G. 1994. Algunas ideas sobre las arbustivas y el pastizal. *Memorias del X Congreso SOMMAP*. FAUANL. Monterrey, N.L. p 3-8.
- Martín, M.H., Cox, J.R. e Ibarra, F. 1995. Climatic effects on buffel grass productivity in the Sonoran Desert. *Journal Rangeland Management*. 48:60-63.

- Martínez-López, J.R. 2000. Influencia de la precipitación y la carga animal sobre la productividad del buffel (*Cenchrus ciliaris* L.), utilizando análisis de sistemas y simulación. Tesis de Maestría en Ciencias. Subdirección de Estudios de Postgrado. Facultad de Agronomía. Universidad Autónoma de nuevo León. pp. 87.
- NRC. 1996. Nutrient Requirements of Beef Cattle. National Academy Press. 7th ed. Washington, D.C.
- Patrocipes. 1995. Guía Práctica para el Establecimiento, Manejo y Utilización del Pasto Buffel. Ed Gutenberg. Sonora, México.
- Ridder, N. D. y Wagenaar, K.T. 1986. Energy and Protein Balances in Traditional Livestock Systems and Ranching in Eastern Botswana. *Agricultural Systems*. 20:1-16.
- Ramírez M. F., Parra G. M., Gómez, A.R., Ortega G, C. y Silva O., M. 1996. Consumo voluntario de forraje por bovinos en dos sistemas de pastoreo en praderas de zacate buffel. Reunión Nacional de Investigación Pecuaria del INIFAP. Cuernavaca, Morelos. 2 al 4 de diciembre de 1996.
- Runge, E. C. A. y Schuster, J. L. 1985. Buffelgrass: adaptation, management and forage quality Symposium. Texas Agr. Exp. Sta. MP-1575. College Station.
- Sanderson M. A., Voigt, P., Jones R.M. 1999. Yield and quality of warm-season grasses in central Texas. *Journal Rangeland Management*. 52:145–150.
- Steel, R.G.D., Torrie, J.H. y Dickey, D.A. 1996. Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach. Ed. McGraw-Hill. Tercera Edición. 666 p.
- White, L.D. and Wolfe, D. 1985. Nutritional Value of Common Buffelgrass. In: Runge, E. C. A., J. L. Schuster. 1985. Buffelgrass: adaptation, management and forage quality Symposium. Texas Agr. Exp. Sta. MP-1575. College Station

Submitted December 16, 2012 – Accepted June 15, 2013
Revised received January 08, 2014

ANEXO 1. ECUACIONES DEL MODELO CUANTITATIVO.

SUBMODELO DE CARACTERISTICAS DE LA PRADERA

AREA_1 = 100

Documento: 100 hectáreas de pasto buffel.

CARGA_ANIM = 50 UA

Documento: Carga Animal. Mediante esta carga animal y el área (100 ha.), se simula la carga animal deseada (2 ha UA⁻¹)

COBERTURA_BASAL = 0.15

Documento: Es la Cobertura Basal del buffel en una pradera bien establecida (15%). Unidad = porcentaje. (Patrocipes, 1995).

PROP_PROD = GRAPH(COBERTURA_BASAL)

(COBERTURA_BASAL, PROP_PROD) = (0.00, 0.00), (0.02, 0.16), (0.04, 0.32), (0.06, 0.54), (0.08, 0.78), (0.1, 0.9), (0.12, 0.95), (0.14, 0.99), (0.16, 1.00), (0.18, 1.00), (0.2, 1.00)

Documento: Proporción de Producción Primaria del pasto en función de la Cobertura Basal. Sin unidades. En el modelo, la COBERTURA_BASAL varía de 0 a 20 %, mientras que PROP_PROD varía de 0 a 100%. la proporción de Producción. Datos empíricos basados en la observación de los autores y Patrocipes (1995). Relación continua.

SUBMODELO DE PRECIPITACION Y TEMPERATURA

Enero(t) = Enero(t - dt) + (Entr_ene - Sal_Ene) * dt

INIT Enero = 0

INFLOWS:

Entr_ene = Ene

OUTFLOWS:

Sal_Ene = If mes=3 THEN Enero ELSE 0

Documento: Acumula la lluvia de enero para el mes de marzo en función de la cantidad de lluvia de marzo. En enero no se genera producción primaria por temperaturas inadecuadas. Datos empíricos basados en la observación de los autores, ya que cuando no llueve en marzo se observa producción por las lluvias de enero y febrero (Ver Producción Primaria de Marzo).

Febrero(t) = Febrero(t - dt) + (Entr_Feb - Sal_Feb) * dt

INIT Febrero = 0

INFLOWS:

Entr_Feb = Feb

OUTFLOWS:

Sal_Feb = If mes=3 THEN Febrero ELSE 0

Documento: Acumula la lluvia de febrero para el mes de marzo en función de la cantidad de lluvia de marzo. En febrero no se genera producción primaria por temperaturas inadecuadas. Datos empíricos basados en la observación de los autores, ya que cuando no llueve en marzo se observa producción por las lluvias de enero y febrero (Ver Producción Primaria de Marzo).

VARIABLES AUXILIARES EXTERNAS

AZAR = RANDOM(0,1,147)

Documento: Probabilidad de lluvia. Genera un flujo de números repetibles, uniformemente distribuidos entre 0 y 1, los cuales se usan en la probabilidad de lluvia de cada mes (% lluvia en la Tabla 2).

CRECI_INICIAL = if Marzo<20 THEN MAX((Sal_Ene+Sal_Feb)/2,Marzo) ELSE Marzo

Documento: Crecimiento Inicial. Es la lluvia de Marzo influenciada por las lluvias de enero y febrero. Si la lluvia de marzo es menor a 20 mm va a maximizar el valor del promedio de la lluvia de enero más la lluvia de febrero, con la lluvia de Marzo, de lo contrario tomará el valor de Marzo. Datos empíricos basados en la observación de los autores.

Ene = if (mes=1) and (AZAR<=.94) THEN RANDOM(PP_MAX,PP_MIN) ELSE 0

Documento: Lluvia de Enero

Feb = if (mes=2) and (azar<=.94) THEN RANDOM(PP_MAX,PP_MIN) ELSE 0

Documento: Lluvia de Febrero

Marzo = if (mes=3) and (azar<=.72) THEN RANDOM(PP_MAX,PP_MIN) ELSE 0

Documento: Lluvia de Marzo

MES = COUNTER(1,13)

Documento: Mes. Genera los doce meses del año. Es el Intervalo de tiempo del modelo.

PP_MAX = if MES=1 THEN 58.82 ELSE if MES=2 THEN 25.68 ELSE if MES=3 THEN 37.16 ELSE if MES=4 THEN 50.82 ELSE if MES=5 THEN 105.49 ELSE if MES=6 THEN 118.37 ELSE if MES=7 THEN 71.28 ELSE if MES=8 THEN 151.57 ELSE if MES=9 THEN 167.29 ELSE if MES=10 THEN 65.23 ELSE if MES=11 THEN 27.71 ELSE 49.81

Documento: Precipitación Máxima. Genera el límite máximo de la precipitación mensual. Considera los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre en forma especial por carecer de temperaturas adecuadas para la producción del zacate buffel. Datos basados en el promedio de 18 años, más el promedio, multiplicado por 0.75 [prom+(prom*0.75)]. En el promedio no se consideraron los meses con 0 mm de PP por utilizar la probabilidad de lluvia.

PP_MIN = if MES=1 THEN 8.40 ELSE if MES=2 THEN 3.67 ELSE if MES=3 THEN 5.31 ELSE if MES=4 THEN 7.26 ELSE if MES=5 THEN 15.07 ELSE if MES=6 THEN 16.91 ELSE if MES=7 THEN 10.18 ELSE if MES=8 THEN 21.65 ELSE if MES=9 THEN 23.9 ELSE if MES=10 THEN 9.32 ELSE if MES=11 THEN 3.96 ELSE 7.12

Documento: Precipitación Mínima. Genera el límite mínimo de la precipitación mensual. Considera los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre en forma especial por carecer de temperaturas adecuadas para la producción del zacate buffel. Datos basados en el promedio de 18 años, menos el promedio multiplicado por 0.75 [prom-(prom*0.75)]. En el promedio no se consideraron los meses con 0 mm de PP por usar la probabilidad de lluvia.

PP_MENSUAL = if (mes=3) THEN CRECI_INICIAL ELSE if (mes=4) and (azar<=.78) THEN RANDOM(PP_MAX,PP_MIN) ELSE if (mes=5) and (azar<=.94) THEN RANDOM(PP_MAX,PP_MIN) ELSE if (mes=6) and (azar<=.89) THEN RANDOM(PP_MAX,PP_MIN) ELSE if (mes=7) and (azar<=1.00) THEN RANDOM(PP_MAX,PP_MIN) ELSE if (mes=8) and (azar<=.94) THEN RANDOM(PP_MAX,PP_MIN) ELSE if (mes=9) and (azar<=1.00) THEN RANDOM(PP_MAX,PP_MIN) ELSE if (mes=10) and (azar<=.94) THEN RANDOM(PP_MAX,PP_MIN) ELSE if (mes=11) and (azar<=.83) THEN RANDOM(PP_MAX,PP_MIN) ELSE if (mes=12) and (azar<=.77) THEN RANDOM(PP_MAX,PP_MIN) ELSE 0.

Documento: Genera la precipitación mensual, tomando un valor aleatorio entre el rango mínimo y el máximo; y considerando la probabilidad de que llueva en dicho mes. El promedio de la lluvia de enero y febrero se compara con la lluvia de marzo y dicho mes toma el valor mayor de precipitación (Ver CRECI_INICIAL).

TEMP_MENSUAL = If (mes=1) OR (mes=2) THEN 12 ELSE if (mes>=3) AND (mes<11) THEN 23 ELSE NORMAL(64.4 - 4.17*MES,1.913)

Documento: Temperatura Mensual. Genera temperatura inadecuada para el crecimiento del buffel en los meses de enero y febrero (12°C), adecuada para el periodo marzo-oct (23°C) y, al azar para nov y dic, basado en la regresión lineal de la temperatura promedio para estos meses. Datos de 1978 a 1996. Estación Meteorológica FAUANL. Marín, N.L., Mex.

PP_EFECTIVA = GRAPH(PP_MENSUAL)

(0.00, 0.00), (5.00, 5.00), (10.0, 10.0), (15.0, 15.0), (20.0, 20.0), (25.0, 25.0), (30.0, 30.0), (35.0, 35.0), (40.0, 40.0), (45.0, 45.0), (50.0, 50.0), (55.0, 55.0), (60.0, 60.0), (65.0, 65.0), (70.0, 70.0), (75.0, 75.0), (80.0, 80.0), (85.0, 85.0), (90.0, 90.0), (95.0, 90.0), (100, 90.0), (105, 90.0), (110, 90.0), (115, 90.0), (120, 90.0), (125, 90.0), (130, 90.0), (135, 90.0), (140, 90.0), (145, 90.0), (150, 90.0), (155, 90.0), (160, 90.0), (165, 90.0), (170, 90.0), (175, 90.0), (180, 90.0), (185, 90.0), (190, 90.0), (195, 90.0), (200, 90.0)

Documento: Precipitación Efectiva. Es la respuesta a la Precipitación Mensual. Después de 90 mm de PP solo responderá como si lloviera 90 mm. Datos empíricos basados en la observación de los autores. Relación continua.

SUBMODELO DE VEGETACION Y CONSUMO DE PASTO

PASTO_VERDE(t) = PASTO_VERDE(t - dt) + (PROD - CONS1 - SENES - PERDIDA_SENES) * dt
INIT PASTO_VERDE = 210000

Documento: Almacén del pasto verde (kg). La acumulación de Pasto verde depende de la Producción de Pasto verde (PROD) menos el Consumo de Pasto verde (CONS1), la Senescencia del Pasto verde (SENES) y la pérdida de Pasto Seco de la Planta (PERDIDA_SENES).

INFLOWS:

PROD = IF (PASTO_VERDE/AREA) < 2500 OR (PASTO_SECO/AREA) < 3500 THEN AREA*PROD_PRIM ELSE AREA*PROD_PRIM*.25

Documento: Producción de Pasto verde. Está en función del AREA y de la Producción Primaria (PROD_PRIM). Si la producción almacenada en PASTO_VERDE es mayor a 2500 kg /ha o PASTO SECO es mayor a 3500 kg/ha se producirá solamente un 25% de AREA*PROD PRIM. Datos empíricos basados en la observación de los autores.

OUTFLOWS:

CONS1 = IF (PASTO_VERDE/AREA) > 100 THEN MIN (PASTO_VERDE,CONS_PV) ELSE 0

Documento: Salida de Transferencia de Material del Pasto verde por consumo. Si el Pasto verde tiene más de 100 kg por ha, entonces se genera el valor mínimo entre PASTO VERDE y CONS PV. Cuando el CONS PV es menor que el PASTO VERDE, el consumo mínimo toma el valor del CONS PV y viceversa (kg/mes). Cuando haya menos de 100 kg/ha no se consumirá el Pasto verde, por ser inadvertido.

SENES = IF MES=12 THEN (PASTO_VERDE - CONS1- PERDIDA_SENES) ELSE TASA_SENES * (PASTO_VERDE-CONS1-PERDIDA_SENES)

Documento: Senescencia. Entrada de Transferencia de Material de Pasto Seco. Es el paso de Pasto verde a Pasto seco. En diciembre (MES=12) todo el pasto verde se secará, después de realizarse el consumo por el ganado (CONS1) y restar el pasto verde que se cae de la planta al secarse (PERDIDA_SENES). Para el resto de los meses, el pasto verde existente se secará a una tasa de senescencia (Ver TASA_SENES).

PERDIDA_SENES = TASA_PERDIDA_SENES*(PASTO_VERDE-CONS1)

Documento: Salida de Transferencia de Material. Biomasa de Pasto verde que se pierde de la planta por mes (kg/mes), al secarse. Datos empíricos basados en la observación de los autores.

VARIABLES AUXILIARES DE PASTO VERDE

PROD_PRIM = IF PP_EFECTIVA>=20 AND TEMP_MENSUAL>=15 THEN PP_EFECTIVA *TASA_PROD_PRIM *PROP_PROD ELSE 0

Documento: Producción Primaria Neta. Si la precipitación mensual efectiva (PP_EFECTIVA) es igual o mayor a 20 mm y la temperatura mensual es igual o mayor a 15°C, genera la producción primaria del buffel (Martín *et al.* 1995) en función de la PP_EFECTIVA multiplicada por tasa de producción primaria del buffel (TASA_PROD_PRIM) y por la proporción de producción (PROP_PROD) de la TASA_PROD_PRIM.

TASA_PROD_PRIM = RANDOM(18.8,20.8,147)

Documento: Tasa de Producción Primaria Neta. Genera valores al azar, uniformemente distribuidos y repetibles entre 18.8 y 20.8, que a su vez significan los kg de materia seca que se producirán por cada mm de precipitación por hectárea (Martín, et al. 1995) con Cobertura Basal mayor al 14% (Patrocipes, 1995). Aquí se simuló el modelo con 15% de COBERTURA_BASAL.

CONS_PV = REQUER_HATO_PV * PROP_CONS_PV

Documento: Consumo de Pasto verde. Está en función de la Proporción del Consumo de Pasto verde (PROP_CONS_PV) multiplicado por el requerimiento del hato en Pasto verde (REQUER_HATO_PV).

REQUER_HATO_PV = CARGA_ANIM*REQ_VACA_PV

Documento: Requerimiento del Hato en Pasto verde. Multiplicación de la Carga Animal por Requerimiento de la vaca en Pasto verde (REQ_VACA_PV en kg/mes).

$$\text{REQ_VACA_PV} = \text{REQ_ENm_PV}/1.2587$$

Documento: Requerimiento de la vaca en Pasto verde. Es el consumo de la vaca en pasto verde (kg/mes) (NRC, 1996). Está en función del Requerimiento de Energía Neta de Mantenimiento de una UA en Pasto verde (Mcal/mes) dividido por la ENm del buffel verde (1.2587/kg).

$$\text{REQ_ENm_PV} = \text{PESO_MET} * (0.04997 * (1.2587^2) + 0.0431) * (365/12)$$

Documento: Requerimiento de Energía Neta de Mantenimiento de una UA en Pasto verde en Mcal/mes. Este requerimiento está en función del Peso Metabólico de la UA (PESO_MET) y de la ENm del buffel verde (NRC, 1996). El buffel verde tiene una ENm de 1.2587 Mcal/kg derivados de 58.4% de Nutrientes Digestibles Totales (White, L.D. and Wolfe, D. 1985).

$$\text{PESO_MET} = \text{PESO_REL_MES}^{0.75}$$

Documento: Peso Metabólico. Es el peso de la UA elevado a la 0.75 (NRC, 1996)

$$\text{PESO_REL_MES} = \text{GRAPH}(\text{MES})$$

(MES, PESO_REL_MES) = (1.00, 525), (2.00, 538), (3.00, 550), (4.00, 490), (5.00, 475), (6.00, 460), (7.00, 450), (8.00, 463), (9.00, 475), (10.0, 488), (11.0, 500), (12.0, 513)

Documento: Peso Relativo al Mes. El Peso de las vacas (Kg) estará en función del mes. El peso máximo será en marzo (550 kg), y el mínimo en julio (450 kg). Relación continua.

$$\text{PROP_CONS_PV} = \text{GRAPH}(\text{PROP_PV})$$

(PROP_PV, PROP_CONS_PV) = (0.0, 0.00), (0.1, 0.005), (0.2, 0.150), (0.3, 0.425), (0.4, 0.565), (0.5, 0.695), (0.6, 0.825), (0.7, 0.945), (0.8, 0.99), (0.9, 1.00), (1.0, 1.00)

Documento: Proporción del Consumo de Pasto verde. Es la Proporción del requerimiento del hato en Pasto verde que se consume, dependiendo de la proporción de Pasto verde en relación al Total del Pasto (Pasto verde más Pasto seco). Cuando esta proporción es menor al 15%, casi no se consume pasto verde, sin embargo, a medida que se incrementa esta relación (arriba del 60%), se incrementa el consumo de Pasto verde. Relación continua. Datos empíricos basados en la observación de los autores.

$$\text{PROP_PV} = \text{PASTO_VERDE} / (\text{PASTO_VERDE} + \text{PASTO_SECO})$$

Documento: Proporción de Pasto verde. Proporción de Pasto verde en relación al total del Pasto (PS + PV).

$$\text{TASA_PERDIDA_SENES} = \text{RANDOM}(0.08, 0.12, 147)$$

Documento: Tasa de Perdida de Senescencia. Genera un valor aleatorio entre el 8 y 12%. Proporción de Biomasa de Pasto verde perdida de sistema por mes por efecto del aire, lluvia, insectos, etc. Datos empíricos basados en la observación de los autores.

$$\text{PASTO_SECO}(t) = \text{PASTO_SECO}(t - dt) + (\text{SENES} - \text{CONS2} - \text{DESCOM}) * dt$$

$$\text{INIT PASTO_SECO} = 50000$$

Documento: Almacén de Pasto Seco (kg). El pasto seco se acumulará o desaparecerá en función de la senescencia del PASTO_VERDE, el consumo de pasto seco (CONS2) y la descomposición del pasto seco (DESCOM)

INFLOWS:

$$\text{SENES} = \text{IF MES}=12 \text{ THEN } (\text{PASTO_VERDE} - \text{CONS1} - \text{PERDIDA_SENES}) \text{ ELSE TASA_SENES} * (\text{PASTO_VERDE} - \text{CONS1} - \text{PERDIDA_SENES})$$

Documento: Senescencia. Entrada de Transferencia de Material de Pasto Seco. Es el paso de Pasto verde a Pasto seco. En diciembre (MES=12) todo el pasto verde se secará, después de realizarse el consumo por el ganado (CONS1) y restar el pasto verde que se cae de la planta al secarse (PERDIDA_SENES). Para el resto de los meses, el pasto verde existente se secará a una tasa de senescencia (Ver TASA_SENES).

OUTFLOWS:

$$\text{CONS2} = \text{IF } ((\text{PASTO_SECO} + \text{PASTO_VERDE}) / \text{AREA}) > 2100 \text{ THEN } \text{MIN}(\text{FALTANTE_PS}, \text{PASTO_SECO}) \text{ ELSE } 0$$

Documento: Consumo de Pasto seco. Salida de Transferencia de Material de Pasto Seco. Es el consumo del pasto seco (kg/mes), cuando la cantidad de Pasto seco más Pasto verde sea mayor a 2100 kg/ha, con la finalidad de dar un uso sustentable a la pradera, basados en una producción de 4200 kg/ha. Cuando la cantidad de pasto sea menor a

2100 kg/ha, no habrá consumo de Pasto seco. Aquí suponemos que el ganado primero consumirá el Pasto verde en caso de estar presente, y luego, el Pasto seco. Por lo tanto, CONS2 será la cantidad mínima entre el consumo de materia seca no satisfecho por el pasto verde (FALTANTE_PS) y PASTO_SECO.

DESCOM = if MES=3 and PP_MENSUAL > 15 THEN (PASTO_SECO-CONS2)*0.6 ELSE TASA_DESCOM*(PASTO_SECO-CONS2)

Documento: Descomposición del pasto seco. Salida de Transferencia de Material de Pasto Seco. Si el mes es 3 (marzo) y se presenta lluvia mayor a 15 mm, PASTO_SECO-CONS2 se va a descomponer al 60%, de otra forma se degradará a la tasa de descomposición dada (TASA_DESCOM, kg/mes). DESCOM incluye también la caída de hoja de la planta seca.

VARIABLES AUXILIARES DE PASTO SECO

TASA_SENES = RANDOM(0.4,0.65,147)

Documento: Tasa de Senescencia. Genera un valor aleatorio entre 0.4 y 0.65. Esto nos da una senescencia completa de 1.53 a 2.5 meses para una tasa de senescencia de 0.65 y 0.4, respectivamente. Lo anterior en ausencia de lluvias. Datos empíricos basados en la observación de los autores.

FALTANTE_PS = REQ_HATO_PS*PPS

Documento: Requerimiento del Hato no cubierto por el Pasto verde. Es la multiplicación del Requerimiento del Hato en Pasto Seco (REQ_HATO_PS) por la Proporción del Requerimiento que será proporcionado por el Pasto seco (PPS), o bien, no cubierto por el Pasto verde.

REQ_HATO_PS = CARGA_ANIM*REQ_VACA_PS

Documento: Requerimiento del Hato en Pasto Seco. Es la multiplicación del requerimiento de la vaca en Pasto Seco por la Carga Animal.

REQ_VACA_PS = REQ_ENm_PS/0.95

Documento: Requerimiento de la vaca en Pasto Seco. Es el consumo de la vaca en pasto seco (kg) al mes (NRC, 1996). Está en función del Requerimiento de Energía Neta de Mantenimiento de una UA en Pasto seco (Mcal/mes) dividido por la ENm del buffel seco (0.95/kg).

REQ_ENm_PS = PESO_MET*(0.04997*(0.95²)+0.0431)*(365/12)

Documento: Requerimiento de Energía Neta de Mantenimiento de una UA en Pasto verde en Mcal/mes. Este requerimiento está en función del Peso Metabólico de la UA (PESO_MET) y de la ENm del buffel seco (NRC, 1996). El buffel seco tiene una ENm de 0.75 Mcal/kg derivados de 44% de Nutrientes Digestibles Totales (White, L.D. and Wolfe, D. 1985), pero para predecir el consumo con mayor exactitud, se recomienda usar un valor constante de 0.95 (NRC. 1996).

PPS = (REQUER_HATO_PV-CONS1)/REQUER_HATO_PV

Documento: Proporción del Requerimiento del Hato que será cubierta por Pasto seco.

TASA_DESCOM = RANDOM(0.08,0.12,147)

Documento: Tasa de Descomposición. Genera un valor aleatorio entre el 8 y 12%. Datos empíricos basados en la observación de los autores.

SUPLEMENTO(t) = SUPLEMENTO(t - dt) + (- CONS3) * dt

INIT SUPLEMENTO = 24,000,000

Documento: Almacén de Suplemento. Se puso una cantidad exagerada (24 mil ton. de pacas) para que no se consuma en toda la simulación (21 años).

OUTFLOWS:

CONS3 = FALTANTE_SUPL

Documento: Salida de Transferencia de Material. Consumo 3. Es la suplementación mediante pacas y/o concentrados en épocas críticas (kg/mes) para dar un uso eficiente al pasto buffel, manteniendo 2100 kg de MS/ha.

FALTANTE_SUPL = If (FALTANTE_PS>PASTO_SECO) and ((PASTO_SECO+PASTO_VERDE)/AREA>2100) THEN (FALTANTE_PS-PASTO_SECO) ELSE if ((PASTO_SECO+PASTO_VERDE)/AREA<=2100) THEN FALTANTE_PS ELSE 0.

Documento: Faltante de Suplemento. Requerimiento no cubierto por el Pasto verde ni por el Pasto Seco. Si el Pasto verde más seco, es mayor a 2100 kg/ha, la diferencia de FALTANTE_PS-PASTO_SECO, se suplementará con pacas, pero si el Pasto verde más seco, es menor a 2100 kg/ha, todo el FALTANTE_PS será suplementado, con la finalidad de dar uso sustentable.