
SIMULACIÓN DE DISTINTAS ESTRATEGIAS DE ROTACIÓN DE PASTOREO

Abdala Aixa

Universidad Tecnológica Nacional - FRRO
Zeballos 1341, S2000, Argentina
aixa.a.abdala@gmail.com

Bella Sebastian Osvaldo

Universidad Tecnológica Nacional - FRRO
Zeballos 1341, S2000, Argentina
sebastian.o.bella.it@gmail.com

Darder Fernando

Universidad Tecnológica Nacional - FRRO
Zeballos 1341, S2000, Argentina
fernandodarder01@gmail.com

Guerra Bautista

Universidad Tecnológica Nacional - FRRO
Zeballos 1341, S2000, Argentina
bauguerra@gmail.com

26 de octubre de 2023

ABSTRACT

Este trabajo se centra en el análisis de diferentes estrategias de rotación de pastoreo con el objetivo de mejorar la calidad del forraje disponible y promover la salud del suelo en sistemas de producción agroganadera. Utilizando el software de simulación AnyLogic, se desarrollará un modelo que simule distintos patrones de rotación de pastoreo y evalúe su impacto en la salud del suelo. Los resultados obtenidos de esta simulación proporcionarán información valiosa para la toma de decisiones en la implementación de prácticas sostenibles de pastoreo y la optimización de la producción agroganadera.

1. Introducción

La producción agroganadera desafía a la humanidad a satisfacer la creciente demanda de alimentos y recursos naturales en un contexto de cambio climático y degradación del medio ambiente. La salud del suelo, como uno de los pilares fundamentales de la producción agrícola y ganadera, se ha convertido en un tema central en la búsqueda de prácticas sostenibles que permitan mantener y mejorar la productividad a largo plazo. En este contexto, la simulación se presenta como una herramienta valiosa para evaluar estrategias de manejo y su impacto en la salud del suelo.

La degradación del suelo, caracterizada por la disminución de la fertilidad, la erosión y la pérdida de biodiversidad, compromete la capacidad del suelo para mantener sistemas productivos resilientes y sostenibles. En este sentido, la rotación de pastoreo emerge como una estrategia crucial para mejorar la calidad del forraje disponible y promover la salud del suelo en los sistemas agroganaderos [1]. La rotación de pastoreo, que implica alternar áreas de pastoreo y descanso, no solo permite la recuperación del pasto, sino que también influye en la reposición de nutrientes y en la actividad microbiana del suelo.

La simulación computacional se ha convertido en una herramienta esencial para evaluar el impacto de diferentes prácticas de manejo en la salud del suelo y la calidad del forraje. Mediante la creación de modelos de simulación, es posible explorar y anticipar los resultados de estrategias de manejo antes de su implementación práctica. Estos modelos permiten analizar los efectos a largo plazo de las decisiones de manejo en un entorno controlado y virtual, evitando los riesgos y costos asociados con experimentos en el campo.

En este trabajo, abordaremos el desafío de mejorar la salud del suelo a través de la simulación de distintos patrones de rotación de pastoreo. Utilizaremos el software AnyLogic para diseñar y desarrollar un modelo que represente estas estrategias y sus efectos en la calidad del forraje y la salud del suelo. Nuestra investigación se basará en la literatura científica actual que respalda la importancia de la rotación de pastoreo y su relación con la salud del suelo. Al modelizar

la rotación de pastoreo y sus efectos en la salud del suelo, este trabajo contribuirá al conocimiento y la implementación de prácticas que fomenten la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas productivos.

2. Objetivos

Entre los objetivos que se propone este trabajo podemos destacar:

1. **Diseñar y desarrollar un modelo de simulación en AnyLogic que represente diferentes estrategias de rotación de pastoreo:** el primer objetivo de este trabajo es crear un modelo de simulación en AnyLogic que permita representar de manera precisa y detallada diferentes estrategias de rotación de pastoreo. Utilizando la interfaz gráfica y las herramientas de programación de AnyLogic, diseñaremos un ambiente virtual que simule las interacciones entre las vacas, las celdas de pastoreo y el suelo. Esta simulación será la base sobre la cual evaluaremos el impacto de distintos patrones de rotación de pastoreo en la salud del suelo y la calidad del forraje.
2. **Analizar cómo diferentes patrones de rotación de pastoreo influyen en la calidad del forraje disponible:** utilizando el modelo de simulación desarrollado, realizaremos múltiples iteraciones y experimentos virtuales para analizar cómo el movimiento y el tiempo de descanso de las vacas influyen en el crecimiento y regeneración del pasto. A través de mediciones y comparaciones sistemáticas, determinaremos qué patrones de rotación generan un forraje más nutritivo y sustentable.
3. **Evaluar el impacto de las estrategias de rotación de pastoreo en la salud del suelo:** el tercer objetivo se centra en comprender cómo las diferentes estrategias de rotación de pastoreo afectan la salud del suelo y la biodiversidad del ecosistema. Mediante la simulación, exploraremos cómo los patrones de pastoreo influyen en los niveles de nutrientes del suelo, la retención de humedad y la actividad microbiana.
4. **Proporcionar recomendaciones basadas en los resultados de la simulación para la implementación de prácticas de rotación de pastoreo más sostenibles:** el cuarto objetivo tiene como objetivo brindar recomendaciones prácticas para la implementación de prácticas de rotación de pastoreo más sostenibles y beneficiosas para el suelo y el ecosistema en su conjunto. Utilizando los resultados obtenidos de la simulación, identificaremos las estrategias de rotación que promueven un forraje saludable y un suelo equilibrado. A partir de estos hallazgos, formularemos directrices y recomendaciones aplicables a sistemas agroganaderos reales, con el propósito de mejorar la producción a largo plazo y la salud del medio ambiente.

3. Marco teórico

La implementación de estrategias sostenibles en la producción agroganadera se ha convertido en un imperativo en un mundo marcado por la creciente demanda de alimentos y los desafíos del cambio climático. En este contexto, la salud del suelo y la calidad del forraje adquieren una relevancia crucial para mantener la productividad a largo plazo y mitigar los impactos negativos de la degradación del suelo. A continuación, se presenta un marco teórico que abarca los conceptos esenciales relacionados con la rotación de pastoreo, la calidad del forraje y la salud del suelo.

3.1. Rotación de pastoreo

La rotación de pastoreo es una práctica esencial en la gestión de sistemas agroganaderos sostenibles. Consiste en el movimiento planificado y periódico del ganado entre diferentes áreas de pastoreo y descanso, con el propósito de optimizar la utilización de los recursos forrajeros y promover la salud del suelo. Esta estrategia busca balancear la demanda de alimento del ganado con la necesidad de regenerar el pasto y mantener la calidad del suelo. A continuación, se exploran diversas estrategias de rotación de pastoreo y sus implicaciones en la producción y el medio ambiente [2].

Entre las principales estrategias de rotación de pastoreo podemos encontrar:

- **Rotación simple:** en esta estrategia, se divide el área de pastoreo en dos o más parcelas y se alterna el ganado entre ellas en ciclos predefinidos. Por ejemplo, se puede dividir la superficie en dos partes, una para pastoreo y otra para descanso. El ganado se mueve de una parcela a otra después de cierto período de tiempo. Esta estrategia es efectiva para prevenir la sobreexplotación y permitir la recuperación del pasto, pero puede requerir una planificación cuidadosa para evitar el agotamiento de recursos en una de las parcelas.
- **Rotación intensiva:** en esta estrategia, se dividen áreas más pequeñas en subparcelas y se implementa una rotación más frecuente. El ganado se mueve con mayor regularidad, lo que permite una mayor recuperación del pasto y una mejor distribución de los desechos orgánicos. Esta estrategia es ideal para sistemas intensivos

de producción y permite un mayor control sobre el pastoreo selectivo. Sin embargo, puede requerir una mayor infraestructura para la subdivisión de las áreas de pastoreo.

- **Pastoreo basado en altura del pasto:** esta técnica implica mover el ganado a un nuevo potrero cuando la altura del pasto en el potrero actual alcanza un nivel específico. Esta altura objetivo puede variar según las necesidades de los animales y las condiciones de la pastura, pero el objetivo es evitar que el pasto sea sobrepastoreado y permitir su regeneración.
- **Pastoreo móvil:** el pastoreo móvil implica la movilización de las áreas de pastoreo en función de las necesidades del ganado y las condiciones del pasto. Se pueden usar cercas móviles o sistemas de pastoreo en franjas para guiar al ganado a través de diferentes áreas. Esta estrategia imita los patrones naturales de migración de los herbívoros y puede tener beneficios adicionales, como la mejora de la salud del suelo y la biodiversidad. Sin embargo, requiere una gestión y monitoreo constantes.
- **Pastoreo voisin:** esta estrategia se basa en la división de áreas de pastoreo en múltiples subparcelas y en la implementación de períodos cortos de pastoreo intensivo seguidos de descanso prolongado. El ganado se mueve rápidamente a través de cada subparcela y luego se le proporciona un tiempo de recuperación extenso. Esto permite un pastoreo selectivo mínimo y promueve la regeneración del pasto y la salud del suelo. Requiere una planificación precisa y una rotación cuidadosamente controlada.
- **Pastoreo de alta densidad:** esta estrategia implica concentrar temporalmente al ganado en un área pequeña y densamente poblada. El pasto es intensamente pastoreado durante un corto período y luego se permite un descanso prolongado. Este enfoque puede simular los patrones naturales de pastoreo de manadas y puede promover la fertilización natural del suelo a través de los desechos del ganado. Sin embargo, requiere una rotación ágil y una alta atención a la salud del suelo y la vegetación.

Si bien en este trabajo al diseñar el modelo de simulación en AnyLogic se pueden probar y comparar estas diferentes estrategias para evaluar su impacto en la calidad del forraje y la salud del suelo, la elección de la estrategia de rotación de pastoreo también depende de factores como el tipo de ganado, el entorno ambiental, los objetivos de producción y la disponibilidad de recursos. Cada estrategia tiene sus ventajas y desafíos, y su implementación exitosa requiere una comprensión profunda de las necesidades del sistema agroganadero y el ecosistema circundante.

3.2. Calidad del forraje

La calidad del forraje es un factor crítico en la producción ganadera, ya que influye directamente en la salud y el rendimiento de los animales. La composición nutricional y la palatabilidad del forraje pueden tener un impacto significativo en el crecimiento, la reproducción y la salud general del ganado [3] [4] [5]. La simulación de diferentes estrategias de rotación de pastoreo en AnyLogic permite analizar cómo estas estrategias pueden influir en la calidad del forraje disponible y, por lo tanto, en la productividad del sistema agroganadero.

Composición nutricional del forraje: la composición nutricional del forraje incluye la concentración de nutrientes esenciales como proteínas, carbohidratos, minerales y vitaminas. Estos nutrientes son vitales para el desarrollo adecuado del ganado y para mantener su salud. Diferentes tipos de pastos y plantas tienen perfiles de nutrientes variables, lo que puede afectar la calidad del forraje. La implementación de estrategias de rotación de pastoreo puede influir en la diversidad de especies vegetales presentes en cada área de pastoreo y, por lo tanto, en la composición nutricional del forraje consumido.

Palatabilidad y digestibilidad: la palatabilidad se refiere a la preferencia y el gusto de los animales por ciertos tipos de forraje. La digestibilidad se relaciona con la capacidad del ganado para descomponer y absorber los nutrientes presentes en el forraje. Ambos factores están estrechamente relacionados con la calidad del forraje. Algunas estrategias de rotación de pastoreo pueden promover una mayor diversidad de especies vegetales, lo que puede aumentar la palatabilidad y la digestibilidad del forraje. La rotación adecuada también puede permitir que el pasto alcance su punto óptimo de crecimiento antes de ser pastoreado, lo que puede mejorar su calidad nutricional.

Efectos de la rotación de pastoreo en la calidad del forraje: la rotación de pastoreo puede tener impactos positivos en la calidad del forraje a través de varios mecanismos:

- **Regeneración del pasto:** la rotación permite que el pasto se recupere y regenere entre períodos de pastoreo. Esto puede aumentar su densidad, vigor y contenido de nutrientes.
- **Prevención de la sobreexplotación:** al mover el ganado a diferentes áreas de pastoreo, se evita la sobreexplotación de una sola parcela. Esto puede prevenir la degradación del pasto y mantener su calidad.
- **Pastoreo selectivo:** al implementar una rotación adecuada, se puede prevenir el pastoreo selectivo excesivo de ciertas especies vegetales, lo que puede mejorar la diversidad nutricional del forraje.

Evaluación de la calidad del forraje en la simulación: en el modelo de simulación en AnyLogic, la calidad del forraje puede evaluarse utilizando métricas como el contenido de proteínas, carbohidratos y minerales en el pasto. Estos valores pueden variar según la estrategia de rotación de pastoreo implementada. Además, la palatabilidad y la digestibilidad del forraje pueden estimarse en función de la composición nutricional y las características físicas de las plantas presentes en cada área de pastoreo.

3.3. Salud del suelo y su relación con la rotación de pastoreo

La salud del suelo es un componente esencial para la sostenibilidad de los sistemas agroganaderos, ya que el suelo desempeña un papel crítico en el suministro de nutrientes, la retención de agua y el soporte estructural para el crecimiento de cultivos y pastos. La implementación de diversas estrategias de rotación de pastoreo puede tener un impacto sustancial en la salud del suelo [6] [7], afectando su estructura física, composición química y actividad biológica. Esta subsección examina en profundidad cómo la rotación de pastoreo influye en la salud del suelo y cómo se puede evaluar esta relación en el marco del modelo de simulación.

Erosión y compactación del suelo: el pastoreo continuo y sin rotación en una misma área puede llevar a la degradación del suelo a través de procesos erosivos. La remoción constante de la cubierta vegetal mediante el pastoreo y la pisoteo del ganado puede exponer el suelo a la acción del viento y el agua, resultando en la erosión de la capa superior de suelo, rica en materia orgánica y nutrientes. Además, la compactación del suelo causada por el pisoteo repetido del ganado puede reducir la porosidad y la permeabilidad, limitando la infiltración de agua y la aireación del suelo.

Ciclo de nutrientes y fertilidad del suelo: la salud del suelo depende en gran medida del ciclo de nutrientes, donde los nutrientes son tomados por las plantas y el pasto para su crecimiento, y luego regresan al suelo a través de la descomposición de residuos orgánicos. El pastoreo excesivo puede perturbar este ciclo, ya que el ganado consume pasto y nutrientes directamente del suelo, reduciendo su contenido nutricional. Esto puede agotar los nutrientes esenciales en el suelo y afectar la capacidad del suelo para sostener la productividad agrícola y ganadera.

Biodiversidad y microbiota del suelo: la biodiversidad del suelo, incluyendo bacterias, hongos, protozoos y lombrices, desempeña un papel vital en la salud del suelo. Estos microorganismos contribuyen a la descomposición de la materia orgánica, la formación de agregados del suelo y la disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, el pastoreo intensivo puede alterar la comunidad microbiana y reducir la actividad biológica en el suelo, lo que afecta negativamente la estructura y la fertilidad del suelo.

Medición de la salud del suelo en la simulación: en el modelo de simulación en AnyLogic, se pueden incorporar métricas para evaluar la salud del suelo, como la densidad aparente del suelo (indicador de compactación), la concentración de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, y la diversidad microbiana. Estas métricas pueden ser monitoreadas a lo largo del tiempo en respuesta a diferentes patrones de rotación de pastoreo, permitiendo la comparación y evaluación de estrategias.

3.4. Tiempo de descanso

El tiempo de descanso es el período (días) en el cual cada parcela luego de ser pastoreada permanece sin animales de modo de poder recuperarse de la defoliación. El descanso óptimo varía según el tipo de pastura, la intensidad del pastoreo y la estación del año.

Cada potrero o parcela de campo natural se podría pastorear hasta los 3 a 5 cm de altura del forraje y dejarlo descansar hasta que la pastura alcance los 10 cm de altura aproximadamente.

Es importante tener en cuenta que las rotaciones muy aceleradas con descansos muy cortos llevan a una menor producción de la pastura por debilitamiento de las plantas, mientras que las rotaciones demasiado largas con mucho descanso llevan a una pérdida de calidad de la pastura por madurez de la planta [8].

Para que se acumule suficiente cantidad de forraje los descansos deben ser relativamente largos en períodos de bajo crecimiento forrajero (ejemplo invierno, épocas de sequía), en cambio en épocas de alto crecimiento vegetal (ejemplo primavera) deben ser mas cortos para que la pastura acumulada no se encañe y pierda rápidamente calidad. En pasturas mejoradas el descanso oscila generalmente entre 30 a 60 días según el tipo de pastura y la estación del año.

3.5. Forma de los potreros

Los potreros de forma cuadrada son más eficientes comparados con las otras formas (torta, abanico, rectángulos estrechos) porque los animales obtienen el forraje diario en un menor tiempo, con menor caminata y pisoteo de la pastura. Otro aspecto importante es el costo en alambrado. Los potreros cuadrados suelen requerir menos material de

alambrado en comparación con formas irregulares o alargadas. Esto se traduce en un ahorro significativo en términos de inversión y mantenimiento de cercas, lo que puede ser un factor importante en la toma de decisiones para los ganaderos [8].

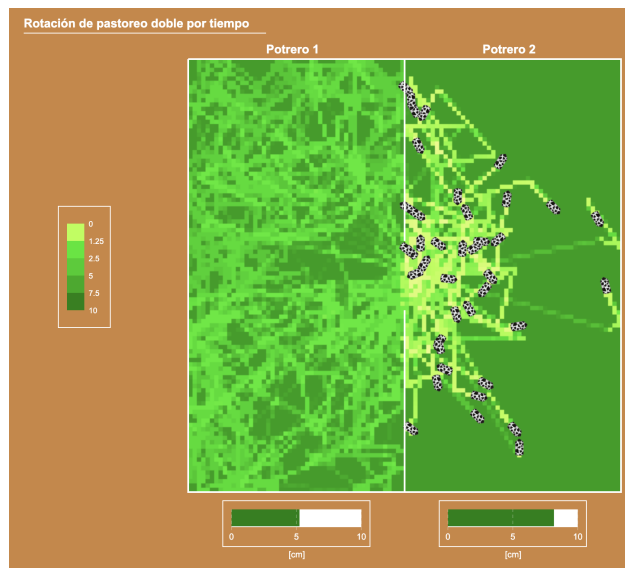
Es relevante destacar que la relación entre el largo y el ancho de un potrero también desempeña un papel crucial en la eficiencia del pastoreo. Se ha observado que los potreros con formas demasiado alargadas o con estrangulaciones, donde el largo es sustancialmente mayor que el ancho, pueden llevar a un mayor daño de la pastura debido al pisoteo constante de los animales en áreas restringidas. Por lo tanto, el diseño de potreros cuadrados o con una relación largo-ancho adecuada se presenta como una práctica recomendada en la implementación de estrategias de pastoreo rotacional eficientes y sostenibles. El potrero ideal no debería tener su largo mayor a 4 a 5 veces el tamaño del ancho.

4. Desarrollo

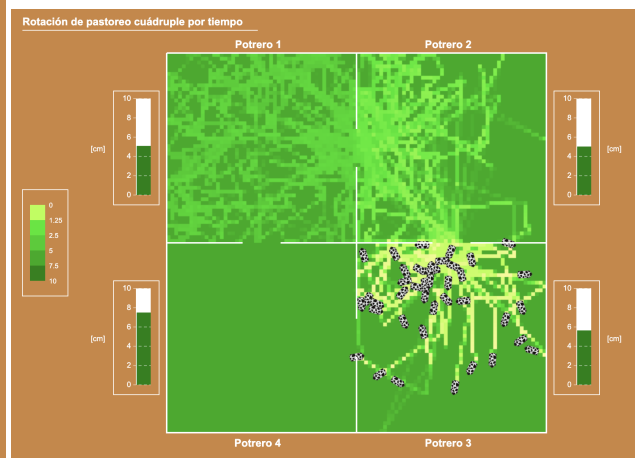
4.1. Metodología de trabajo

En esta investigación, se llevó a cabo una simulación de eventos discretos utilizando el software AnyLogic con el fin de evaluar y comparar diversas estrategias de rotación de pastoreo en un terreno dividido en potreros con una altura de pasto inicial de 7,5 cm. La simulación se desarrolló en un contexto temporal de un año, equivalente a 365 días. El enfoque principal de este estudio fue analizar cómo diferentes estrategias de rotación de pastoreo afectan la cantidad de pasto disponible, la calidad del forraje y la salud del suelo en un entorno ganadero.

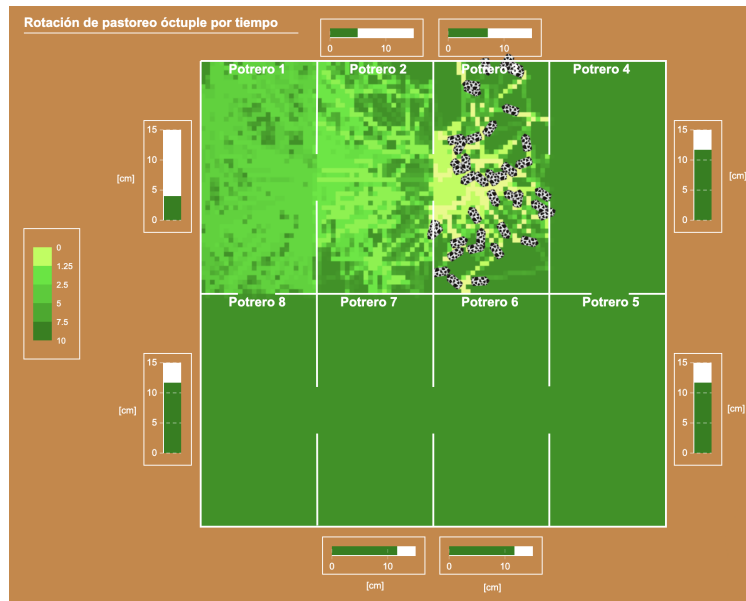
Para cumplir con los objetivos de la investigación, se crearon tres configuraciones de terreno distintas, cada una de ellas con un total de 40 vacas. Estas configuraciones incluyeron: dos potreros, cuatro potreros y ocho potreros.



(a) Simulación de pastoreo doble.



(b) Simulación de pastoreo cuádruple.



(c) Simulación de pastoreo óctuple.

En la primera configuración de dos potreros, se implementaron dos estrategias de rotación: una basada en el tiempo, donde el ganado rotaba cada 50 días, y otra basada en la altura del pasto, en la que el ganado se movía cuando el pasto alcanzaba una altura de 5 cm. Los resultados iniciales demostraron que el tiempo de rotación en ambas estrategias era comparable. Por lo tanto, en las configuraciones siguientes, se optó por mantener la rotación basada en el tiempo como enfoque principal.

Durante el proceso de simulación, se recopilaron datos sobre la cantidad de pasto disponible (medida en centímetros), la calidad del forraje (evaluada en una escala cualitativa de 0 a 10), y la salud del suelo (también evaluada en una escala de 0 a 10). En ambos casos equivale el 0 a 'extremadamente pobre' y el 10 a 'excelente'.

Con el objetivo de garantizar la robustez de los resultados, se ejecutaron múltiples repeticiones de cada configuración. Posteriormente, se procedió a un análisis de los datos recopilados para evaluar las diferencias entre las estrategias de rotación de pastoreo en términos de la cantidad de pasto, la calidad del forraje y la salud del suelo.

4.2. Comportamiento de las vacas

Como se puede observar en la Figura 1, en el inicio de la simulación, el proceso comienza con la generación de una posición inicial aleatoria para una vaca dentro del potrero. Esta posición inicial define la celda actual en la que se encuentra la vaca dentro del potrero.

Una vez que la vaca está en su celda actual, el sistema comienza a simular su comportamiento de pastoreo. En este paso, se decrementan las variables asociadas con la celda actual, lo que refleja el consumo de forraje por parte de la vaca. Esto incluye la disminución de la cantidad de pasto disponible en esa celda específica.

La simulación luego evalúa si la vaca debe rotar a otro potrero. Esta decisión puede basarse en estrategias de rotación de pastoreo específicas o en si la celda actual ya no es adecuada para el pastoreo debido a la disminución del forraje disponible.

Si se determina que la vaca debe rotar a otro potrero, la simulación la mueve al nuevo potrero correspondiente. Este paso refleja el cambio de ubicación de la vaca a un área diferente para continuar pastando. Por el contrario, si no es necesario rotar a otro potrero en ese momento, la simulación genera una nueva posición aleatoria dentro del potrero actual. Sin embargo, esta posición aleatoria debe estar dentro de los límites del potrero actual para ser válida.

En caso de que la nueva posición generada esté fuera de los límites del potrero actual, la simulación vuelve a generar una nueva posición aleatoria hasta que se encuentre una posición válida dentro del potrero. Esto asegura que la vaca permanezca dentro de los límites del potrero mientras busca un nuevo lugar para pastar.

Cuando se obtiene una posición válida dentro del potrero, la vaca se mueve a esta nueva ubicación para continuar su pastoreo en el potrero actual. Este ciclo de comportamiento de las vacas se repite hasta que se alcance el final de la simulación, momento en el cual la simulación concluye.

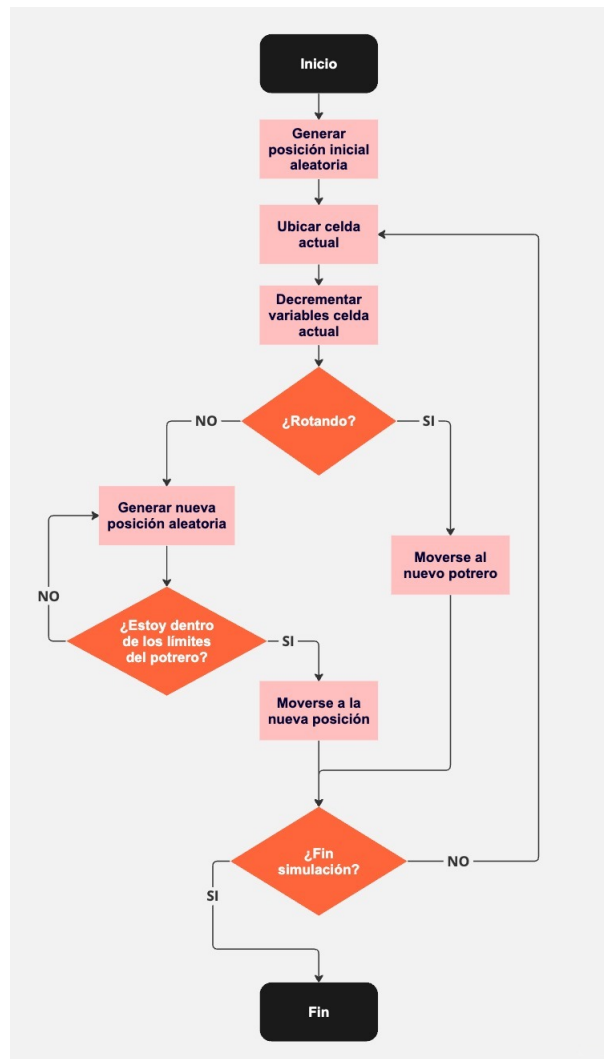


Figura 1: Mecanismo de comportamiento de vacas.

4.3. Actualización de la cantidad de pasto

En este caso se explicará el proceso para dos potreros pero se realiza de manera similar para el caso de cuatro y ocho potreros. Este proceso, descrito en la Figura 2, comienza con la inicialización de las cantidades de pasto totales para cada potrero y la cantidad de pasto total global en el inicio de la simulación. Esta inicialización asegura que todas las variables estén configuradas adecuadamente antes de comenzar el proceso de actualización.

Luego, el sistema ubica la celda actual en la que se encuentra la vaca dentro del potrero. Esta celda actual se utiliza para determinar cuánto pasto se debe agregar a las cantidades de pasto total. En el siguiente paso, el proceso suma la cantidad de pasto de la celda actual a la cantidad de pasto total global. Esto refleja el hecho de que la vaca está consumiendo el pasto de la celda actual.

La simulación luego evalúa si la celda actual pertenece al potrero 1. Si es así, la simulación agrega la cantidad de pasto de la celda actual a la cantidad de pasto total del potrero 1. Si no es del potrero 1, se asume que la celda pertenece al potrero 2, y la cantidad de pasto de la celda actual se suma a la cantidad de pasto total del potrero 2. Después de actualizar las cantidades de pasto para el potrero correspondiente, los dos caminos se unen y continúa el proceso.

La simulación luego verifica si se han recorrido todas las celdas dentro del potrero. Si todavía quedan celdas por recorrer, el proceso regresa al paso 3 para ubicar la siguiente celda y continuar actualizando las cantidades de pasto.

Cuando finalmente se han recorrido todas las celdas y se han actualizado las cantidades de pasto de acuerdo con la cantidad consumida por las vacas, la simulación calcula las cantidades de pasto promedio para cada potrero y la cantidad de pasto promedio global.

Finalmente, el proceso concluye y se alcanza el fin de la simulación. De manera análoga y en los mismos instantes se realiza la actualización de la salud del suelo y la calidad del forraje para cada potrero.

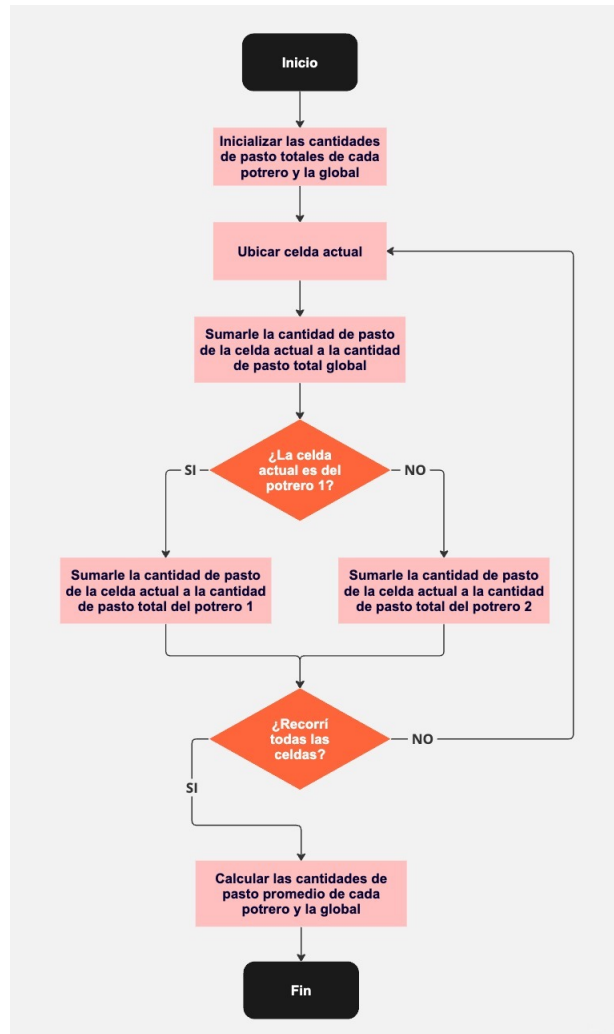


Figura 2: Mecanismo de actualización de la cantidad de pasto.

5. Resultados

Un experimento de Monte Carlo obtiene y muestra una colección de salidas de simulación para un modelo estocástico o para un modelo con parámetro(s) de variación estocástica.

Los métodos de Monte Carlo, o experimentos de Monte Carlo, son una amplia clase de algoritmos computacionales que dependen del muestreo aleatorio repetido para obtener resultados numéricos. El concepto subyacente es utilizar la aleatoriedad para resolver problemas que podrían ser deterministas en principio. Los métodos de Monte Carlo se utilizan principalmente en tres clases de problemas: optimización, integración numérica y generación de muestras de una distribución de probabilidad.

En AnyLogic, el experimento Monte Carlo permite ejecutar la simulación un número de veces, obtener la colección de salidas y verlas en forma de un histograma. Si el modelo en sí es estocástico, cada ejecución produciría una salida diferente, incluso si no se cambian los parámetros de entrada.

En este proyecto elegimos analizar los resultados siguiendo un experimento de Monte Carlo con los siguientes valores:

- Cantidad de intervalos = 10
- Tamaño inicial del intervalo = 0.5

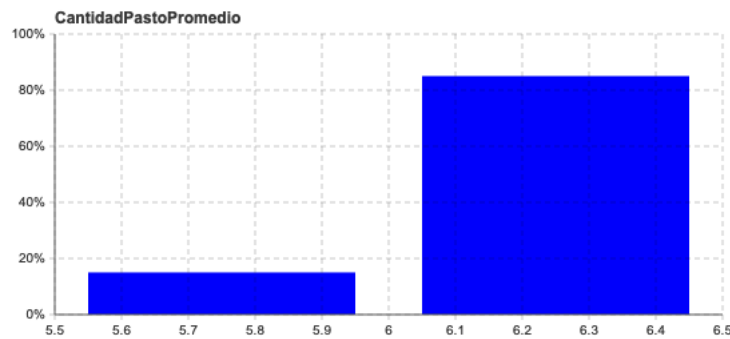


Figura 3: Resultados experimento rotación doble por tiempo.

Como se puede observar en la Figura 3, podemos afirmar que con una confianza del 85 % el valor de la cantidad de pasto promedio estará entre 6 cm y 6.5 cm. Sin embargo, existe cierta posibilidad (15 %) de que la cantidad de pasto promedio tome valores por debajo de los 6 cm, lo cual no resulta conveniente.

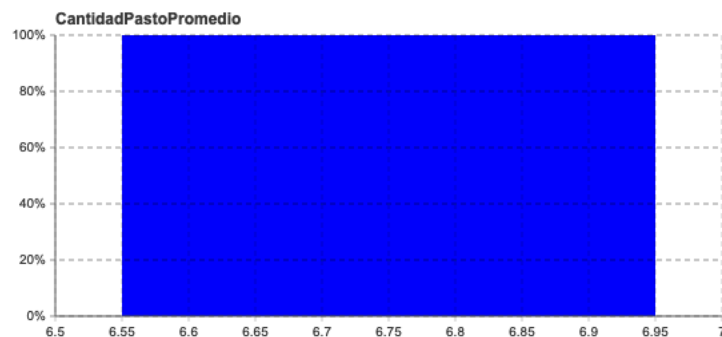


Figura 4: Resultados experimento rotación cuádruple por tiempo.

En la Figura 4, podemos observar que se puede afirmar que con una confianza del 100 % el valor de la cantidad de pasto promedio estará entre 6.5 cm y 7 cm. Por lo tanto la distribución de los cuatro potreros resulta la mas adecuada para conservar una adecuada altura del pasto sin perder excesiva salud del suelo y calidad del forraje.

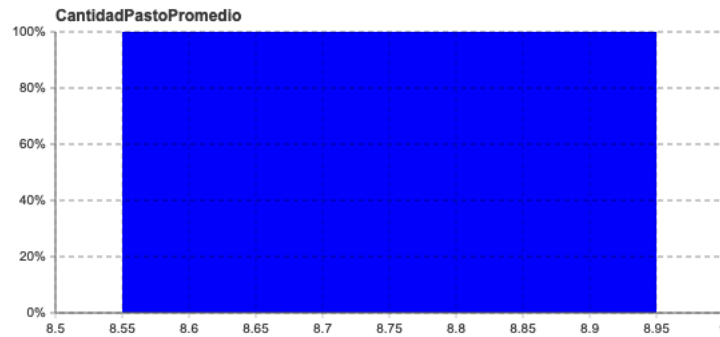


Figura 5: Resultados experimento rotación óctuple por tiempo.

Por último, en la Figura 5, podemos observar que se puede afirmar que con una confianza del 100 % el valor de la cantidad de pasto promedio estará entre 8.5 cm y 9 cm. A simple vista esto podría estar indicando una mejor alternativa a nuestra anterior distribución de cuatro potreros. Sin embargo, al realizar la simulación pudimos observar que si bien la altura del pasto se mantiene en un mejor rango de valores por momentos presenta alturas por debajo de los 5 cm y alturas por encima de los 10 cm. Este último caso, de acuerdo con [8], no resulta conveniente ya que una excesiva altura del pasto conlleva a una menor digestibilidad y palatabilidad del forraje, empeorando su calidad.

6. Conclusiones

Después de llevar a cabo cuatro simulaciones de rotación de pastoreo, hemos llegado a distintas conclusiones sobre las estrategias de manejo de pastoreo y su impacto en la salud del pasto y la calidad del forraje.

- **Comparabilidad de estrategias:** tanto la estrategia basada en el tiempo como aquella basada la altura del pasto, demostraron tiempos de rotación comparables. Esto sugiere que, en términos de frecuencia de pastoreo, ambas estrategias son igualmente efectivas, lo que brinda a los gestores de pastizales opciones flexibles para adaptarse a sus necesidades y condiciones específicas.
- **División en dos potreros:** al dividir el terreno en únicamente dos potreros, observamos que la recuperación de la salud del pasto y la calidad del forraje resultó insuficiente. La altura del pasto tampoco alcanzó niveles óptimos. Esta falta de recuperación puede ser atribuida a la presión continua ejercida por el ganado en un solo potrero a la vez, lo que subraya la importancia de la distribución eficiente de los recursos pasturales.
- **División en ocho potreros:** la división del terreno en ocho potreros, aunque aparentemente lógica en términos de distribución, llevó a la observación de un fenómeno indeseado. Los potreros que no estaban siendo pastoreados experimentaron un crecimiento excesivo del pasto, superando la altura deseable. Esta sobremaduración resulta en una pérdida de nutrientes y en la reducción de la calidad del forraje, lo que plantea interrogantes sobre la eficacia de esta estrategia en la gestión de pastizales.
- **División en cuatro potreros:** nuestros resultados indican que dividir el terreno en cuatro potreros parece ser la opción más adecuada para lograr un equilibrio entre la recuperación del pasto, la calidad del forraje y la gestión eficiente de recursos. Esta estrategia permitió un tiempo de rotación que favoreció la recuperación del pasto y la calidad del forraje, al tiempo que evitaba la sobremaduración observada en las divisiones más pequeñas.

Es crucial tener en cuenta que estos resultados se derivan de simulaciones y, por lo tanto, deben ser validados en el campo antes de aplicarlos en entornos de pastoreo reales.

6.1. Recomendaciones

Nuestras simulaciones sugieren que la división del terreno en cuatro potreros es una estrategia efectiva para el manejo de pastoreo. Esta división permite un equilibrio óptimo entre la recuperación del pasto, la calidad del forraje y la gestión eficiente de recursos. Se recomienda considerar la implementación de esta estrategia en sistemas agroganaderos para optimizar el uso de los pastizales.

Siempre es importante validar las estrategias de rotación de pastoreo en el campo antes de implementarlas a gran escala. Es recomendable realizar pruebas piloto en el sistema agroganadero para evaluar la efectividad de la división en cuatro potreros y ajustar el enfoque según las condiciones y necesidades específicas del terreno y ganado.

Por otro lado, el monitoreo constante de la salud y altura del pasto es esencial para asegurar que el sistema de pastoreo esté funcionando de manera eficiente. Los indicadores visuales y mediciones regulares de la altura del pasto pueden ayudar a tomar decisiones informadas sobre cuándo y dónde mover el ganado. La implementación de tecnología de monitoreo, como drones o sistemas de seguimiento por GPS, puede facilitar este proceso.

En última instancia, el objetivo debe ser la sostenibilidad a largo plazo en la gestión del pastoreo. Al implementar estrategias efectivas, se contribuye a la salud de los pastizales, la calidad del forraje y la productividad ganadera, al tiempo que se preservan los recursos naturales.

7. Reconocimientos y agradecimientos

Deseamos expresar nuestra gratitud hacia Clemens Dempers, CEO de Polar Analytics, una empresa finlandesa especializada en servicios y consultoría en Tecnologías de la Información.

El Sr. Dempers nos sugirió la exploración del modelo *Wildfire* en AnyLogic. Su orientación en la etapa inicial de nuestro proyecto incidió en el éxito del mismo.

Referencias

- [1] J. L. Holechek, H. de Souza Gomes, F. Molinar, and D. Galt, “Grazing studies: what we’ve learned,” 1999.
- [2] R. Hart, J. Bissio, M. Samuel, and J. Waggoner, “Grazing systems, pasture size, and cattle grazing behavior, distribution and gains,” *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, vol. 46, no. 1, pp. 81–87, 1993.
- [3] D. M. Ball, M. Collins, G. Lacefield, N. Martin, D. Mertens, K. Olson, D. Putnam, D. Undersander, and M. Wolf, “Understanding forage quality,” *American Farm Bureau Federation Publication*, vol. 1, no. 01, pp. 1–15, 2001.
- [4] C. Nelson and L. E. Moser, “Plant factors affecting forage quality,” *Forage quality, evaluation, and utilization*, pp. 115–154, 1994.
- [5] V. Pavl, M. Hejcman, L. Pavl, J. Gaisler, and P. Nežerková, “Effect of continuous grazing on forage quality, quantity and animal performance,” *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 113, no. 1-4, pp. 349–355, 2006.
- [6] J. D. Derner, A. J. Smart, T. P. Toombs, D. Larsen, R. L. McCulley, J. Goodwin, S. Sims, and L. M. Roche, “Soil health as a transformational change agent for us grazing lands management,” *Rangeland Ecology & Management*, vol. 71, no. 4, pp. 403–408, 2018.
- [7] R. C. Byrnes, D. J. Eastburn, K. W. Tate, and L. M. Roche, “A global meta-analysis of grazing impacts on soil health indicators,” *Journal of environmental quality*, vol. 47, no. 4, pp. 758–765, 2018.
- [8] C. Reinoso Ortiz, V; Soto Silva, “Cálculo y manejo en pastoreo controlado. ii) pastoreo rotativo y en franjas,” 2006.