UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Tesis de Doctor en Matemática

Un modelo matemático parametrizado con sistemas de inferencia difusa para el estudio de la dinámica poblacional del parásito *Ostertagia ostertagi* en bovinos.

Chaparro Mauro A. E.

BAHIA BLANCA ARGENTINA

2011

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Matemática, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Matemática durante el período comprendido entre octubre de 2005 y el febrero de 2011, bajo la dirección de la Dra. Graciela A. Canziani y co-dirección de la Dra. Liliana R. Castro.

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el …./…./….. , mereciendo la calificación de .....(……)

a Carla y Joaquina por alegrar

todas mis mañanas, tardes y noches.

AGRADECIMIENTOS:

Mi agradecimiento especial a mi Directora y Co-directora, Dra Graciela Canziani y Dra. Liliana Castro, por su esfuerzo y dedicación para que la realización y culminación de esta Tesis Doctoral.

A los Dres. César Fiel y Carlos Saumell por haberme presentado este fascinante problema y por compartir generosamente datos e información empírica.

Agradezco a los revisores Dr. Pablo Javcovkisy Dr. Carlos E. D´Attellis y a la Dra. Nelida Winzer por sus sugerencias útiles y aportes significativos para la mejora de este trabajo.

Mi sincero y sentido agradecimiento al Grupo de Ecología Matemática: Rosana Ferrati, Veronica Simoy, Florencia Castets, Federico Dukatz y a Claudia Marinelli y Sebastian Torcida por sus sugerencias en temas estadísticos.

Este trabajo ha sido posible gracias a una Beca Doctoral cofinanciada CONICET-UNCPBA.

Un agradecimiento muy especial para mi familia Norma, Eduardo, Marcos y Melina Chaparro.

RESUMEN

En este trabajo se desarrolla un modelo matemático con parámetros difusos para el análisis de la dinámica poblacional de los parásitos gastrointestinales *Ostertagia ostertagi* bajo diferentes condiciones climáticas.

Ostertagia es el nematode predominante en la región pampeana de Argentina. La parasitosis gastrointestinal es una de las enfermedades con mayor impacto económico, tornando ineficientes a los sistemas de producción de carne. En la región de la Pampa Húmeda, se ha estimado que se pierden anualmente unos 22 millones de dólares por mortalidad de terneros y 170 millones de dólares en perdidas sub-clínicas.

El modelo está compuesto por dos módulos. El primer módulo se compone de dos modelos para los estadios de vida libre y el otro módulo consiste de dos modelos para el estadio parasitario.

Cada uno de los modelos está formulado en términos de ecuaciones en diferencias con paso diario. Los parámetros para todos los modelos son formas funcionales definidas por sistemas de inferencia difusa, los cuales incorporan información cualitativa y cuantitativa de los procesos involucrados. Estos parámetros difusos tienen la suficiente flexibilidad para replicar las condiciones de campo, particularmente las climáticas, las cuales son fundamentales para el desarrollo de estrategias de control.

El modelo completamente integrado es capaz de evaluar posibles escenarios a los que los sistemas de producción se pueden enfrentar, dando una rápida respuesta a cerca de la dinámica de la infección. También el modelo permite simular control parasitario. Se considera que el efecto de un tratamiento con antihelmínticos afecta directamente a la población de parásitos adultos (*Ad*) y a la cantidad de huevos por gramos de materia fecal (*HPG*). Por ejemplo, se puede suponer que cuando el antihelmíntico es el más efectivo, el HPG y la población *Ad*, caen a casi 0. Por lo tanto es posible analizar el impacto de diferentes estrategias de control parasitario, simulado eficiencia y/o retardo de diferentes drogas sobre la dinámica de la infección en la pastura así como en la población de parásitos dentro del hospedador. Así, es posible generar un conjunto de simulaciones en las que se modifica el momento del año en el que se produce el tratamiento antihelmíntico y deducir cuál es el patrón de aplicación más eficiente. El modelo puede ser una buena herramienta para la generación de nuevas estrategias de desparasitación, las cuales pueden tener un impacto económico importante para las diferentes áreas de producción ganadera del país.

ABSTRACT

A mathematical model with fuzzy parameters was developed for the analysis of the population dynamics of gastrointestinal parasites *Ostertagia ostertagi* under different climatic conditions.

Ostertagia spp., is the predominant nematode in the pampas' region of Argentina. Gastrointestinal parasitism is one of the diseases that have the highest economic impact on the Argentinian beef production system, rendering it inefficient. In the region of the Humid Pampas, it has been estimated that some 22 million dollars are lost annually because of the death of calves and 170 million dollars are lost in sub-clinic costs.

The model is composed by two modules. A first module is composed by two models for the free- living stage while the second module consists of two models for the parasitic stage.

The models are formulated in terms of a system of difference equations with daily time-step. In all models, the parameters are functional forms defined through fuzzy rule based systems

which incorporate both quantitative and qualitative information on the processes involved. These fuzzy parameters allow for the flexibility needed when attempting to replicate field conditions, particularly weather conditions, which are fundamental for developing any control strategy.

The completely integrated model is able to evaluate possible scenarios that a meat production system could face, giving a rapid answer about the infection dynamics. The scenarios may be as diverse as wished. Also, the model allows simulating worm control. We can consider the effect of an anthelmintic suppression treatment on the population of adult parasits (*Ad*) and the series of egg per grams of dung (*EPG*) values by, for example, supposing that when the anthelmintic is most effective, the *EPG* and adult population *Ad* count falls almost to 0. Therefore it is possible analyze the impact of different strategies of parasite control, simulating the efficiency and/or delay of various drugs on the dynamics of pasture infection. For example, it is possible to generate a set of simulations by varying the time of year of the sequence of application of a medical treatment with drugs and to infer which pattern is more efficient. The model can be a tool for generating new strategies for deworming, which can have an important economic impact if talking into account the area of the cattle production region in our country.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN **1**

Organización de la tesis 4

I. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA **5**

1.1. Aspectos generales 5

1.2. Ciclo de vida 6

1.2.1 Fase de vida libre 6

1.2.2 Fase parasitaria 7

II. LÓGICA DIFUSA Y SISTEMAS DE INFERENCIA DIFUSOS. **9**

2.1 Inicios de la lógica difusa 9

2.2 Conceptos básicos sobre conjuntos difusos 9

2.3. Operaciones básicas sobre conjuntos difusos 11

2.4. Razonamiento aproximado 14

2.5. Sistemas de inferencia difusa 16

2.6. Sistemas difusos como aproximadores universales 18

III. TIEMPOS DE DESARROLLO DE HUEVO A LARVA INFECTANTE **20**

3.1. Introducción al problema 20

3.2. Descripción del modelo 21

3.2.1. Parametrización del modelo 22

3.2.1.1. Longitud de eclosión $l_0(T_t)$ 22

3.2.1.2. Longitud de larva infectante $l_{L3}(T_t)$ 24

3.2.1.3. Tasa de desarrollo diario $r(T_{(t+a)})$ 24

3.3. Validación del modelo usando datos de campo 26

3.4. Respuesta del modelo a variaciones en la secuencia de temperaturas 27

3.5. Resultados 29

3.5.1 Simulaciones y datos de campo 29

3.5.2. Respuesta del modelo a las variaciones en la secuencia de temperaturas 30

3.5.2.1. Efectos en el orden de la secuencia de temperaturas 30

3.5.2.2 Efectos en la amplitud del rango 32

3.6. Discusión 32

3.7. Conclusiones 33

IV. DINÁMICA POBLACIONAL DE ESTADIOS DE VIDA LIBRE. **35**

4.1. Introducción al problema 35

4.2. Descripción del modelo. 36
4.2.1. Reclutamiento de larvas *L*3 a la población de larvas disponibles para migrar a la pastura....37
4.2.2. Supervivencia de las *L*3 en la bosta en espera de la ocasión para migrar..38
4.2.3. Migración de *L*3 y dinámica de la población de *L*3 en la pastura....38
4.3. Parametrización del modelo....39
4.3.1. Tasa de mortalidad preinfectiva....39
4.3.2. Migración de *L*3 y dinámica de la población de *L*3 en la pastura....40
4.3.3. Mortalidad en la pastura....42
4.4. Validación y análisis del modelo 42
4.4.1 Validación del modelo utilizando datos de campo 42
4.4.2. Análisis de la respuesta del modelo a variaciones en las condiciones ambientales. 44
4.5. Implementación del modelo....45
4.6. Resultados numéricos 45
4.6.1. Presencia de *L*3 en las pasturas....45
4.6.2. Análisis de la respuesta del modelo a variaciones de condiciones ambientales. 48
4.7. Discusión....50
4.8. Conclusiones....54
V. ETAPA PARASITARIA: HIPOBIOSIS, UNA ESTRATEGIA DE SUPERVIVENCIA.....55
5.1. Introducción al problema 55
5.2 Descripción del modelo 57
5.2.1. Modelo para la población de larvas infectivas en la pastura 58
5.2.2. Modelo para el cálculo de número de adultos en el hospedador 59
5.3. Modelo para el cálculo de la proporción de *L*3 inhibidas....60
5.3.1. Tiempo de exposición....61
5.3.2. Temperatura media diaria 61
5.3.3. Fotoperíodo diario....61
5.3.4. Proporción de *L*3 inhibidas....62
5.4. Desinhibición 62
5.5. Validación del modelo en condiciones de campo....64
5.6. Respuesta del modelo a perturbaciones en las variables de entrada....64
5.6.1 Variaciones en temperaturas....65

5.6.2 Variaciones en fotoperíodos 65
5.6.3 Variaciones en la ingesta de larvas infectivas 66
5.6.4. Disponibilidad estacional de larvas en la pastura 66
5.7. Resultados 67
5.7.1 Validación del modelo en condiciones de campo 67
5.7.2. Variaciones en temperaturas 68
5.7.3. Variaciones en fotoperíodos 70
5.7.4. Variaciones en la ingesta de larvas infectivas 72
5.7.5. Disponibilidad estacional de larvas en la pastura 74
5.7.5.1 Verano y otoño 74
5.7.5.2 Invierno 75
5.7.5.3 Primavera 75
5.8. Discusiones y conclusión 76
VI. CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE HUEVOS EN RELACIÓN A LAS CARGAS PARASITARIAS 79
6.1. Introducción 79
6.2. Descripción del modelo 80
6.3 Parametrización del modelo 80
6.3.1 Edad del hospedador 80
6.3.2 Carga parasitaria 80
6.3.3 Época del año 81
6.3.4 Huevos por gramo de materia fecal (HPG) 81
6.3.5 Reglas 81
6.4 Validación del modelo con datos de campo. 82
6.5 Resultados 83
6.6 Conclusiones y Discusión 85
VII. CONTROL PARASITARIO A TRAVÉS DE TRATAMIENTOS ESTRATÉGICOS 87
7.1. Introducción 87
7.2. Propuestas estratégicas para el control de parasitosis por *Ostertagia ostert*agi 89
7.3 Resultados 89
7.3.1 Tandil, provincia de Buenos Aires ($\bar{X}$=14°C; *LL*=888 mm): 89
Calendario propuesto de desparasitaciones. 90
7.3.2 Reconquista, provincia de Santa Fe ($\bar{X}$=19.5°C; LL=1408 mm): 94

Calendario propuesto de desparasitaciones......94
VIII. CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJO FUTURO.....99
***BIBLIOGRAFÍA*.....102**
Currículum Vitae del Autor.....107

INTRODUCCIÓN

La historia muestra que la Matemática ha sido aplicada a la Biología desde la Antigüedad clásica. Probablemente el primer registro de un matemático que formalizara esta relación fue Leonardo de Pisa, Fibonacci, quien propuso en el *Liber abacci* un problema sobre una población de conejos cuya solución se daría en términos de ecuaciones en diferencias para representar la dinámica de la población. Desde luego que el propósito de Fibonacci era más de índole matemática que útil para elucidar un problema biológico, dado que las hipótesis eran poco realistas. Igualmente discutibles fueron las hipótesis que llevaron a Thomas Robert Malthus (1798) a plantear su modelo de crecimiento exponencial de las poblaciones, generando amplios debates en la sociedad de su tiempo. Posteriormente, el matemático belga Pierre-François Verhulst (1838) introdujo el concepto de crecimiento limitado por restricciones ambientales dando lugar al modelo logístico que respondió a las objeciones surgidas a raíz del modelo malthusiano.

Más cerca de nuestro tiempo, el matemático italiano Vito Volterra (1926) planteó un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias para responder a una pregunta de su yerno biólogo Umberto D'Ancona sobre cambios en la abundancia relativa de especies de peces predadores y sus presas antes, durante y después de la Primera Guerra Mundial. Su publicación hecha en 1926, en forma independiente pero simultánea con la publicación de un modelo similar por parte de Alfred J. Lotka (1925) en EEUU, está considerada como el inicio de la Edad de Oro en la Ecología Matemática.

Los modelos matemáticos poblacionales son necesariamente una representación simplificada de características esenciales de una población. No se pretende que un modelo refleje cada uno de los factores que contribuyen a la dinámica de una población dada porque serían intratables. Pero se pretende que incluyan todo lo relevante de manera que pueda apreciarse cómo los factores intrínsecos y extrínsecos más importantes actúan sobre la dinámica de la población.

A pesar de que a veces los modelos son sobresimplificaciones de los problemas, la Matemática utilizada y desarrollada para la construcción de modelos en Biología ha sido beneficiosa para ambas ciencias. Desde la Biología presentando problemas en los que son necesarias conjunciones o nuevas teorías matemáticas para la búsqueda de soluciones, y por parte de la Matemática, dando la posibilidad de, por ejemplo, orientar la realización de nuevos experimentos y observaciones, generar un marco de referencia, sistematizar la recolección de datos clarificar hipótesis y cadenas de argumentos en discusiones, identificar componentes claves, ayudar a extrapolar escalas temporales o espaciales grandes, o proponer hipótesis tentativas.

Según B. Bredeweg, P. Salles y M. Neumann (2003) "*El propósito fundamental de la investigación en Ecología es comprender la estructura y el funcionamiento de la Naturaleza. La estructura la dan objetos tales como individuos, poblaciones y comunidades, y su relación con el entorno físico, organizado en ecosistemas y paisajes. El funcionamiento se explica estableciendo relaciones causales a través de las características observables de estos objetos de manera que sea posible comprender por qué ocurren".* Y agregan: *"Las dificultades surgen de la complejidad de los ecosistemas y de la falta de buenos datos".*

Los modelos matemáticos en Ecología Teórica son una herramienta poderosa que permite incrementar el conocimiento que pueda tenerse de las complejas dinámicas poblacionales en los sistemas naturales. Los modelos matemáticos en Ecología son de muy diversa naturaleza y utilizan técnicas y conceptos matemáticos de todo tipo, a los que podríamos imaginar como componentes de una caja de herramientas. La elección y el uso de cada una ellas dependerá de la situación o problema a modelar. La combinación de diferentes herramientas matemáticas es probablemente una de las prácticas más habituales y más efectivas al momento de modelar. La creatividad y la comprensión del funcionamiento de cada uno de los elementos matemáticos a usar son fundamentales para que el modelador pueda lograr un resultado adecuado y confiable. Así, los modelos pueden ser en tiempo discreto o continuo, agregados o estructurados, con y sin retardos, densodependientes o no, espacialmente explícitos o no. Lo importante es que el modelo sea bueno, y los buenos modelos son los que muestran como ocurren los procesos y permiten descifrar los mecanismos que los gobiernan.

Aunque muchas poblaciones pueden ser modeladas de forma agregada, a veces es necesario hacer una diferencia entre los individuos de la población. Para ello se define una estructura que permita distinguir los individuos en los distintos estados en que se los puede encontrar y que resulten significativos para el ciclo de vida. El construir un modelo estructurado en edades enfrenta al modelador con la necesidad de poder poner mayor detalle en la contribución de cada clase etaria y de confrontar los cambios demográficos asociados con la variación de la estructura etaria de la población. (*Nisbet y Gurney, 1998*).

Uno de los modelos clásicos de estructuras etarias en tiempo continuo es el de *McKendrick-von Foerster.* Con él se puede describir la dinámica de una población estructurada en edades a lo largo del tiempo, formulándola a través de una ecuación diferencial en derivadas parciales. La ecuación de *McKendrick-von Foerster* se puede extender a los casos en que la estructura de interés de la población está dada por estadios, talla, o bien edad y talla. La principal limitante de la aplicación de estos modelos es la determinación de sus parámetros y la dificultad de encontrar sus soluciones analíticas para su posterior análisis, con lo cual en la mayoría de los casos se hace necesario recurrir a soluciones numéricas.

En Parasitología, los modelos matemáticos se utilizan generalmente para describir la dinámica poblacional de un amplio espectro de relaciones entre parásitos y hospedadores. De

manera muy general y según su propósito los podríamos dividir en tres tipos: en relación a humanos, animales de granja y animales salvajes. Estos últimos dos varían considerablemente entre sí, ya que el medio y los hospedadores en donde se desarrolla la parasitosis son sustancialmente distintos. Todos los modelos comparten el objetivo de estimar cantidades umbrales para la determinación de comportamientos a largo plazo de las poblaciones de parásitos. Esto permite generar estrategias de control en la población para que la parasitosis no represente un problema para la población hospedadora.

Desde un punto de vista mas especifico, el modelo que aquí desarrollamos se enmarca en los del tipo "*modelos de parásitos gastrointestinales de animales de granja rumiantes con estadios de vida libres*". En este caso, el mayor problema surge de la variabilidad de la duración de las distintas fases del ciclo de vida del parásito y de las variables que regulan cada una de estas fases, impactando directamente esto en la dinámica y las tasas vitales de la población.

Los diversos factores que influyen sobre los parámetros se pueden diferenciar en aquellos *ambientales* (temperatura, humedad, precipitaciones, fotoperíodo) y aquellos relacionados con *el sistema de producción* propiamente dicho (peso y edad de cada animal, número de animales en los potreros, estado sanitario de los animales y las pasturas).

Los estudios realizados para la obtención de datos epidemiológicos de una región en condiciones naturales son generalmente orientados a la descripción y análisis estadístico de aspectos claves de la parasitosis y no pensados para la construcción de un modelo matemático; en consecuencia los datos disponibles no siempre son los más adecuados. Por otra parte, en una forma más general, se puede decir que la información obtenida de diversos estudios puede ser tanto objetiva (cuantitativa) como subjetiva (cualitativa), es decir tanto medida como recogida de la opinión o el conocimiento del "experto". Dado que no todos los parámetros son medibles, en muchos casos se hace necesario trabajar con una mezcla subjetiva o ponderada de conocimiento cuantitativo y cualitativo. El conocimiento obtenido a partir de la experiencia de muchos años de investigación es valioso, pero muchas veces no es fácilmente cuantificable y no puede ser incorporado a modelos matemáticos de tipo clásico (por ejemplo, ecuaciones diferenciales).

La modelización basada en teoría de conjuntos y lógica difusa permite vencer este obstáculo. Es una extensión de los métodos convencionales que permite utilizar datos imprecisos, heterogéneos o inciertos. De esta forma, la modelización basada en lógica difusa es una herramienta muy adecuada para explorar problemas biológicos complejos y no lineales.

El problema que aquí presentamos no está exento de estas consideraciones, y es por esto que hemos decidido complementar herramientas clásicas haciendo uso de lo difuso. Debido a la naturaleza de los datos disponibles, se tiene una clara ventaja para lograr una buena generalidad en la construcción del modelo. Creemos que esta nueva manera de mirar la

información, aceptando que la imprecisión es una parte significativa en el desarrollo del conocimiento científico.

Organización de la tesis

La tesis está organizada de la siguiente manera:

En el **Capítulo I** de este trabajo se describe el ciclo de vida de *Ostertagia ostertagi* mencionando cuáles son los problemas que este parásito produce en los sistemas de producción de carne. El **Capítulo II** introduce algunos conceptos básicos utilizados en el trabajo sobre la teoría de conjuntos y lógica difusa, se describen las operaciones con conjuntos difusos y los distintos componentes de un sistema de inferencia difuso. En los **Capítulos III, IV, V y VI** se describen y desarrollan los modelos de las distintas fases del ciclo de vida. En el **Capítulo VII** se plantean y analizan distintas estrategias de control con el modelo completamente integrado. En el **Capítulo VIII** se presentan las conclusiones finales y el trabajo futuro a desarrollar.

I. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA

1.1. Aspectos generales

La parasitosis gastrointestinal bovina es una de las enfermedades con mayor impacto económico en los sistemas de producción de carne. Usualmente se observa que las pasturas, el lugar natural en el que se alimentan los animales en Argentina, están infectadas por distintos géneros de nematodos.

Se debe tener en cuenta que no siempre la enfermedad se hace fácilmente visible, presentándose inicialmente en forma subclínica, siendo esta etapa la más difícil de detectar ya que el animal no presenta indicios en su aspecto exterior. En caso de llevar un control más cercano del rodeo, se observa que el animal no gana peso e incluso llega a tener pérdidas estimadas entre 15 y 20 Kg. durante el otoño–invierno. La forma clínica presenta a los animales con un aspecto exterior de un animal claramente enfermo (falta de estado, diarrea, deshidratación, pelo hirsuto y/o arratonado, edemas en las mandíbulas). Las pérdidas de peso se estiman entre los 30 y 50 Kg. Si los animales no son tratados, las pérdidas son muy grandes, llegando a la muerte. La pérdida de peso en los animales afectados por los endoparásitos, no es recuperada luego del tratamiento antiparasitario (Entrocaso y Steffan, 1981; Steffan y col. 1982). En consecuencia, es necesario mantener a los animales mayor tiempo en la pastura para lograr el peso de faena, y compensar la falta de desarrollo corporal adecuado para el servicio de vaquillonas, lo cual torna ineficiente al sistema de producción. En la República Argentina, los bovinos son alimentados en pasturas naturales durante todo el año. En consecuencia, la carga animal en los potreros en los que se alimenta al rodeo juega un papel fundamental ya que cuando la disponibilidad forrajera es baja, producto del sobrepastoreo, obliga a los animales a comer más cerca de las bostas ingiriendo grandes cantidades de larvas de parásitos (Entrocaso, Steffan, 1981; Nansen y col., 1978; Steffan y col., 1982).

Los parásitos gastrointestinales están representados por ocho géneros, de los cuales *Ostertagia ostertagi*, localizado en el cuajo, y *Cooperia spp.,* en intestino delgado son sin lugar a dudas los predominantes (Fiel y col., 1994) (Tabla 1.1), siendo el primero más frecuente en zonas templadas y el segundo en los climas más calurosos y húmedos.

Se ha estimado que en la Pampa Húmeda se pierden aproximadamente 22 millones de dólares en mortandad de animales, a los que se suman 170 millones de dólares en pérdidas subclínicas por año (Fiel y col., 1988).

Nombre	Ubicación	Tamaño adulto(mm)	Efecto patogénico
Haemonchus placei	Abomaso	Hembra: 18-30 Macho: 10-20	Succiona sangre, tanto en los estadios larvales como adulto. Puntillado hemorrágico. Anemia
Ostertagia ostertagi	Abomaso	Hembra: 8-9.2 Macho: 6-7.5	Adultos e inmaduros dañan la mucosa abomasal, afectando la función digestiva. Lesiones nodulares umbilicadas
Trichostrongylus axei	Abomaso	Hembra: 3.5-8 Macho:2.5-6	Áreas de necrosis localizadas (lesiones crateriformes)
Trichostrongylus columbriformis	Intestino delgado	Hembra: 5-7.2 Macho:4-5.5	Altas cargas causan congestión y enteritis catarral erosionando la superficie epitelial.
Cooperia oncophotora, punctata, pectinata	Intestino delgado	Hembra:6-8 Macho:5.5-9	Los adultos interfieren en la actividad digestiva. Generalmente complican el cuadro iniciado por Ostertagia en el cuajo
Nematodirus helvetianus	Intestino delgado	Hembra:18-25 Macho:11-17	Una alta carga puede interferir en la absorción intestinal.
Oesophagostomum radiatum	Ciego y colon	Hembra: 16-22 Macho: 14-17	Formas inmaduras producen nódulos en la pared intestinal, que suele abscedarse (grano en la tripa)

Tabla 1.1: Características generales de los nematodos más patogénicos

1.2. Ciclo de vida

Los estadios del ciclo de vida son: huevo-*L*1-*L*2-*L*3 (o larva infectante)-*L*4-adulto (*L*5). Por otra parte el ciclo de vida se divide en dos fases, la "de vida libre" y la "parasitaria". La fase que se produce en el ambiente es la de vida libre o "no parasitaria"; es importante notar que en esta fase se encuentra el 90% de la población total de los nematodes del sistema.

1.2.1 Fase de vida libre

La fase no parasitaria comienza cuando caen los huevos contenidos en la materia fecal sobre la pastura. En esta fase *Ostertagia* pasarán por tres estadios: larva 1 (*L*1), larva 2 (*L*2) y larva infectante (*L*3). Bajo condiciones apropiadas de humedad y temperatura, los huevos eclosionan en no más de 2 días (Pandey, 1972) dando origen a la larva 1. Es de destacar que el tiempo de eclosión de los huevos está fuertemente relacionado con la temperatura

ambiente. Si los registros están por debajo de los 4°C, la eclosión no se produce (Pandey, 1972).

La *L*1 tiene un período de activad en el que se alimenta de hongos y bacterias, que están presentes en las heces. Luego de almacenar energía en sus células intestinales, muda al estadio *L*2, cambiando la cutícula que la recubre. Las *L*2 tienen los mismos hábitos alimenticios que las *L*1. En estos dos estadios la movilidad de las larvas es escasa, y son los estadios más vulnerables a las condiciones ambientales. Luego de un período en el que continúa alimentándose, la *L*2 muda a *L*3. En esta muda mantiene la cutícula de *L2* y desarrolla por fuera una nueva, que la protegerá de las condiciones ambientales adversas pero al mismo tiempo le impedirá seguir alimentándose. La larva infectante aumenta su movilidad y surge entonces la necesidad de tener que migrar a la pastura para ser ingerida por el bovino y poder continuar con su desarrollo (Fiel y col., 1994). Es necesario destacar que las condiciones dentro de la bosta son suficientes para que todo este desarrollo se produzca.

Para que las *L*3 puedan emigrar a las pasturas tiene que llover. Esto es necesario ya que a pesar de la gran movilidad de las *L3*, necesitan de una película acuosa para trasladarse fuera de la bosta. Si la temperatura en la que se produjo la deposición fue alta, se forma en la bosta una costra que impedirá la migración de la *L3*. Se demostró que con una lluvia intensa de 50 mm o bien una lluvia menor pero de mayor duración, es suficiente para reblandecer esta costra, dando así lugar a la emigración a las pasturas (Fiel y col., 1988).

La autoinfestación se produce cuando el bovino ingiere *L3* de la pastura. La supervivencia de estas larvas en la pastura depende en gran parte de cómo administre la energía acumulada en las fases anteriores y de la habilidad que tenga para lograr ser ingerido.

La supervivencia de la *L3* en la pastura depende de las condiciones climáticas. Los tiempos de supervivencia son altamente variables. Las condiciones climáticas del invierno hacen que el gasto energético sea muy bajo, y por lo tanto aumente su tiempo de supervivencia en la pastura. El comportamiento en verano es el de una la larva muy activa y en consecuencia agota rápidamente la energía acumulada.

1.2.2 Fase parasitaria

Una vez que la larva es ingerida, se desprende de la envoltura exterior. Dependiendo del tipo de parásito, esto ocurre en el abomaso o en el rumen. Luego penetra en la mucosa gastrointestinal (fase histótropa) y aumenta de tamaño mudando varias veces. El período de

prepatencia[1] es de aproximadamente 3 semanas, salvo que ocurra la inhibición del desarrollo (hipobiosis) en el que el período se extiende desde 2 hasta 5 meses. Cuando estas *L3* infectan a un hospedador se inhiben en los tejidos del hospedador como *L4* tempranas (*L4i*). En el caso de no detener su desarrollo, transcurridos cuatro días de esta fase histótropa, *Ostertagia o.* muda al estadio larval 4 (*L4*), madura rápidamente y emerge a la luz del abomaso completando su desarrollo y convirtiéndose en adulto (*L5*). Las primeras hembras grávidas se pueden encontrar alrededor del día quince post-infección, mientras que los huevos de estas hembras aparecen en la bosta cerca del día veinte post-infección.

Cada hembra parásito puede poner varios miles de huevos a lo largo de su vida, que varía en un período de cuatro semanas a doce meses.

[1] El período de prepatencia, que es el tiempo que transcurre desde que el hospedador ingiere una forma infectante (larva, huevo) y la salida del primer huevo en heces

II. LÓGICA DIFUSA Y SISTEMAS DE INFERENCIA DIFUSOS.

2.1 Inicios de la lógica difusa

La Teoría de conjuntos difusos fue desarrollada por L.A. Zadeh (1965) a mediados de la década de los 60. Las tesis que propone surgen del estudio de pensadores de distintas disciplinas que, como él, tenían una visión de los problemas diferente de la que ofrece la lógica tradicional. La paradoja del conjunto de Bertrand Russell, el principio de incertidumbre de la física cuántica de Werner Heisenberg (1927), la teoría de los conjuntos vagos de Max Black (1937) y el aporte de Jan Lukasiewiz, influyeron para que Zadeh publicase el ensayo "Fuzzy Sets" en la revista *"Information and Control"* y tres años después, en 1968, *"Fuzzy Algorithm"*. La intención de Zadeh era la creación de un formalismo para manejar de forma más eficiente la imprecisión del razonamiento humano. Es en 1971 cuando realiza la publicación de *"Quantitative Fuzzy Semantics"* en donde aparecen los elementos formales que dan lugar a la metodología de la lógica difusa y de sus aplicaciones tal y como se conocen en la actualidad.

Nuevos campos de investigación se establecieron rápidamente en torno a este nuevo concepto. Algunos de ellos son razonamiento aproximado, reconocimiento de patrones, modelado difuso, aritmética difusa, sistemas expertos, control difuso, estadística y probabilidad difusa.

2.2 Conceptos básicos sobre conjuntos difusos

Un conjunto clásico es normalmente definido como una colección de elementos. Si llamamos a X conjunto universo, entonces cada uno de los elementos de X puede pertenecer o no a un subconjunto $A \subseteq X$. De esta manera se puede establecer la veracidad o falsedad de la proposición "x pertenece a A". Estos conjuntos clásicos pueden describirse de dos maneras: listando los elementos que pertenecen al conjunto o bien definir una función característica del conjunto, la cual toma el valor 1 si el elemento pertenece al conjunto y 0 si no pertenece (Figura 2.1*(a)*).

En términos formales, un conjunto difuso $A \subseteq X$ es un conjunto de pares $(x, \mu_A(x))$ donde x pertenece a X y $\mu_A(x)$ es un número que representa el grado de membresía de x al conjunto A, que no es necesariamente 1 o 0 (Figura 2.1*(b)*).

A $\mu_A(x)$ la llamamos *función de membresía* de x en A. Esta función mapea el conjunto X al espacio de membresía M. Cuando M sólo consiste de los puntos {0, 1}, entonces el conjunto no es difuso y $\mu_A(x)$ es la función característica de un conjunto clásico. El rango de la función

de membresía es un subconjunto de números no negativos cuyo supremo es finito. Un conjunto difuso no vacío *A* lo denominaremos normal si $sup_x\ \mu_A(x) = 1$. En consecuencia de la definición del rango de membresía podemos afirmar que es posible normalizar cualquier conjunto difuso no vacío. La siguiente definición nos permitirá caracterizar el conjunto de elementos que tienen grado de membresía distinto de cero.

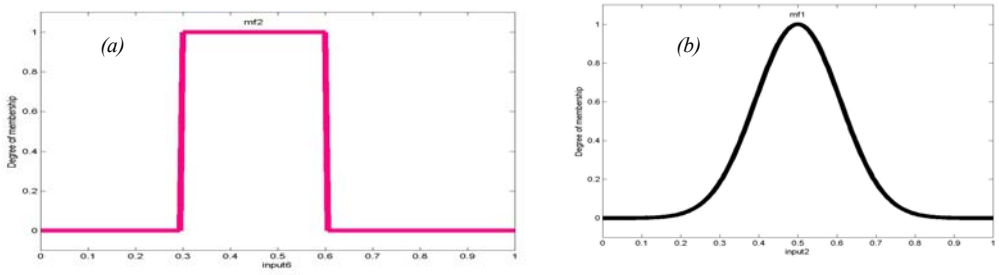


Figura 2.1: Representación de un conjunto "clásico"(a) y un conjunto difuso en el que μ(x) es una función del tipo gaussiana (b).

Definición 2.2.1: El soporte de un conjunto difuso A, S(A), es el conjunto de todos los $x \in X$ *tales que* $\mu_A(x)>0$.

Una generalización de la definición anterior, es la noción de α-corte.

Definición 2.2.2: El conjunto de todos los elementos que pertenecen al menos con grado α *al conjunto difuso A, es llamado conjunto* α*-corte, es decir:*

$$A_\alpha = \{x \in X / \mu_A(x) \geq \alpha\}$$

El conjunto $A_\alpha = \{x \in X / \mu_A > \alpha\}$ es llamado *conjunto* α*-nivel fuerte.*

La convexidad juega un papel importante en la teoría de conjuntos difusos que definiremos más adelante. Las condiciones de convexidad de un conjunto difuso hacen referencia a las funciones de membresía (Figura 2.2).

Definición 2.2.3: Un conjunto difuso A es convexo si

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)), \qquad \forall x_1, x_2 \in X, \quad \forall \lambda \in [0,1].$$

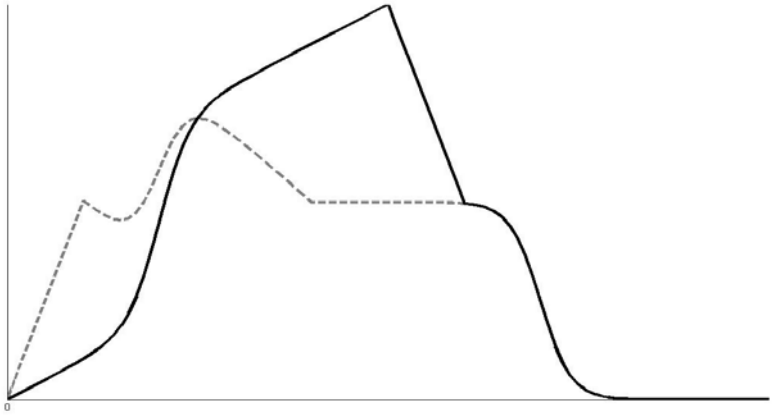


Figura 2.2: Ejemplo de conjunto difuso convexo (▬▬) y no convexo (▪ ▪ ▪).

2.3. Operaciones básicas sobre conjuntos difusos

Las operaciones lógicas que se establecen entre conjuntos difusos son:

- Intersección
- Unión
- Complemento

Las operaciones mencionadas son definidas por medio de funciones denominadas *t-normas, t-conormas* y *negaciones*. Usualmente, se asocian las *t-normas* a intersección, mientras que las *t-conormas* pueden ser usadas para unir conjuntos difusos.

Definición 2.3.1: Una t-norma es una función T:

$$T : [0,1] \times [0,1] \to [0,1]$$

que satisface las siguientes condiciones:

1) *T es monótona, es decir* $T\{a,b\} \le T\{b,d\}$ *siempre que* $a \le b$ *y* $b \le d$

2) *T es conmutativa, es decir* $T\{a,b\} = T\{b,a\}$

3) *T es asociativa, es decir* $T\{T\{a,b\},c\} = T\{a,T\{b,c\}\}$

4) *T satisface las condiciones de borde* $T\{a,0\} = 0$ *y* $T\{a,1\} = a$

donde a, b, c, d $\in [0,1]$.

Definición 3.3.2 Una t-conorma es una función S

$$S : [0,1] \times [0,1] \to [0,1]$$

que satisface las siguientes condiciones:

1) *S es monótona, es decir* $S\{a,b\} \le S\{b,d\}$ *siempre que* $a \le b$ *y* $b \le d$

2) *S es conmutativa, es decir* $S\{a,b\} = S\{b,a\}$

3) *S es asociativa, es decir* $S\{S\{a,b\},c\} = S\{a,S\{b,c\}\}$

4) *S satisface las condiciones de borde* $S\{a,0\} = a$ *y* $S\{a,1\} = 1$

donde a, b, c, d $\in [0,1]$.

Las formas más usuales de definir unión e intersección de conjuntos difusos son las siguientes:

Definición 2.3.2: La función de membresía de la intersección $C = A \cap B$ *de dos conjuntos difusos A y B se define por:*

$$\mu_C(x) = min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \quad x \in X .$$

Definición 2.3.3: La función de membresía de la unión $C = A \cup B$ *de dos conjuntos difusos A y B se define por:*

$$\mu_C(x) = max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \quad x \in X .$$

El complemento de un conjunto difuso lo definiremos por medio de funciones del tipo negación. La definición de una función negación es la siguiente.

Definición 2.3.4: Una función no creciente $N : [0,1] \to [0,1]$ *se define como una negación si* $N(0) = 1$ *y* $N(1) = 0$ *. Se dice que una negación es "estricta" si N es continua y estrictamente decreciente. Una negación estricta se dice que es "fuerte" si es una involución, es decir,* $N(N(a)) = a$

De esta manera estamos en condiciones de definir el complemento de un conjunto difuso en términos de funciones negación.

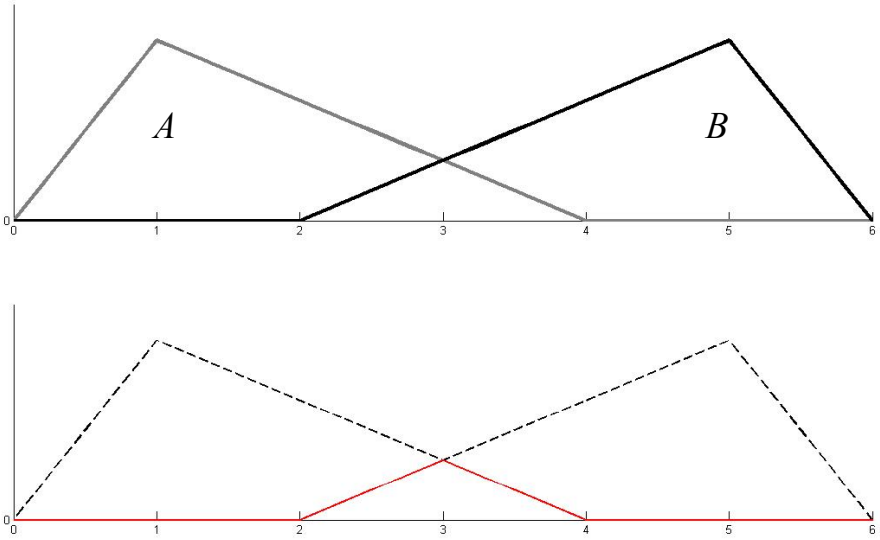


Figura 2.3: Funciones de membresía que representan los conjuntos AUB (- - - -) y A∩B (——)

Definición 2.3.5: La función de membresía del complemento de un conjunto difuso no vacío A, se define por:

$$\mu_{\sim A}(x) = 1 - \mu_A(x), \quad x \in X$$

Hasta el momento hemos definido algunas operaciones básicas entre conjuntos difusos, el próximo paso es poder relacionarlos.

Una *relación* entre dos conjuntos, en el sentido clásico, es un subconjunto de su producto cartesiano. Por lo tanto, sería adecuado considerar que una *relación difusa* entre dos conjuntos difuso es su producto cartesiano.

Definición 2.3.6: El producto cartesiano entre dos conjuntos difusos $A \subseteq X$ *y* $B \subseteq Y$, *denotado por* $A \times B$ *tiene la función de membresía asociada:*

$$\mu_{A\times B}(x, y) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\}$$

donde $x \in X$, $y \in Y$

Definición 2.3.7: Sean X e Y dos universos discursivos y definimos a Z como el producto cartesiano $X \times Y$. *Una relación difusa binaria* $\Re$ *en Z es un nuevo conjunto difuso con una función de membresía asociada definida por el producto cartesiano. Esto es,*

$$\Re(X, Y) = \{(x, y), \mu_{\Re}(x, y); (x, y) \in X \times Y\}.$$

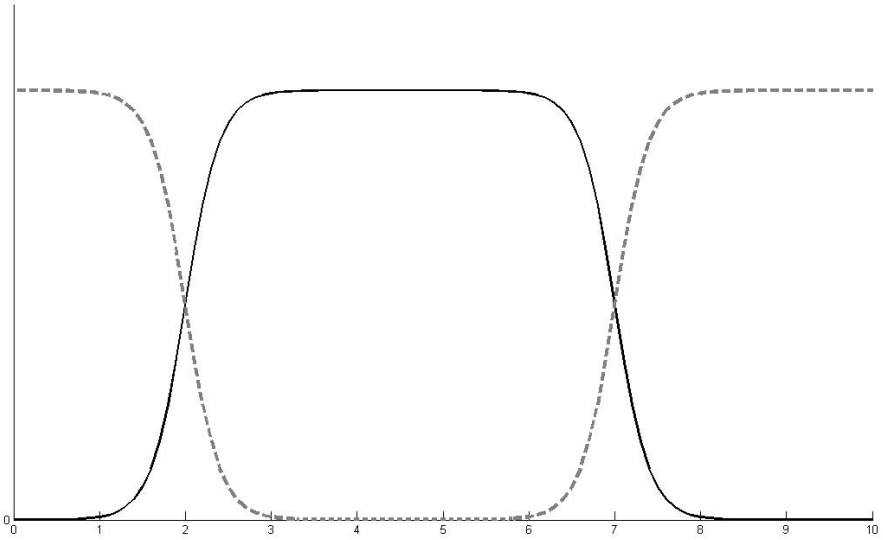


Figura 2.4: Función de membresía de la negación del conjunto difuso C (——); ~C (- - - -)

2.4. Razonamiento aproximado

Las técnicas de razonamiento permiten obtener deducciones lógicas a partir de proposiciones. Implicar es el paso previo a "inferir", que consiste en extraer una conclusión a partir de la relación generada por la implicación. Como hemos visto, el valor de verdad de una proposición difusa puede ser cualquier número en el intervalo *[0, 1]*. Esta generalización es la base de las técnicas de razonamiento aproximado que permiten inferir conclusiones correctas a partir de premisas vagas e imprecisas.

Llamamos "*regla difusa"* al conjunto de proposiciones "*si–entonces*". Las reglas más simples tienen la forma:

"Si x es A entonces y es B".

Una regla expresa un tipo de relación entre los conjuntos difusos *A* y *B* cuya función de membresía sería de la forma $\mu_{A\to B}(x,y)$ y representa lo que conocemos como *implicación lógica.*

La regla básica de inferencia para la lógica clásica es el *Modus Ponens*. Aquí, una regla se ejecuta sólo si la premisa es exactamente la misma que el antecedente de la regla, y el resultado de la regla es exactamente el consecuente.

Las reglas de inferencia usadas en lógica difusa son una generalización del *Modus Ponens* llamada *Modus Ponens Generalizado:*

"Dadas una regla $\Re$ y una observación A, la conclusión B* se parecerá a B en tanto y cuanto A* se parezca a A. Es decir, una regla es ejecutada si existe un grado de similaridad distinto de cero entre la primera premisa y el antecedente de la regla y el resultado de la*

ejecución de la regla es un consecuente que tiene un grado de similaridad distinto de cero con el consecuente de la regla."

Simbólicamente podemos escribir lo mencionado como:

$$B^* = A^* \circ (A \to B).$$

Luego, es necesario definir cuál será la función de membresía para la composición entre un conjunto difuso y una relación implicación.

La función de membresía para la composición es conocida como *sup-T* y se define de la siguiente manera:

Definición 2.4.1:La composición sup-T de un conjunto difuso $A \subseteq X$ *y una relación difusa* $\Re$ *es un nuevo conjunto difuso con una función de membresía definida por:*

$$\mu_B(y) = \mu_{A \circ \Re}(y) = sup_{x \in X} \left\{ \mu_A(x) \overset{T}{*} \mu_{\Re}(x,y) \right\},$$

donde $\overset{T}{*}$ *es una t-norma.*

Por lo tanto sólo resta definir un *operador de implicación difusa,* que expresa la relación que existe entre el antecedente y el consecuente de una regla. Ya el *Modus Ponens Generalizado* nos ha dado el marco teórico, la siguiente definición nos dará las condiciones necesarias para que un operador cualquiera se pueda definir como un *"operador de implicación difusa"*.

Definición 2.4.2.: Una implicación difusa es una función $I : [0,1] \times [0,1] \to [0,1]$ *que satisface las siguientes condiciones:*

1. *Si* $a_1 \le a_3$, *entonces* $I(a_1, a_2) \ge I(a_1, a_3)$ *para todo* $a_1, a_2, a_3 \in [0,1]$,
2. *Si* $a_2 \le a_3$, *entonces* $I(a_1, a_2) \le I(a_1, a_3)$ *para todo* $a_1, a_2, a_3 \in [0,1]$,
3. $I(0, a_2) = 1$ *para todo* $a_2 \in [0,1]$,
4. $I(a_1, 1) = 1$ *para todo* $a_1 \in [0,1]$,
5. $I(1,0) = 0$.

De esta manera, una regla del tipo "*si x es A entonces y es B*" puede interpretarse como la relación difusa dada por:

$$\mu_{A \to B}(x,y) = I(\mu_A(x), \mu_B(y)).$$

2.5. Sistemas de inferencia difusa

La regla composicional de inferencia proporciona un mecanismo para evaluar el resultado de una regla difusa. Un sistema de inferencia difusa (FIS, fuzzy inference system) contendrá un conjunto de reglas de descripción lingüística. En el caso más general, los antecedentes y consecuentes de estas reglas incluirán proposiciones difusas compuestas, es decir, combinarán múltiples entradas y salidas. Este tipo de sistema se denomina sistema MIMO ("multiple input multiple output"). No obstante, un sistema MIMO siempre puede ser considerado como un conjunto de sistemas con entradas múltiples y una única salida, o sistema MISO ("multiple input single output"). A diferencia de un sistema experto convencional, en un sistema difuso varias reglas pueden estar activas simultáneamente. La conclusión global se calculará por agregación de las soluciones parciales aportadas por cada regla.

Un sistema de inferencia difuso consta de tres partes:

Fuzzificador: Asigna a cada variable de entrada un grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos que se han considerado mediante las funciones asociadas a estos conjuntos difusos.

Base de conocimiento: (reglas+motor de inferencia): Se realiza la traducción matemática de las reglas difusas que modelan el sistema. Esta "traducción" se realiza mediante mecanismos de inferencia que relacionan conjuntos difusos de entrada y salida con las reglas que definen el sistema.

Defuzzificador: El resultado de la agregación de los conjuntos difusos de salida de cada regla activa, será un conjunto difuso. Para poder hacer una interpretación de este conjunto difuso será necesario obtener un valor concreto que represente este conjunto resultante.

La Figura 2.1 muestra de una manera esquemática los bloques aquí hemos mencionado.

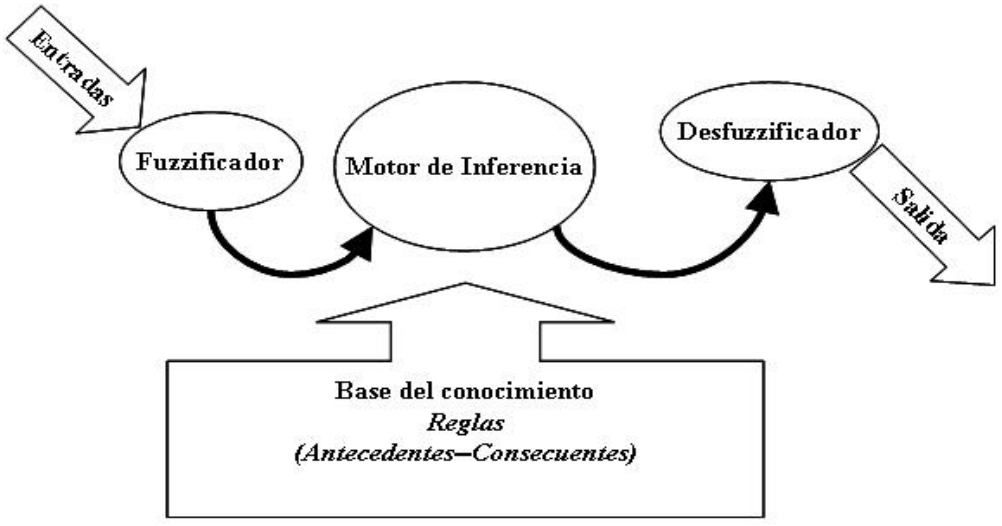


Figura 2.5: Descripción sintética de un sistema de inferencia difuso (FIS)

Los sistemas más popularmente utilizados son del tipo *Mamdani* y *Takagi-Sugeno*. Presentamos a continuación las características principales de los dos FIS.

<u>*Tipo Mamdani*</u>: el resultado de la inferencia es un conjunto difuso, al que se debe aplicar un método de defuzzificación para obtener un valor real. El proceso de defuzzificación transforma la función de pertenencia representativa de un conjunto difuso $\mu(y)$ en un elemento concreto del universo de discurso. En la literatura se han propuesto numerosos métodos de defuzzificación (Zimmermann, 1992), pero el más usado es

$$\text{Centro de gravedad } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{N} y_i * \mu_{B'}(y_i)}{\sum_{i=1}^{N} \mu_{B'}(y_i)}.$$

<u>*Tipo Takagi-Sugeno*</u>: el resultado de la inferencia es una relación funcional. Este tipo de modelos está esencialmente basado en la posibilidad de hacer una descripción local del problema en términos aproximados. Por ejemplo, para cada miembro de una partición difusa de un espacio de entrada X se le puede asociar una regla con su correspondiente relación funcional. Esto es:

$$R_j: \text{ "si } x_1 \text{ es } A_j^1 \text{ y } x_2 \text{ es } A_j^2 \ldots \text{ y } x_N \text{ is } A_j^N \text{ entonces } y=f_j(x_1,x_2,\ldots,x_N)\text{"}, \quad j=1,2,\ldots,r,$$

donde x_i son los valores observados de las variables de entrada y $f_j(.)$ es alguna función, generalmente lineal o constante:

$$f_j(x_1, x_2, \ldots, x_N) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_{i,j} \cdot x_i .$$

Para este sistema la consecuencia en cada regla R_j es un valor constante, dado por

$$y_j = \tau_j \; f_j(x_1, x_2, \ldots, x_N),$$

donde τ_j es el peso de la regla R_j. Entonces una salida global de un modelo tipo *Takagi-Sugeno* está dado por el promedio pesado de los valores de cada una de las reglas activas, es decir:

$$y(x_1, x_2, \ldots, x_N) = \frac{\sum_{j=1}^{r} \tau_j \; f_j(x_1, x_2, \ldots, x_N)}{\sum_{j=1}^{r} \tau_j}.$$

2.6. Sistemas difusos como aproximadores universales

Consideremos un sistema como un mapeo entrada-salida: $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$ al cual queremos aproximar (modelar) con un sistema de inferencia difuso.

El diseño de un sistema difuso consiste en la elección de las funciones de membresía, los conectores lógicos y el procedimiento de defuzzificación. Básicamente, con esto construimos un mapeo de R^n en R, $f^* : (x_1, x_2, ..., x_N) \longrightarrow y^*$.

Una vez construido el sistema difuso nos preguntamos cuanto de "buena" es la representación del sistema real. Es claro que la verdadera relación $f(x) = y$ es desconocida, y la información sobre f esta disponible, en forma de reglas difusas.

El problema entonces se enmarca dentro de las teorías de aproximación de funciones, ya que una "buena" representación del sistema será una "buena" aproximación de f.

El sistema difuso será una buena representación si para cualquier ε>0, se puede encontrar una f^*, tal que $\|f - f^*\| < \varepsilon$ donde $\|.\|$ es la distancia entre f y f^*.

Un resultado clásico establece que toda función continua definida en un conjunto compacto *[a, b]* puede ser uniformemente aproximado por polinomios. La generalización para espacios métricos es el conocido teorema de Stone-Weierstrass que establece que, dado *(X, d)* un espacio métrico compacto y $H \subseteq C(X)$[2] que satisface las siguientes condiciones:

- H es una subalgebra de C(X).
- Para $x \in X$, existe un $h \in H$, tal que $h(x) \neq 0$.
- Si $x, y \in X$ entonces existe un $h \in H$ tal que $h(x) \neq h(y)$.

Entonces H es denso en $C(X)$.

Esto significa que cualquier función real continua en X puede ser aproximada por una función de H.

Este resultado lo aplicaremos en sistemas difusos, para ello se define a $\mathfrak{F}$, como la clase de funciones $f : R^n \longrightarrow R$ de la forma

$$f(x) = \frac{\sum_{j=1}^{r} y_j * \left(A_j^1(x_1) \overset{T}{*} A_j^2(x_2) \overset{T}{*} \ldots \overset{T}{*} A_j^n(x_n) \right)}{\sum_{j=1}^{r} \left(A_j^1(x_1) \overset{T}{*} A_j^2(x_2) \overset{T}{*} \ldots \overset{T}{*} A_j^n(x_n) \right)},$$

[2] *C(X)* es la clase de las funciones continuas sobre X con la métrica $sup_{x \in X} |f(x) - g(x)|$

Donde $x=(x_1,x_2,...,x_n)$, x_i e $y_j \in R$, $\overset{T}{*}$ es una t-norma y los A_j^i son funciones del tipo Gaussianas. Si K es un subconjunto de R^n, entonces denotamos por $\mathcal{F}_K$ a la restricción de los elementos de $\mathcal{F}$ a K.

Teorema 2.6.1: Sea $a \overset{T}{*} b=a \wedge b$. *Para cualquier subconjunto compacto K de* R^n, F_K *es denso en C(K) en la norma supremo.*

Si denotamos por $\mathcal{M}$ a una clase de funciones de membresía de conceptos difusos sobre R, por $\mathcal{L}$ a la clase de conectores difusos lógicos y por $\mathcal{D}$ al método de defuzzificación, entonces el trío ($\mathcal{M}$, $\mathcal{L}$, $\mathcal{D}$) hace referencia a una *metodología de diseño* y es específica del mapeo $y^* = f^*(x)$.

Consideremos a $\mathcal{F}(\mathcal{M}, \mathcal{L}, \mathcal{D})$ como la clase general de diseños tal que, $\mathcal{M}$ esta compuesta por funciones de membresía μ tales que $\mu(x) = \mu_0(ax+b)$ donde $\mu_0(x)$ es continua positiva en un intervalo de R y $\mu(x)$ =0 fuera del intervalo, para algún $a,b \in R$ y $a \neq 0$. $\mathcal{L}$ consiste de t-normas y t-conormas continuas. $\mathcal{D}$ es un método de defuzzificación el cual transforma cada función de membresía μ en un número real.

Con estas definiciones se establece el siguiente teorema:

Teorema 2.6.2: Para cualquier metodología de diseño ($\mathcal{M}$, $\mathcal{L}$, $\mathcal{D}$) *y cualquier subconjunto compacto K de* R^n, $\mathcal{F}(\mathcal{M}, \mathcal{L}, \mathcal{D})|_K$ *es denso en K con la norma supremo.*

De esta manera es posible utilizando el teorema de Stone-Weierstrass se concluye que:

Dada una función real continua $\pi(x)$, *definida en un dominio cerrado y acotado, un escalar* $\varepsilon>0$ *entonces existe un sistema difuso f(x) tal que:*

$$sup_{x \in X} |f(x) - \pi(x)| \leq \varepsilon.$$

III. TIEMPOS DE DESARROLLO DE HUEVO A LARVA INFECTANTE

En este capítulo desarrollamos un modelo para el cálculo de los tiempos de desarrollo de huevo (H) a larva infectante (*L*3). Este modelo está parametrizado usando sistemas de inferencia del tipo Takagi-Sugeno (FTS). El cálculo de los tiempos de desarrollo es esencial para la generación de mecanismos apropiados para el control de la población, ya que nos provee la información acerca de cuándo será el momento en el que los parásitos estarán listos para migrar a las pasturas. Con el fin de reflejar las condiciones naturales, se toma la temperatura media diaria como el principal regulador del tiempo de desarrollo. Por lo tanto, el crecimiento diario es una función de la longitud del individuo y de la temperatura media registrada el día anterior. Esto lo expresamos en términos de una ecuación en diferencias con parámetros difusos, los cuales fueron definidos usando datos obtenidos en el laboratorio. Las respuestas del modelo fueron comparadas con datos de campo.

3.1. Introducción al problema

Los estadios de vida libre han sido estudiados ampliamente en condiciones de campo y controladas (Fiel y col., 2010a; Rossanigo y Gruner, 1995; Gibson, 1981; Young y col., 1980a, 1980b; Pandey, 1972; Rose, 1969). Los estudios realizados han revelado una relación inversamente proporcional no lineal entre los tiempos de desarrollo en el rango de 5°C a los 35°C (Fiel y col., 2010a; Williams, 1983; Catto, 1982; Pandey, 1972).

La estimación de tiempos de desarrollo provee información necesaria sobre el momento en que los parásitos dentro de la bosta estarán listos para emigrar a las pasturas. Determinar cuáles son los niveles en que la pastura no es "conveniente" desde el punto de vista sanitario para que el rodeo siga pastando en el potrero será tema del capítulo siguiente.

La variabilidad de las respuestas frente a las distintas condiciones ambientales hace que el modelado sea una herramienta importante para ayudar a comprender la complejidad de la dinámica del ciclo de vida de los parásitos. Los tiempos de desarrollo pueden variar desde 5 días, en condiciones ideales (Williams y col., 1987), a más de 36 días a 5°C (Young y col.; 1980b). La temperatura ideal para los distintos géneros se encuentra entre 20°C y 30°C (Pandey, 1972; Rose, 1969). Es importante mencionar que la eclosión de los huevos a temperaturas por debajo de los 5°C no se produce, y si se superan los 40°C, la mortalidad de las larvas eclosionadas es casi total (Levine, 1978; Pandey, 1972; Couvillon, 1963). En consecuencia, durante los meses cálidos el desarrollo sólo toma unos pocos días mientras que en el invierno el período aumenta a varias semanas, especialmente si el invierno es frío y húmedo (Catto, 1982; Durie, 1961).

En la literatura consultada, la mayoría de los modelos propuestos para la estimación de los tiempos son del tipo estadístico, dependientes de los datos obtenidos de los ensayos realizados, mediante los cuales se obtiene un buen ajuste a los datos. Debido a esta fuerte dependencia de los datos particulares, no siempre los resultados son satisfactorios cuando se pretende extrapolar estos modelos.

En este capítulo proponemos un modelo matemático basado en ecuaciones en diferencia y sistemas de inferencia difusa del tipo Takagi-Sugeno (FTS) para la estimación del tiempo de desarrollo promedio para *Ostertagia*. El modelo consiste de una ecuación en diferencia y los parámetros son formas funcionales definidas a través de FTS, que incorporan información cuantitativa y cualitativa del proceso. Estos parámetros difusos permiten la flexibilidad necesaria cuando intentamos replicar las condiciones de campo. El concepto sobre el cual este modelo esta basado permitió responder eficientemente a amplios rangos de temperatura.

3.2. Descripción del modelo

El modelo describe el crecimiento de las larvas, tomando como indicador la longitud de las mismas. Esto se considera apropiado debido a la forma alargada del parásito.

El modelo está basado en la siguiente hipótesis:

- *La tasa de crecimiento aumenta con su edad, es decir, cuanto más cerca esté la larva de llegar al estadio L3, más rápido crecerá.*

Por otra parte*, suponemos que, si son conocidas las longitudes de eclosión y de la de larva infectante así como el tiempo de desarrollo bajo ciertas condiciones, es posible determinar cuántos días son necesarios para que una larva complete su desarrollo.*

Si llamamos $L_t(a)$ a la longitud de una larva que eclosionó el día t y ahora tiene edad a, entonces su crecimiento es descripto por la ecuación en diferencias con condiciones iniciales:

$$L_t(a+1) = \begin{cases} [1 + r(T_{t+a})]L_t(a) & \text{si } L_t(a) < l_{L3}(T_{t+a}) \\ l_{L3}(T_{t+a}) & \text{si } L_t(a) < l_{L3}(T_{t+a}) \end{cases}$$
$$IC \quad L_t(0) = l_0(T_t),$$

donde $r(T_{(t+a)})$ es la tasa de desarrollo diario, la cual depende de la temperatura promedio del día $t+a$, $l_0(T_t)$ es la longitud de eclosión y $l_{L3}(T)$ es la longitud de larva infectante. La ecuación en diferencias es resuelta usando un paso diario.

Esta ecuación tiene dos condiciones de borde: una condición inicial $l_0(T_t)$, y una condición de corte $l_{L3}(T)$. Es necesario notar que estas condiciones varían dependiendo de la temperatura del ambiente.

Una vez fijado el día de eclosión *t*, la edad *a* en la que la larva alcanza el estadio infectante es tal que $L_t(a) < l_{L3}(T) \leq L_{t+1}(a+1)$. Por lo tanto, si llamamos $\tau(t)$ al tiempo de desarrollo de una larva que eclosionó el día *t*, entonces $\tau(t) = a+1$.

El modelo fue implementado utilizando un código para Matlab. Las entradas del modelo son temperaturas promedios diarias, las cuales son cargadas como un vector. El programa tiene las siguientes opciones:

- Crear un gráfico que muestra los tiempos de desarrollo de cada cohorte dentro de un período de estudio a definir por el usuario.
- Crear un gráfico que describe el desarrollo diario de una cohorte específica pudiendo seleccionar el día juliano de inicio.

3.2.1. Parametrización del modelo

El modelo tiene tres parámetros: la longitud de eclosión (l_0), la longitud de larva infectante (l_{L3}) y la tasa de desarrollo diaria (*r*). Cada uno de estos parámetros es modelado usando sistemas de inferencia difusos del tipo Takagi-Sugeno, teniendo como variable de entrada la temperatura promedio diaria.

La construcción de las funciones de membresía dependientes de la temperatura se basó en el trabajo de Pandey (1972). La variable temperatura (*Temp*) fue particionada en seis funciones de membresía de tipo triangular, que nombramos Temp*10*, Temp*15*, Temp*20*, Temp*25*, Temp*30* y Temp*35*; por ejemplo, Temp*15* corresponde a la función de membresía en la que la máxima pertenencia está en 15°C. En cada caso, los valores de membresía máximos corresponden a las temperaturas que Pandey utilizó para los ensayos de laboratorio. Los parámetros de cada función están detallados en la Tabla 3.1.

Los datos de longitud de eclosión, de longitud de larva infectante y de tiempos de desarrollo a temperatura constante para cada una de las temperaturas mencionadas fueron utilizados para la construcción de las funciones consecuentes de los sistemas de inferencia difusos Takagi-Sugeno FTS.

3.2.1.1. Longitud de eclosión $l_0(T_t)$

El tamaño de las larvas recién eclosionadas mostró un amplio rango de valores dependiendo de la temperatura a la cual se desarrollaron. Las larvas más pequeñas se obtuvieron a los 35°C y las más grandes a 15°C **(**Pandey, 1972).

Como mencionamos anteriormente, $l_0(T_t)$ es un sistema FTS con la variable de entrada "temperatura". Las funciones consecuencia fueron construidas acordes con los datos de

Pandey (1972), los cuales permitieron hacer una descripción local del problema para distintas temperaturas, en términos aproximados.

Esto significa que, por ejemplo, si las longitudes de eclosión dadas por Pandey son $l_0(10°)=383$ a 10°C y $l_0(15°)=413$ a 15°C, para los valores intermedios de temperatura se supone una relación funcional lineal, es decir, la función $f_{[10]}(\mathbf{x}_1)=6x_1+323$ nos da la longitud de eclosión para valores de temperatura entre 10° y 15°C. Entonces, la regla difusa para valores en Temp*10* queda definida por:

$$\text{If } x_1 \text{ is Temp}10 \Longrightarrow l_0(x_1) \text{ is } f_{[10]}(x_1)=6x_1+323$$

La misma metodología es aplicada para temperaturas en los rangos intermedios 15°-20°, 20°-25°, 25°-30°, 30°-35° y 35°-40°, quedando así determinadas las correspondientes funciones consecuencia, $f_{[10]}$, $f_{[15]}$, $f_{[20]}$, $f_{[25]}$, $f_{[30]}$ y $f_{[35]}$, y las reglas difusas correspondientes. Los parámetros de las funciones son detallados en la Tabla 3.4 y la lista completa de las reglas está resumida en la Tabla 3.1. La función de parametrización se muestra en la Figura 3.1 para todo el rango de temperaturas.

Si x es	Temp*10*	entonces $l_0(x)$ es	$f_{[10]}$
	Temp*15*		$f_{[15]}$
	Temp*20*		$f_{[20]}$
	Temp*25*		$f_{[25]}$
	Temp*30*		$f_{[30]}$
	Temp*35*		$f_{[35]}$

Tabla 3.1: Lista de reglas para la función longitud de eclosión $l_0(T)$.

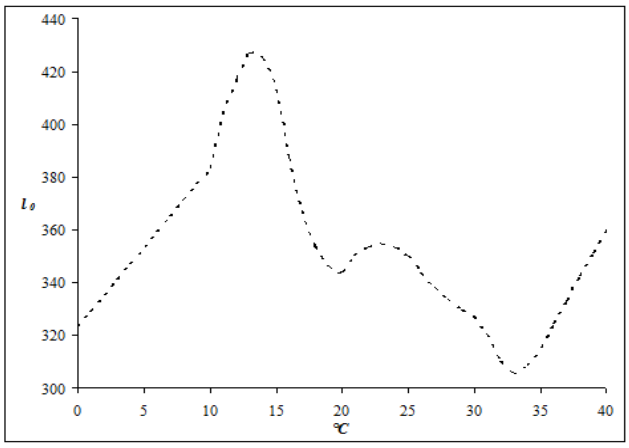


Figura 3.1: Función parámetro longitud de eclosión $l_0(T_t)$, resultante de la aplicación de sistemas de inferencia difuso Takagi-Sugeno, con la temperatura media diaria como variable de entrada..

3.2.1.2. Longitud de larva infectante $l_{L3}(T_t)$

Las larvas infectivas *L*3 que crecieron a distintas temperaturas exhibieron una variación en el tamaño logrado al alcanzar el estadio. Así, las *L*3 son más largas cuando se desarrollan a 20°C. Por encima o debajo de esta temperatura las longitudes decrecen gradualmente, habiéndose encontrado las más pequeñas a los 35°C **(**Pandey, 1972).

Para la construcción de las funciones consecuencia, se supuso una relación lineal entre las diferentes temperaturas consecutivas del experimento de Pandey. Por ejemplo, dadas $l_{L3}(25°)$=844 y $l_{L3}(30°)$=826, la relación lineal para los valores intermedios de temperatura es $g_{[25]}(x_1)$= -3.6x_1+934. Entonces la regla difusa para x_1 en Temp*25* está dada por:

$$\text{Si } x_1 \text{ es Temp}25 \Longrightarrow l_{L3}(x_1) \text{ es } g_{[25]}(x_1) = -3.6x_1 + 934$$

Como antes, esta metodología se aplica a todas las otras funciones. Las funciones de membresía y sus parámetros son detallados en las Tabla 3.4 y la lista completa de las reglas está en la Tabla 3.2. La Figura 3.2. muestra la función parámetro $l_{L3}(T_t)$ en todo el rango de temperaturas.

3.2.1.3. Tasa de desarrollo diario $r(T_{(t+a)})$

Suponemos que la longitud en el día $t+a$ de una larva eclosionada el día t, depende proporcionalmente de:

- la longitud alcanzada el día anterior, es decir de $t+a$-1,
- la temperatura promedio del día, $t+a$.

Esta proporción toma valores en el intervalo [0, 1] y fue modelada por un sistema FTS.

Bajo condiciones de laboratorio, la temperatura se mantiene constante y además se tiene en cuenta que la humedad en la bosta es adecuada para garantizar el desarrollo de las larvas. El trabajo de Pandey se desarrolló bajo estas condiciones. Por lo tanto estamos bajo las condiciones de una de las hipótesis que planteamos sobre el crecimiento y desarrollo de las larvas.

Si x es	Temp*10*	entonces $l_{L3}(x)$ es	$g[10]$
	Temp*15*		$g[15]$
	Temp*20*		$g[20]$
	Temp*25*		$g[25]$
	Temp*30*		$g[30]$
	Temp*35*		$g[35]$

Tabla 3.2: Lista de reglas para la función parámetro longitud cuando la larva alcanza el estadio L3,$l_{L3}(T_t)$.

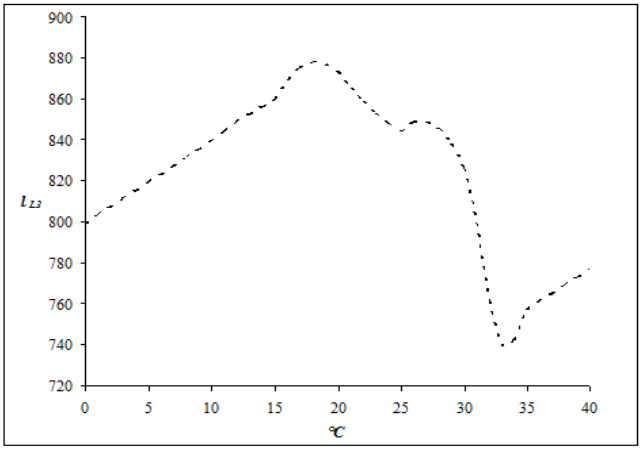


Figura 3.2.: Función parámetro longitud de la larva cuando alcanza el estadio L3, $l_{L3}(T_t)$, resultante de la aplicación de sistemas de inferencia difuso Takagi-Sugeno, con la temperatura media diaria como variable de entrada.

Para el cálculo de las tasas de desarrollo a temperatura constante, se tomaron los datos de Pandey y se utilizó el modelo propuesto, dado por:

$$L_t(a+1) = [1 + r(T_{t+a})]L_t(a),$$

donde la única incógnita bajo estas condiciones, es $r(T_{(t+a)})$ y las condiciones de borde de la ecuación en diferencia, longitud de eclosión y longitud de larva infectante, son datos extraídos del trabajo.

Si la temperatura se mantiene en un valor constante T, entonces el subíndice t es irrelevante, por lo que se tiene que $r(T_{(t+a)}) = r(T)$. Reemplazando en la ecuación del modelo obtenemos:

$$L(a+1) = [1 + r(T)]L(a),$$

de donde deducimos que:

$$L(a+1) = [1 + r(T)]^{1+\tau} L(0).$$

Se debe notar que $L(0)=l_0(T)$, y que $L(\tau+1)=l_{L3}(T)$, donde τ es el tiempo de desarrollo dado por el trabajo de laboratorio. Entonces, el valor de $r(T)$ es la solución de una ecuación muy simple de resolver. Los valores $r(T)$ se pueden determinar para cada una de las temperaturas y se utilizarán para la construcción de las funciones consecuencia del sistema FTS.

Las funciones consecuencia del sistema se construyen de la misma forma que se hizo antes. A modo de ejemplo, la regla difusa para Temp*15* es:

$$\text{Si } x_1 \in \text{Temp}15 \Rightarrow r(x_1) \text{ es } h_{[15]}(x_1) = 0.02x_1 - 0.19.$$

Las funciones de membresía y sus parámetros se encuentran detallados en la Tabla 3.4. La lista completa de las reglas está resumida en la Tabla 3.3. La Figura 3.3. muestra la función parámetro $r(T_t)$ en todo el rango de temperaturas.

Si x es	Temp*10*	entonces $r(x)$ es	$h_{[10]}$
	Temp*15*		$h_{[15]}$
	Temp*20*		$h_{[20]}$
	Temp*25*		$h_{[25]}$
	Temp*30*		$h_{[30]}$
	Temp*35*		$h_{[35]}$

Tabla 3.3: Lista de reglas para la tasa de desarrollo diario $r(T_t)$.

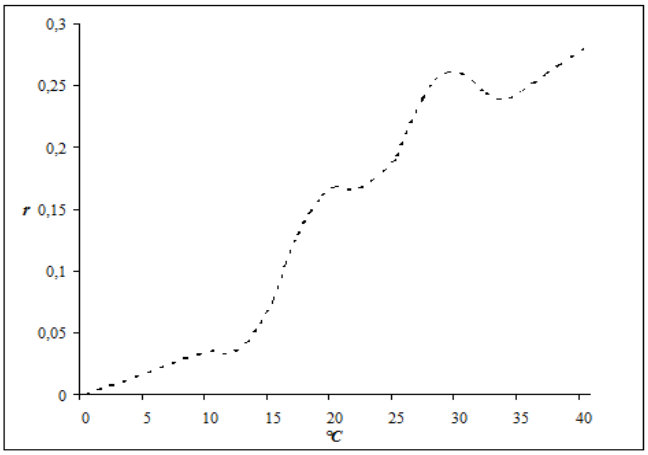


Figura 3.3: Función parámetro $r(T_t)$, resultante de la aplicación de sistemas de inferencia difuso Takagi-Sugeno, con la temperatura media diaria como variable de entrada. .

3.3. Validación del modelo usando datos de campo

Para la validación del modelo, fueron usados dos indicadores:

1. Error medio de estimación: calculado entre el valor observado T_i y el estimado $\hat{T}_i$, de la siguiente manera:

$$MEE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(T_i - \hat{T}_i\right).$$

2. Coeficiente de determinación R^2, definido por:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{T}_i - T_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(T_i - \overline{T}\right)^2},$$

donde $\overline{T}$ es el valor promedio observado. Cuanto más cercano a 1 se encuentre el valor de R^2, mejor será el ajuste.

Las salidas del modelo fueron obtenidas de simulaciones en las que se incluyeron condiciones similares a las presentes en los años en que se realizaron los ensayos de campo llevados a cabo por Fiel y col. (2010a) desde Julio de 1994 hasta Junio de 1998. Los muestreos para la determinación de tiempos de desarrollo en el campo se realizaron semanalmente. Debido a esto, se tomaron tiempos promedios semanales de las simulaciones para poder realizar la comparación adecuadamente.

3.4. Respuesta del modelo a variaciones en la secuencia de temperaturas

Una observación interesante de los resultados del ensayo de campo es que, aunque las temperaturas medias obtenidas en la primavera y en el otoño no son significativamente distintas, los tiempos de desarrollo en la primavera son más cortos que en el otoño. El modelo se utilizó para estimar cuál es el grado en que la secuencia de las temperaturas (temperaturas crecientes, decrecientes, oscilantes, *etc*.) afecta los tiempos de desarrollo. Dos preguntas aparecieron en el análisis:

1. ¿Cuán importante es el orden en el que las temperaturas medias ocurren? En otras palabras, si tomamos un vector de temperaturas cualquiera y reordenamos sus componentes ¿el tiempo de maduración es el mismo?
2. Si tomamos dos vectores con la misma media μ, ¿existe una diferencia significativa entre las salidas del modelo si el rango de temperaturas es diferente? En otras palabras, si las componentes del vector de temperaturas están dentro del intervalo $[\mu-\sigma, \mu+\sigma]$ o $[\mu-2\sigma, \mu+2\sigma]$, ¿existen diferencias significativas en los tiempos de desarrollo?

Nombre de la función de membresía	Tipo	Valor de los parámetros		
		a	b	c
Temp*10*	*Z*	10	15	
Temp*15*	*Triangular*	10	15	20
Temp*20*	*Triangular*	15	20	25
Temp*25*	*Triangular*	20	25	30
Temp*30*	*Triangular*	25	30	35
Temp*35*	*S*	30	35	
$f_{[10]}$	*Lineal*	6	323	
$f_{[15]}$	*Lineal*	-13.8	620	
$f_{[20]}$	*Lineal*	1.2	320	
$f_{[25]}$	*Lineal*	-4.6	465	
$f_{[30]}$	*Lineal*	-2.4	399	
$f_{[35]}$	*Constante*	9		
$g_{[10]}$	*Lineal*	4	799	
$g_{[15]}$	*Lineal*	2.8	817	
$g_{[20]}$	*Lineal*	-5.8	989	
$g_{[25]}$	*Lineal*	-3.6	934	
$g_{[30]}$	*Lineal*	-13.8	1240	
$g_{[35]}$	*Constante*	21.62		
$h_{[10]}$	*Lineal*	0.0036		
$h_{[15]}$	*Lineal*	0.0184	-0.2	
$h_{[20]}$	*Lineal*	0.0049	0.0696	
$h_{[25]}$	*Lineal*	0.0136	-0.1485	
$h_{[30]}$	*Lineal*	-0.0031	0.3545	
$h_{[35]}$	*Constante*	0.007		

Tabla 3.4: Definición de todas las funciones de membresía utilizadas en la parametrización del modelo. Datos de Pandey (1972) fueron usados para el cálculo de los parámetros de las funciones.

Para responder a estas preguntas se construyeron vectores con medias μ de 5°, 10°, 15° y 20°C, mientras que el desvío estándar σ=5°C se mantuvo fijo. Por cada media se construyeron dos vectores generados aleatoriamente con distribución uniforme, uno sobre el intervalo [$\mu-\sigma$, $\mu+\sigma$], llamado $T\mu\sigma$, y otro sobre el intervalo [$\mu-2\sigma$, $\mu+2\sigma$], llamado $T\mu 2\sigma$. Cada uno de los 8 vectores generados fueron reordenados sin reemplazo 10.000 veces. Cada grupo de 10.000 vectores reordenados de $T\mu\sigma$ fue llamado $PV\mu\sigma$ asociado a cada media y desvío (por ejemplo $PV20\sigma$ corresponde a $T20\sigma$). Estos vectores fueron usados como

entradas para las simulaciones y las correspondientes salidas fueron analizadas estadísticamente.

En primera instancia, fue utilizada estadística descriptiva para analizar y describir el efecto del orden de las temperaturas. Luego, el test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) (Rohatgi, 1984) fue utilizado para comparar los resultados de la simulación con la misma μ y distinto desvío estándar. El test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) es un test no paramétrico para determinar si existen diferencias significativas entre dos muestras. La ventaja del test es que no es necesaria ninguna suposición sobre la distribución de los datos. El test de Shapiro (Rohatgi, 1984) fue usado para chequear la normalidad de la muestra y el de Levene (Rohatgi, 1984) fue usado para determinar igualdad de varianzas en las distintas muestras.

3.5. Resultados

3.5.1 Simulaciones y datos de campo

Los tiempos de desarrollo calculados por el modelo y las temperaturas medias diarias se muestran en la Figura 3.4. El coeficiente de correlación de Pearson (r^2) fue calculado, y su valor resultó en 0.78 ($p<0.01$), lo que mostró que existe una relación lineal inversa entre temperatura y tiempos de desarrollo. Esta relación también fue notada en la literatura especializada en parasitología (Fiel y col., 2010a; Williams y col., 1983; Catto, 1982). Los tiempos de desarrollo (expresados en semanas) calculados por el modelo fueron comparados con datos de campo, y están presentados en la Figura 3.5. Como mencionamos anteriormente, las salidas del modelo fueron promediadas semanalmente para poder realizar la comparación con los datos de campo. El valor de MEE fue de 0.64 semanas con una varianza de 0.34 semanas y el coeficiente de determinación fue de $R^2=0.744$ ($p<0.05$), valores que indican una muy buena performance del modelo.

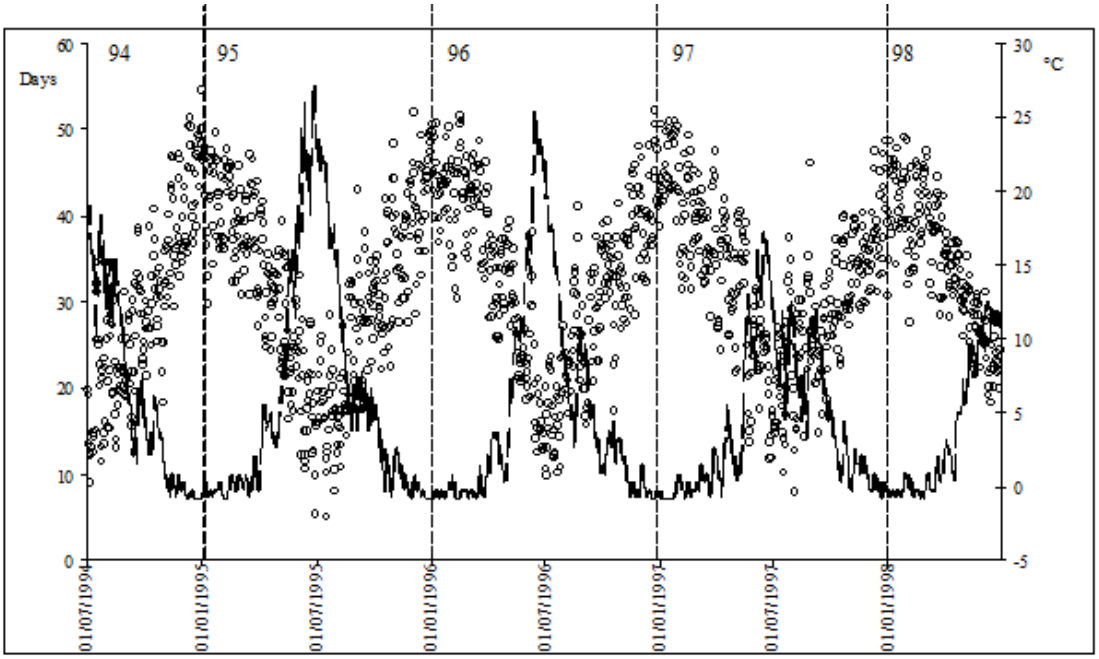


Figura 3.4: Tiempos de desarrollo promedio calculados por el modelo (—) y temperaturas medias diarias (o) registradas desde el mes de julio de 1994 hasta junio de 1998. La relación inversa entre temperatura y tiempo de desarrollo es claramente visible en la figura.

3.5.2. Respuesta del modelo a las variaciones en la secuencia de temperaturas

3.5.2.1. Efectos en el orden de la secuencia de temperaturas

Al conjunto de resultados de la simulación para cada conjunto $PV\mu\sigma$ lo llamaremos $SPV\mu\sigma$. Las estadísticas para cada $SPV\mu\sigma$ están detalladas en la Tabla 3.5.

Para $SPV20\sigma$, el conjunto de salidas con temperatura media de 20°C y desvío estándar σ=5°C, los resultados de los tiempos de desarrollo tienen una media de 7.6 días con una desviación estándar (DS) de 0.55 días y un coeficiente de variación (CV) de 7.13%. El 50%

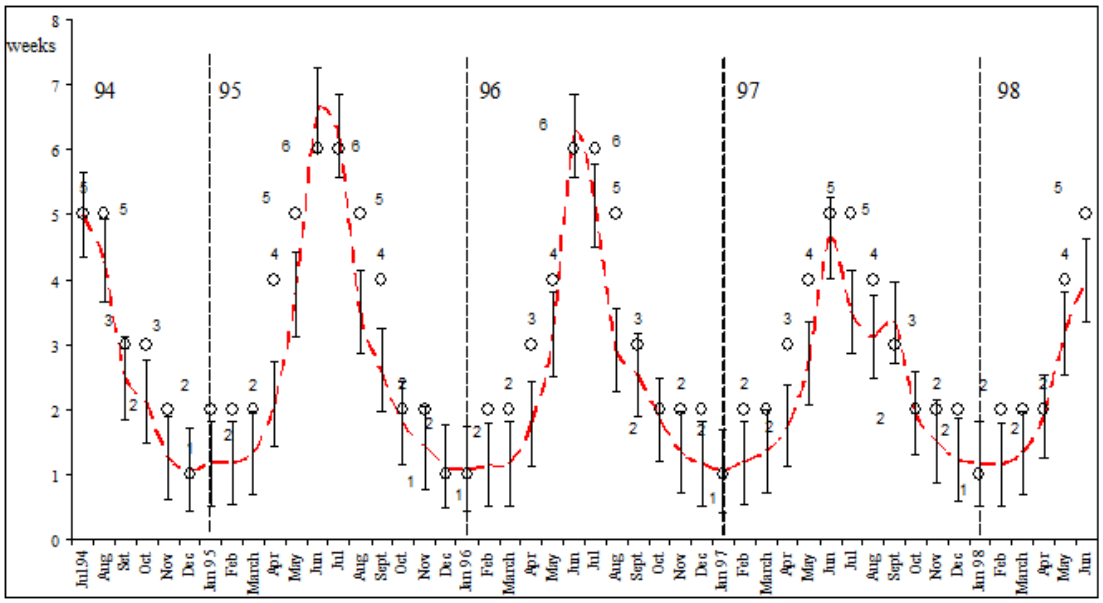


Figura 3.5: Tiempos medios de desarrollo mensuales obtenidos por el modelo (—) y del ensayo de campo (o) realizado por Fiel y col. (2010a).

central de las simulaciones estuvo entre 7 y 8 días, siendo este último valor coincidente con la mediana. Los tiempos mínimos de desarrollo fueron de 6 días y el tiempo máximo de 9 días. El índice de asimetría de Pearson (PS) fue de -1.7, por lo tanto la asimetría del conjunto de datos es hacia la izquierda.

Para $SPV15\sigma$, el tiempo medio y la mediana fueron muy similares, 11.2 y 11 días respectivamente, el desvío estándar fue de 1.32 días y el CV fue de 11.8%. El rango de valores de las simulaciones varió desde 8 a 16 días y el 50% central de las simulaciones estuvo entre 10 y 12 días. El índice PS sugiere que el conjunto de datos tienen una asimetría hacia la derecha (PS = 0.44).

En las simulaciones para $SPV10\sigma$ la media fue de 23.2 días con un SD de 1.66 días y un CV de 7.7%. El rango de valores estuvo entre 18 y 28 días y el 50% central de los datos estuvo entre 22 y 24 días. El PS fue de 0.019, asumiendo entonces que los datos se distribuyen simétricamente.

Para $SPV5\sigma$ la media fue de 48.8 días con un desvío de 3.8 días y un CV de 6.32%. El rango de valores fue amplio, desde 37 a 59 días; no obstante el 50% cayó entre 46 y 56 días. El conjunto de datos tiene una asimetría hacia la izquierda (PS= -0.1844). El resumen del análisis se encuentra en la Tabla 3.5.

Estas estadísticas realizadas sobre 10.000 simulaciones para cada una de las cuatro temperaturas medias muestra que, a medida que la temperatura disminuye, los tiempos medios de desarrollo no sólo se extienden sino que se amplía el intervalo de tiempos resultantes así como la desviación estándar.

μ [°*C*]	**Tiempo medio de desarrollo [*d*]**	**DS [*d*]**	**CV**	**Rango [*d*]**	**50% Central [*d*]**	**Índice de Asimetría de Pearson**
20	7.6	0.55	7.13%	6-9	7-8	-1.7 (izq.)
15	11.2	1.32	11.8%	8-28	10-12	0.44 (der.)
10	23.3	1.66	7.7%	18-28	22-24	0.019 (sim.)
5	48.8	3.8	6.32%	37-59	46-56	0.184 (izq.)

Tabla 3.5: Estadísticas de las salidas de las simulación para cada conjunto PV$\mu\sigma$, donde μ es la temperatura media y σ es el desvío estándar del conjunto. Cada PV$\mu\sigma$,consiste de 10,000 sucesiones de temperaturas.

3.5.2.2 Efectos en la amplitud del rango

El test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) fue realizado para comparar el conjunto de salidas con igual media pero distinto desvío, es decir, se comparan *SPV*$\mu\sigma$ y *SPV*$\mu 2\sigma$. La hipótesis nula planteada es que los dos conjuntos tienen la misma distribución.

En todos los casos se rechazó la hipótesis nula con un *p*-valor al 5%. Para el análisis significó que el modelo es sensible a la amplitud del rango de las temperaturas medias durante el desarrollo larval.

3.6. Discusión

El modelo presentado aquí estima los tiempos de desarrollo promedio de una cohorte de larvas en una bosta. Es una buena herramienta para la estimación del momento en que las primeras larvas estarán listas para migrar a la pastura. La estimación de estos tiempos es muy importante para los primeros pasos hacia la generación de nuevas estrategias de control para la parasitosis en la Argentina.

Sin embargo, es necesario mencionar que asociada a los tiempos de desarrollo está la función de las bostas como reservorios de *L*3 para asegurar la disponibilidad de larvas en la pastura. Las bostas actúan como reservorios naturales para las cohortes, dando refugio a la cohorte completa (huevos-*L*1-*L*2 y *L*3) desde unas pocas semanas hasta 9 meses. Este tiempo depende de la época en la que la bosta llega a la pastura, de la estación del año y del clima correspondiente, dado que las lluvias intensas degradan rápidamente la bosta (comunicación personal, C. Fiel). Trabajos previos mencionan que las larvas que se encuentran más cercanas a la superficie de la bosta (mayor oxigenación) tienen un tiempo de desarrollo menor que aquéllas que están con menor oxigenación. Esto da lugar a que la cohorte se desarrolle de

manera secuencial de afuera hacia adentro, es decir, en una misma cohorte existen tiempos distintos de maduración a pesar de estar afectadas por las mismas condiciones ambientales. La construcción de un modelo que considere un desarrollo secuencial de la cohorte permitiría incorporar un mayor realismo al modelo y poder corroborar o rechazar la hipótesis planteada.

Tales datos para Argentina no están registrados hasta el momento por lo que la construcción de modelos teóricos podrían realizarse en futuros trabajos cuando se tengan datos de campo. El modelo es coherente con los resultados que se han obtenido en ensayos realizados en condiciones de laboratorio y de campo, dando el primer paso para la generación de estrategias de control.

Es pertinente hablar de la metodología que fue utilizada para la construcción de los parámetros del modelo. Es importante destacar que el análisis de la sensibilidad del modelo fue abordada desde el punto de vista de la respuesta a distintas situaciones ambientales, variaciones en el orden y amplitud del rango de las temperaturas.

Es posible argumentar que la selección de las funciones de membresía pueden condicionar los resultados. Esto es posible porque justamente, como en cualquier modelo, la selección de las relaciones funcionales afecta las respuestas. Puede ser interesante en este caso analizar los resultados obtenidos con diferentes particiones del espacio discursivo, en otras palabras, cambiar el tipo y cantidad de funciones de membresía usadas. Sería útil analizar cómo el grado de precisión usado en la construcción de las funciones parámetro puede ser considerado adecuado identificando diferencias estadísticas significativas en las salidas de los modelos y ligándolas a diversos niveles de información. Sin embargo, un análisis de la respuesta de cualquier modelo a los cambios en el tipo y al número de funciones de la calidad de miembro usadas en su parametrización parece ser de una naturaleza más teórica. Es ciertamente un tema atractivo para continuar nuestra investigación en esta dirección.

3.7. Conclusiones

El modelo está fuertemente basado en la observación del proceso biológico involucrado en el desarrollo de *Ostertagia* con un mínimo requerimiento de datos experimentales. Los datos de Pandey (1972) fueron utilizados para la construcción de las relaciones funcionales entre temperatura ambiente y los tiempos de desarrollo para la parametrización del modelo.

El modelo es simple, expresado en términos de una ecuación en diferencias y tres sistemas FTS, uno para cada parámetro: longitud inicial, longitud de eclosión, larva infectiva y tasa de desarrollo diaria.

A pesar de su simplicidad, el modelo describe adecuadamente la complejidad del problema. La bondad de la representación obtenida a través del mismo se ve reflejada en la exactitud de las salidas relativas a los datos experimentales obtenidos por Fiel y col. (2010a). El error de estimación del modelo es menor que el error de muestreo que tiene el ensayo.

El modelo mostró una alta sensibilidad a la variación diaria de temperatura y a la amplitud térmica. Esto se ve reflejado en las salidas de los test estadísticos realizados y en la variabilidad de las repuestas del modelo para cada serie de datos de temperaturas $PV\mu\sigma$. Estas variaciones son consistentes con las respuestas observadas en los valores estimados para primavera y otoño.

La ventaja característica de este modelo resulta de haber usado los sistemas FTS para su parametrización. Esto introduce la posibilidad de describir de una manera simple la dinámica de cómo cada componente afecta en el desarrollo individual, permitiendo tener el foco en el aspecto biológico en lugar de tratar de ajustar el modelo a una condición particular.

IV. DINÁMICA POBLACIONAL DE ESTADIOS DE VIDA LIBRE.

En este capítulo desarrollamos un modelo de la dinámica de la población que se encuentra en los estadios de vida libre. Con el modelo se podrá estimar los niveles de infectividad que las pasturas tendrán a lo largo del año, teniendo en cuenta la cantidad de huevos por gramo de materia fecal que se registran en los animales del rodeo (HPG) y las condiciones climáticas de la zona de estudio. De esta manera, será posible determinar qué niveles de HPG serán significativamente "peligrosos" para futuros efectos en los niveles de infección en las pasturas. El modelo es formulado en términos de un sistema de tres ecuaciones en diferencias, parametrizadas con sistemas de inferencia difuso del tipo Mamdani (FM). El modelo considera a la población de *Ostertagia* dividida en tres subpoblaciones: las larvas preinfectivas, las que esperan para emigrar la pastura y las que están en la pastura. Se calcula día a día la abundancia de cada una de estas subpoblaciones.
El modelo fue calibrado y corroborado con datos de ensayos de campo en Tandil, provincia de Buenos Aires, arrojando resultados satisfactorios. Se estudió la respuesta del modelo a diferentes condiciones climáticas, dando como resultado una notable variabilidad de la respuesta según la estacionalidad de las lluvias.

4.1. Introducción al problema

Desde 1960 el ciclo de vida de *Ostertagia* ha sido estudiado en una gran variedad de ambientes. Los resultados han ayudado a comprender cómo ocurren los procesos bajo distintas condiciones ambientales. Un gran número de autores ha obtenido resultados muy valiosos sobre los efectos de las variables ambientales tales como: temperatura (Lutzelschwab y col., 2005; Michel y col., 1975), humedad, lluvias (Onyiah y col., 2005; Stromberg, 1997), microclima de las bostas (Rossanigo y Gruner, 1995; Krecek y col., 1990), condiciones para la migración y supervivencia de larvas en la pastura (Almería,y col., 1999; Stromberg, 1997; Al Saqur, y col., 1982; Persson, 1974a; Persson, 1974b; Williams y Bilkovich, 1971; Rose, 1970; Durie, 1961). Los trabajos aquí citados muestran que la epidemiología de *Ostertagia* cambia de acuerdo a la zona climática en la que se estudia. Según los expertos, sería necesario un mínimo de cuatro años de trabajo de campo para tener una descripción aceptable de la dinámica de la enfermedad en un área ganadera en particular de Argentina (Fiel y col., 2010a). La disponibilidad de un modelo matemático confiable, no dependiente de datos estadísticos locales sino de relaciones funcionales generales que pueda ser trasladado a distintas zonas climáticas, es de una ventaja considerable para el análisis y la comprensión de la dinámica de esta afección parasitaria, más aún cuando se desea contar con métodos para su control.

En efecto, a fines de la década de los 90 se registraron casos de resistencia a las distintas drogas antihelmínticas, obligando a los veterinarios a tener que generar estrategias de control para evitar este fenómeno. No siempre las estrategias fueron eficientes considerando la relación costos-beneficio. La variabilidad de las respuestas a diferentes ambientes hace más importante el uso de los modelos matemáticos para entender la complejidad de la dinámica del ciclo de vida de los parásitos.

Algunos modelos de parásitos (Louie y col., 2007; Learmount y col., 2006, Ward, 2006a, Ward, 2006b; Smith y col., 1987; Smith y col., 1986; Young y col., 1980b) dieron resultados muy interesantes con respecto a la dinámica de las poblaciones, volviéndose una herramienta muy útil para investigaciones en condiciones de campo y laboratorio. No obstante, algunos conceptos sobre los aspectos preinfectivos del ciclo no han sido tomados en cuenta. Por ejemplo, el efecto de las lluvias tiene relación con la mortalidad preinfectiva y, por otra parte, favorece a la migración de las *L3* hacia las pasturas. Este efecto doble, dependiendo en qué estadio larval se encuentre la cohorte, no fue considerado. Modelos recientes propuestos por Ward (Ward, 2006a y 2006b) y Louie (Louie y col., 2007) se basan en la teoría de sistemas dinámicos siendo éstos usados como herramientas de control eficientes. Sin embargo, es necesario notar que las hipótesis para estos modelos no son totalmente adecuadas para las condiciones en Argentina, en lo que se refiere a las condiciones climáticas y a la forma en que se maneja el rodeo.

4.2. Descripción del modelo.

El modelo aquí planteado es usado para evaluar la contribución relativa de los niveles de huevos por gramo en material fecal (HPG) de *Ostertagia* a la variación de la contaminación de las pasturas bajo distintas condiciones ambientales. El modelo está formulado a través de un sistema de ecuaciones en diferencias, parametrizadas usando sistemas de inferencia difuso del tipo Mamdani (FM).

El modelo describe la abundancia de los parásitos en cada uno de los sucesivos estadios de la población (Figura 4.1), para cuya descripción fueron tomados en cuenta tres procesos sucesivos:

1. Reclutamiento de larvas a la población de *L*3 disponibles para migrar a la pastura (Sección 4.2.1.)
2. Supervivencia de las *L*3 en la bosta en espera de la ocasión para migrar. (Sección 4.2.2.)
3. Migración de *L*3 y dinámica de la población de *L*3 en la pastura (Sección 4.2.3.).

Las ecuaciones en diferencias son resueltas con paso diario. Los parámetros difusos fueron construidos con información aportada por la experiencia del Grupo de Parasitología[3] y datos e información de publicaciones especializadas. En las siguientes secciones se describe cada uno de los tres procesos.

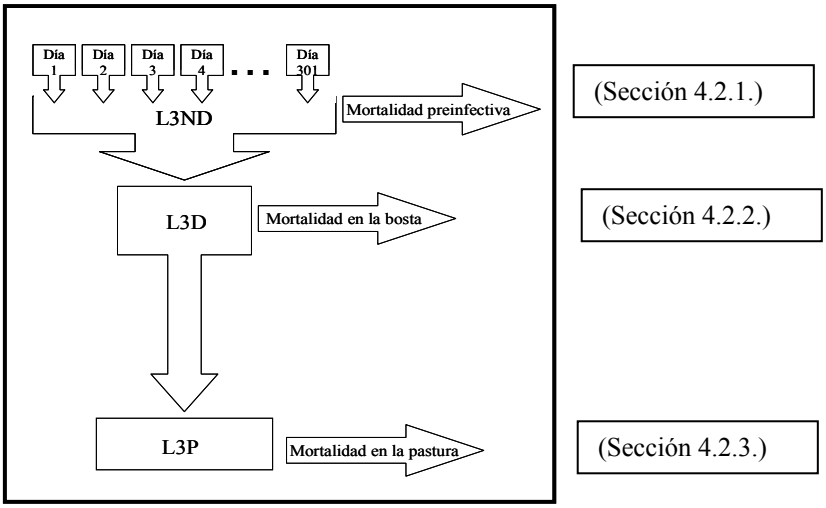


Figura 4.1: Modelo conceptual de las poblaciones en estadios de vida libre.

4.2.1. Reclutamiento de larvas *L*3 a la población de larvas disponibles para migrar a la pastura

En esta sección describimos la dinámica de huevos y larvas dentro de la bosta. El conjunto de todos los huevos contenidos en las bostas que fueron eliminados a lo largo de un día por el rodeo, será considerado una cohorte correspondiente al día juliano[4] de "llegada" a la pastura. El único proceso que le afecta a esta cohorte es mortalidad de larvas preinfectivas. Por lo tanto, la dinámica de la cohorte se puede describir por medio de la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} &H(t+a,\, a) = \left(1- \mu_{\Pr e}\left(a, t+a, R\left(t+a\right)\right)\right) H\left(t+a\text{-}1, a\text{-}1\right) \quad si\ a \le \tau(t) \\ &IC \quad H(t,0), \end{aligned} \tag{3.1}$$

donde $H(t+a,\, a)$ es la cantidad de la larvas preinfectivas (huevos, *L1* y *L2*) de edad a de la cohorte t; $\mu_{Pre}(.)$ es la tasa de mortalidad preinfectiva; $R(t+a)$ es la cantidad de milímetros de lluvia registrada durante el día juliano $t+a$; y $\tau(t)$ es el tiempo de desarrollo de huevo a *L*3 que se calcula con el modelo descripto en el capítulo anterior.

La condición inicial para esta ecuación es la tasa de aportes de huevos por parte de los parásitos adultos dentro de cada animal. Esta cantidad de huevos aportados diariamente se

[3]El Grupo de Parasitología de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires cuenta con más de 20 años de experiencia en el tema
[4] El sistema de numeración de año Juliano toma como el día juliano 1 al 1º de enero, el día juliano 2 corresponde al 2 de enero y así hasta el 31 de diciembre que será el día juliano 365.

relaciona con la cantidad de bosta producida por cada animal del rodeo y los conteos de HPG correspondientes al día juliano. De esta manera la cantidad de huevos aportados por día esta dado por:

$$H_t(0) = \begin{cases} NAnimal \;\; 6.3 \; HPG(t) \; Pa \;\; tWt(w) & \text{si es ternero con peso} = w \\ NAnimal \;\; 8.1 \; HPG(t) Pat \;\; Wt(w) & \text{si es vaca con peso} = w, \end{cases}$$

donde *Nanimal* es el número de animales del rodeo; *HPG(t)* es la cantidad de huevos por gramo en las bostas el día *t; PatWt* es el peso de cada bosta, que depende del peso del animal. Una vaca defeca en promedio 8.1 veces al día mientras que un ternero lo hace 6.23 veces por día. El peso en kilos de cada bosta (*PatWt*) está directamente relacionado con el peso del animal en kilos (*w*), de la siguiente manera:

$$PatWt(w) = 1000 \frac{0.000285(2.20462 \;\; W(t))^{1.361}}{2.20462} = 0.3795 \;\; W(t)^{1.361}$$ (Stromberg, 1997).

4.2.2. Supervivencia de las *L*3 en la bosta en espera de la ocasión para migrar.

En esta sección se describe la dinámica de la población de las *L*3 en la bosta.

El número de larvas de la población aumenta a medida que las diferentes cohortes van completando su desarrollo. Pérdidas en esta población serán debidas sea a la mortalidad mientras esperan a migrar, sea por migraciones hacia las pasturas. Si bien es cierto que la migración de las *L*3 se produce cuando llueve, es necesaria una cantidad mínima de lluvia para que esto ocurra. Esta cantidad dependerá, principalmente, de la época del año en la que la bosta llegó a la pastura. Por ejemplo, en verano el calor seca la superficie y en consecuencia se hace necesaria una lluvia más fuerte para liberar las larvas *L*3 disponibles.

La dinámica de esta población se describe ahora con la siguiente ecuación en diferencias:

$$L3D(t+1) = (1-\delta_{DP}(t,R(t))) \; (1-\mu_{ID}) L3D(t) + L3ND(t+1),$$

donde $L3D(t)$ es la cantidad de larvas *L*3 en la bosta en el día *t*; $L3ND(t+1)$ es la cantidad de larvas que completaron su desarrollo exactamente el día *t*; μ_{ID} es la tasa de mortalidad dentro de la bosta y $\delta_{DP}(.)$ es la tasa de migración a las pasturas.

4.2.3. Migración de *L*3 y dinámica de la población de *L*3 en la pastura

En esta sección se describe la dinámica de la población de *L*3 en la pastura.

Las larvas *L*3 que migraron son consideradas como una contribución a la población en la pastura. Las pérdidas se deberán a mortalidad en la pastura, que depende del clima y del

tiempo que llevan esperando. Cabe notar que la larva *L*3 en la pastura no puede alimentarse. De lo mencionado se deduce que la dinámica se describe con la siguiente ecuación en diferencias:

$$L3P(t+1) = (1-\mu_P(t,T(t)))L3P(t-1) + \delta_{DP}(t,R(t))L3D(t),$$

donde *L3P(.)* es la cantidad de larvas en la pastura y $\mu_P(.)$ es la tasa de mortalidad.

4.3. Parametrización del modelo

4.3.1. Tasa de mortalidad preinfectiva

El período en el que esta tasa actúa está determinado por los tiempos de desarrollo que se calcularon anteriormente. La mortalidad preinfectiva se ve afectada principalmente por las lluvias y la temperatura. Como se mencionó en el capítulo anterior, si las temperaturas superan los 40°C o están por debajo de los 5°C, la mortalidad es muy alta relativa a los valores que se observan en períodos con valores intermedios de temperatura (Levine, 1978).

Las variables lingüísticas para la función parámetro (función de membresía) son *Edad (L*1*, L*2*, L*3*)*, *Estación (Verano, Otoño Invierno, Primavera)* y *Precipitación (Débil, Moderada, Fuerte, Muy Fuerte, Torrencial)* como variables de entrada y *preMortalidad (Baja, Moderada, Alta)* como variable de salida. El tipo de función de membresía y los parámetros de cada una de ellas se definieron utilizando información proporcionada por la literatura consultada. Para la construcción de las reglas se trabajó en conjunto con los expertos del Grupo de Parasitología. Como fue mencionado con anteriormente, se debe destacar que la utilización de los sistemas FM permite capitalizar el conocimiento empírico de los expertos.

Este sistema refleja muchas situaciones a las que los parásitos se enfrentan en este período. Por ejemplo:

SI Edad es ***no L3*** *Y Estación es* ***Primavera*** *Y Precipitación es* ***Fuerte***
ENTONCES Mortalidad es ***Moderada****.*
SI Edad es ***L2*** *Y Estación es* ***Invierno*** *Y Precipitación es* ***Moderada***
ENTONCES preMortalidad es ***Baja****.*

Los parámetros y los tipos de funciones de membresía están detallados en la Tabla 4.1, así como la lista completa de reglas fue resumida en la Tabla 4.2.

Variable Lingüística(tipo)	***Nombre***	***Tipo***	***Parámetros***			
			α	β	γ	η
Edad (entrada)	*L1*	*Z*	*0*	*0.52*		
	L2	*Trapezoidal*	*0.2*	*0.4*	*0.7*	*0.9*
	L3	*S*	*0.7*	*1*		
Precipitación (entrada)	Debil	*Z*	*2*	*5*		
	Moderada	*Triangular*	*2*	*5*	*10*	
	Fuerte	*Trapezoidal*	*5*	*8*	*17*	*20*
	Muy Fuerte	*Trapezoidal*	*10*	*20*	*40*	*50*
	Torrenciales	*S*	*40*	*70*		
Estación (entrada)	*Verano*	*Z*	*0*	*136*		
	Otoño	*Trapezoidal*	*45*	*121*	*151*	*228*
	Invierno	*Trapezoidal*	*136*	*213*	*243*	*319*
	Primavera	*S*	*228*	*365*		
preMortalidad (salida)	*Baja*	*Z*	*0*	*0.35*		
	Moderada	*Triangular*	*0.2*	*0.4*	*0.6*	
	Alta	*S*	*0.5*	*1*		

Tabla 4.1: Variables lingüísticas para la tasa de mortalidad preinfectiva.

SI(Edad es *L3*)/ *SI (Edad no es L3)*										
Estación/Precipitación	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**	
1	1	*2*	1	*2*	2*0.5	*2*	2	*3*0.8*	2	*3*
2	1	*1*0.1*	2	*1*0.5*	2	*1*	3*0.5	*2*0.5*	2	*2*
3	1	*1*0.5*	1	*1*	1	*2*0.5*	1	*2*	1	*3*0.5*
4	1	*1*0.5*	1	*1*	1	*2*0:5*	1	*2*	1	*3*0.5*

Tabla 4.2: Base de reglas para el parámetro difuso mortalidad preinfectiva. El valor que acompaña a cada respuesta es el peso de la regla.

4.3.2. Migración de *L3* y dinámica de la población de *L3* en la pastura

Las larvas necesitan una película de agua para poder migrar fuera de la bosta. Este proceso depende principalmente de las precipitaciones y de la estación del año. Por ejemplo, en Verano, una precipitación de más de 50 mm será suficiente para *Ostertagia* mientras que para Invierno sólo serán necesarios 10 mm (Fiel y col., 1994; Gordon, 1973).

Las variables (funciones de membresía) seleccionadas por los expertos para este parámetro fueron: *Estación (Verano, Otoño Invierno, Primavera)* y *Precipitación (Débil, Moderada, Fuerte, Muy Fuerte, Torrencial)* como variables de entrada y *Migración (Muy baja, Baja, Moderada, Alta)* como variable de salida.

Las reglas para la descripción de las distintas situaciones fueron construidas en conjunto con los expertos. A modo de ejemplo:

SI Estación es ***Verano*** *Y Precipitación es* ***Moderada*** *ENTONCES Migración es* ***Muy Baja***.

El tipo y los parámetros de las funciones de membresía están detallados en la Tabla 4.3 y la lista completa de las reglas en la Tabla 4.4.

Variable Lingüística(tipo)	***Nombre***	***Tipo***	***Parámetros***			
			α	β	γ	η
Estación (entrada)	*Verano*	*Z*	*0*	*136*		
	Otoño	*Trapezoidal*	*45*	*121*	*151*	*228*
	Invierno	*Trapezoidal*	*136*	*213*	*243*	*319*
	Primavera	*S*	*228*	*365*		
Lluvias (entrada)	Debil	*Z*	*2*	*5*		
	Moderada	*Triangular*	*2*	*5*	*10*	
	Fuerte	*Trapezoidal*	*5*	*8*	*17*	*20*
	Muy Fuerte	*Trapezoidal*	*10*	*20*	*40*	*50*
	Torrenciales	*S*	*50*	*70*		
Migración (salida)	*Muy Baja*	*Z*	*0*	*0.1*		
	Baja	*Triangular*	*0.1*	*0.2*	*0.4*	
	Moderada	*Triangular*	*0.5*	*0.6*	*0.8*	
	Alta	*S*	*0.8*	*1*		

Tabla 4.3: Variables lingüísticas para la tasa de migración.

Estación /Precipitación	1	2	3	4	5
1	1*0.1	1*0.5	1	2	3
2	1	2	3*0.7	3*0.9	3
3	1*0.5	1	2	3*0.7	3
4	1*0.5	1	2	3*0.7	3

Tabla 4.4: Base de reglas para el parámetro difuso migración. El valor que acompaña a cada respuesta es el peso de la regla (Ej. Si Estación es 1 y Lluvia es 2 entonces Migración es 1 con un peso de 0.5).

4.3.3. Mortalidad en la pastura

Dado que las larvas *L*3 no se alimentan durante esta etapa, su supervivencia en la pastura depende de la energía acumulada en sus células intestinales y de su habilidad para ser ingerida por los bovinos una vez que está en la pastura. La temperatura y la humedad son los factores más importantes durante esta parte del ciclo de vida (Levine, 1978). En el invierno, las energías son consumidas lentamente, mientras que en verano las reservas se agotan rápidamente. Bajas temperaturas y una buena cobertura de pasto están asociadas con altos períodos de supervivencia (Besier y col., 1993).

Las variables lingüísticas (funciones de membresía) seleccionadas fueron *Estación (Verano, Otoño, Invierno, Primavera),* y *Temperatura (Baja, Media, Alta)* como variables de entrada y *MortalidadPastura (Muy Baja, Baja, Moderada, Alta)* como variable de salida.

La construcción de este sistema FM fue similar a la de los parámetros anteriores. Los tipos de funciones de membresía y sus parámetros están detallados en la tabla 4.5 y la lista completa de reglas en la Tabla 4.6.

4.4. Validación y análisis del modelo

4.4.1 Validación del modelo utilizando datos de campo

Los datos utilizados para validar el modelo son los obtenidos por Fiel y col. (2010a). Es necesario destacar que los animales sometidos al ensayo fueron mudados a parcelas “limpias” de larvas *L*3, principalmente para evitar que los animales se reinfectaran y resultara más claro determinar la variación estacional de la infectividad de las pasturas. En la calibración del modelo se utilizaron los datos de 1994 hasta fines de 1995. En la validación del modelo se utilizaron los resultados de 1996 y 1997. Las simulaciones del modelo se realizaron bajo las mismas condiciones en las que se hicieron los ensayos de campo:

- Los datos climáticos que se utilizaron en las simulaciones son correspondientes a Tandil para los años 1994 a 1998 (Figura 4.2).
- Se consideraron dos terneros de 200 Kg. de peso promedio.
- Los niveles de HPG fueron los registrados durante el ensayo.

Es necesario recordar que el período de muestreo del ensayo a campo fue cada 15 días. Es por ello que las salidas de las simulaciones del modelo fueron promediadas para facilitar la comparación y representación de los resultados.

Variable Lingüística(tipo)	***Nombre***	***Tipo***	***Parámetros***			
			α	β	γ	η
Estación (entrada)	*Verano*	*Z*	*0*	*136*		
	Otoño	*Trapezoidal*	*45*	*121*	*151*	*228*
	Invierno	*Trapezoidal*	*136*	*213*	*243*	*319*
	Primavera	*S*	*228*	*365*		
Temperatura (entrada)	*Baja*	*Z*	*0*	*14*		
	Moderada	*Trapezoidal*	*10*	*15*	*23*	*26*
	Alta	*S*	*23*	*32*		
MortalidadPastura (salida)	*Baja*	*Triangular*	*0*	*0.2*		
	Moderada	*Triangular*	*0.1*	*0.2*	*0.4*	*0.5*
	Alta	*S*	*0.25*	*0.7*		

Tabla 4.5: Variables lingüísticas para la tasa de mortalidad en la pastura.

Estación/Temperatura	**1**	**2**	**3**
1	1	2	3
2	1	$2_{*0.5}$	$3_{*0.5}$
3	1	1	$2_{*0.5}$
4	1	$2_{*0.5}$	$3_{*0.5}$

Tabla 4.6: Base de reglas para el parámetro difuso mortalidad en la pastura.

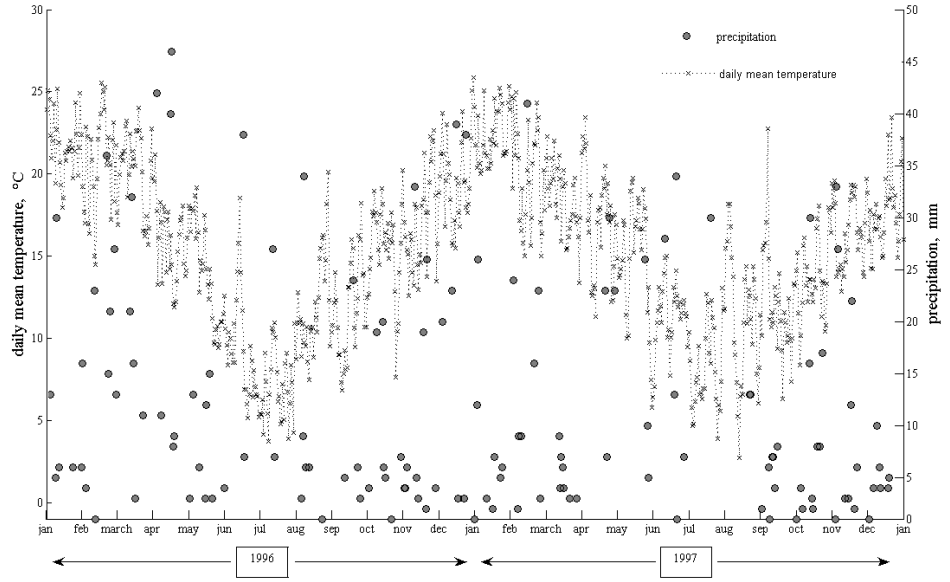


Figura 4.2: Datos meteorológicos de Tandil del período 1996-1997: Temperatura media diaria (- -x- -) y milímetros de lluvia diaria (●).

4.4.2. Análisis de la respuesta del modelo a variaciones en las condiciones ambientales.

Se construyeron distintos escenarios para evaluar la respuesta del modelo a las variables ambientales Temperatura y Precipitación.

Con el fin de analizar el efecto que producen series de temperaturas esencialmente diferentes, se realizaron simulaciones con datos de temperaturas de las ciudades de Mercedes ($\bar{X}$=20.24°C; s=5.85°C), Marcos Juárez ($\bar{X}$=17.3°C; s=5.77°C) y Tandil ($\bar{X}$=14°C; s=5.4°C) de las provincias de Corrientes, Córdoba y Buenos Aires respectivamente. Con el propósito de facilitar las comparaciones, para cada una de las simulaciones se fijaron los valores de HPG y se utilizó una única serie de precipitaciones, correspondiente a Tandil en el año 1995. Las series de temperaturas utilizadas para cada una de las ciudades corresponden a los años 2006 y 2007.

Para analizar el efecto de los cambios en las series de precipitaciones, se utilizan los datos de temperatura de Tandil del año 1995 y se estudió la respuesta del modelo al variar la estacionalidad de las lluvias. Para ello, se tomo la serie de precipitaciones correspondiente a los tres meses de la primavera del año 2005 en Tandil, a la que se designa SP. Seguidamente, con SP se construyeron cuatro series nuevas:

$$LL\#(i) = \begin{cases} SP(i) & si\ i \in [k, k+90] \\ 0 & otro\ caso. \end{cases}$$

con las que se realizaron simulaciones considerando que si $k = 0$ la estación de la lluvia corresponde al verano, si $k = 90$ corresponde al otoño; si $k = 180$, al invierno y si $k = 270$, a la primavera.

4.5. Implementación del modelo

El modelo se implementó utilizando un código para Matlab. Las entradas para el modelo son:

- Datos climáticos: Temperatura media diaria y precipitación diaria.
- Día Inicial y Día Final del período de estudio: Se considera que durante este período los animales están "sembrando" bostas con huevos sobre la pastura.
- Cantidad y tipo de animales (ternero o vaca) en el potrero.
- Registro de HPG en el período de estudio.
- Peso promedio de los animales en el potrero.

Los resultados de las simulaciones hechas con este programa se presentan en forma de gráficos. Los gráficos generados pueden ser utilizados para analizar distintos aspectos de la población. Los datos numéricos de la simulación también se encuentran disponibles en caso de ser necesaria la utilización de los mismos.

4.6. Resultados numéricos

4.6.1. Presencia de *L*3 en las pasturas

Los resultados obtenidos por Fiel (2010a) reportan que la infectividad de las pasturas mostraron una marcada estacionalidad durante otoño, invierno y primavera, mientras que en verano la presencia de larvas en el pasto es casi nula, siendo esta última estacion la responsable de la gran mortandad de larvas en la pastura. Esto último es consecuencia de las altas temperaturas y la poca lluvia registrada en esta estación. Se observó que, cuando las larvas llegaron a la pastura entre los meses de marzo y agosto, el tiempo de supervivencia fue mayor a un año.

Los resultados de las simulaciones correspondientes son los siguientes:

<u>Período Enero-Junio en el año 1996</u>

En este semestre, la temperatura media fue igual a la media histórica de Tandil (13.75°C) y el total de precipitaciones (567 mm) fue mayor que la media para este período (455 mm).

Según el modelo, las cohortes de larvas correspondientes a los meses de enero-marzo aparecen en la pastura en los primeros días de enero pero en niveles muy bajos. A partir de mediados de febrero se hace más marcada la presencia de las *L*3 con variaciones muy marcadas y presentando un pico de infección a mediados de abril. Luego de este pico la población va decreciendo lentamente hasta desaparecer la cohorte en octubre.

La dinámica de las cohortes de larvas correspondientes a los meses de abril-junio tiene un comportamiento similar a las cohortes de enero-marzo. Las primeras larvas en el pasto aparecen a mediados de abril y luego la población crece con oscilaciones hasta julio. A mediados de junio se produce un pico de infección y se mantiene una alta presencia de las *L*3 en el pasto con variaciones hasta mediados de septiembre. A partir de este momento, la abundacia comienza a descender hasta que desaparecen en la primer quincena de octubre. La simulación completa se puede ver en la Figura 4.3(*a*).

Período Enero-Junio (verano-otoño) 1997

En este año, la temperatura media fue igual que la media de Tandil (13.75°C) y se registraron 500 mm de precipitaciones en el semestre, siendo levemente mayor a la media histórica (455 mm).

Según el modelo, las primeras larvas de las cohortes que corresponden a los meses de enero-marzo se encuentran en la pastura a fines de enero, en niveles bajos con unos pocos días de supervivencia en la pastura. A mediados de mayo se observa un pico de infección, coincidente con la aparición de las primeras larvas de las cohortes de abril-junio. Después de este pico de infección, la población comienza a decaer hasta desaparecer de las pasturas en el mes de octubre.

Las cohortes de abril-junio presentan un comportamiento similar al de las cohortes de enero-marzo pero con niveles más bajos, presentado el pico de infección en los meses de junio-julio. La población de *L*3 en el pasto desaparece entre los meses de octubre-noviembre. La simulación completa se puede ver en la Figura 4.3(*b*).

Período Julio-Diciembre (invierno-primavera) 1996

En este semestre la cantidad de precipitaciones registrada (466 mm) fue prácticamente igual a la media histórica de este periodo (433 mm)

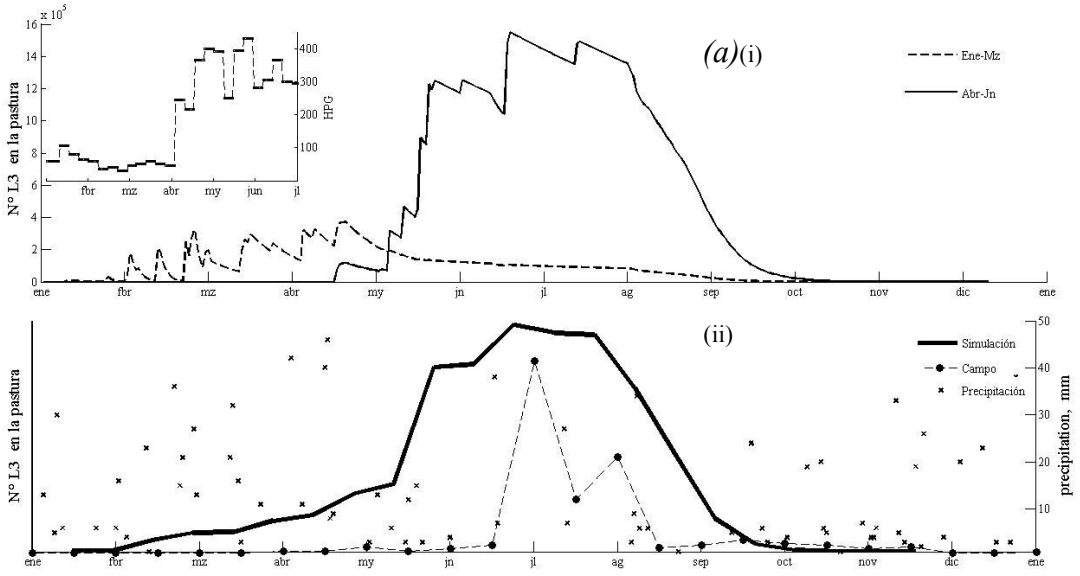
Según el modelo, las primeras *L*3 de las cohortes de julio-septiembre aparecen los primeros dias de septiembre. Desde aquí hasta principios de octubre se da una serie de picos de infección de distintos niveles. En el mes de noviembre se registra el pico de infección máximo y luego la población decrece lentamente hasta desaparecer a principios de diciembre. A mediados de diciembre aparecen en la pastura las primeras *L*3 pertenecientes a las cohortes de octubre-diciembre, y se da una serie de picos de infección a mediados de enero y mediados

de febrero. Luego de este último pico, la población de larvas desciende hasta desaparecer a fines de marzo. La simulación completa se puede ver en la Figura 4.4(*a*).

Período Julio-Diciembre (invierno-primavera) 1997

En este semestre la temperatura media fue igual a la media de Tandil y la cantidad total de lluvia registrada (618 mm) superó ampliamente la media histórica de la zona (433 mm).

Según el modelo, no se registra presencia de *L*3 correspondientes a las cohortes de julio-septiembre hasta el mes de octubre. El pico de infección para estas cohortes toma lugar en el mes de noviembre. Luego, la poblacion decrece hasta desparecer a fines del mes de diciembre. Las primeras *L*3 de las cohortes de octubre-diciembre aparecen a mediados de noviembre, pero sostienen sólo unos pocos días de supervivencia en la pastura. La máxima abundancia de *L*3 se alcanza a fines de febrero. Finalmente, se registran en niveles muy bajos desde principios de abril hasta julio. La simulación completa se puede ver en la Figura 4.4(*b*).



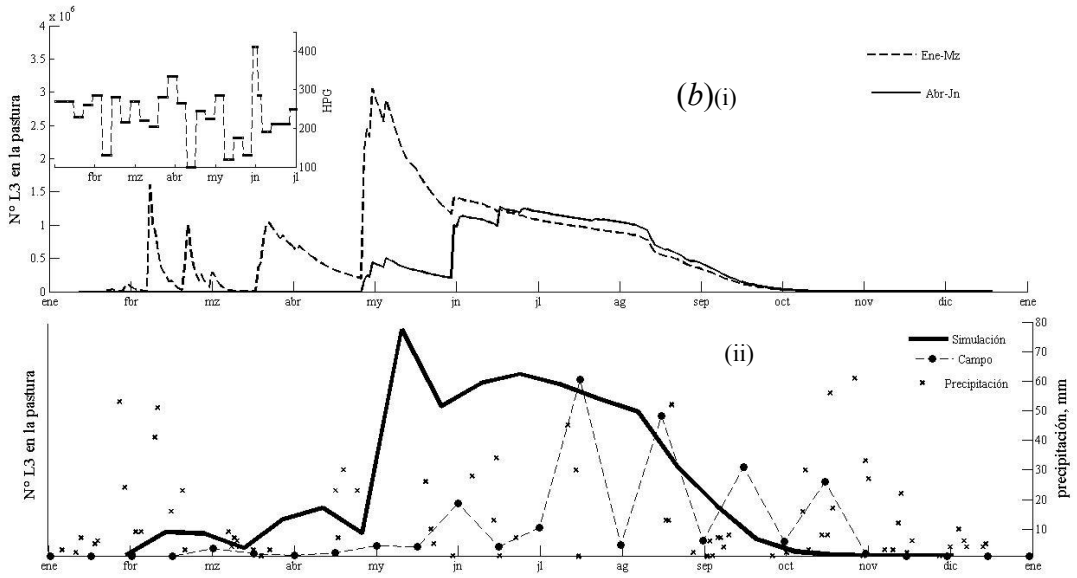


Figura 4.3:(a)(i) Resultados de simulaciones realizadas con datos climáticos de Tandil correspondientes a verano-otoño de 1996. En cada caso, las cohortes que de enero a marzo se representan con (·····) y las de abril a junio (——).(ii) Promedios quincenales de las simulaciones (▬) y datos de los ensayos a campo (—●—). Las precipitaciones sobre el periodo de estudio (×).En el recuadro superior se presentan los valores de HPG con las que las pasturas fueron infectadas a lo largo del período de estudio.

(b) Lo mismo que antes para condiciones climáticas correspondientes al año 1997.

4.6.2. Análisis de la respuesta del modelo a variaciones de condiciones ambientales.

La dinámica de la infección de la pastura no presentó variaciones significativas entre las diferentes series de temperatura utilizadas. La diferencia reside fundamentalmente en la abundancia de *L*3 en la pastura (Figura 4.5).

Los distintos regímenes de precipitación en las tres zonas consideradas hacen variar sustancialmente la dinámica de la infección. Esto se observa en la Figura 4.6, donde los picos de infección cambian claramente así como los valores de abundancia de *L*3.

Los experimentos de simulación permitiendo precipitaciones sólo durante una estación arrojan los resultados siguientes. Si las lluvias se presentan en invierno, entonces la contaminación de la pastura comienza en el invierno, con larvas residentes en los reservorios de bosta desde el verano, esperando la oportunidad de migrar. Dado las bajas temperaturas invernales, el tiempo de supervivencia en la pastura es mayor. Si las lluvias ocurren únicamente en primavera, la presencia de las larvas se da durante toda la primavera y principios del verano. Las precipitaciones en verano y las altas temperaturas hacen que rápidamente se registren larvas en la pastura, pero con poca persistencia, logrando llegar sólo

algunas pocas al verano siguiente. Las lluvias en otoño son las que más benefician a la población, que llega en otoño a las pasturas y, por las bajas temperaturas logra sobrevivir hasta principios de la primavera.

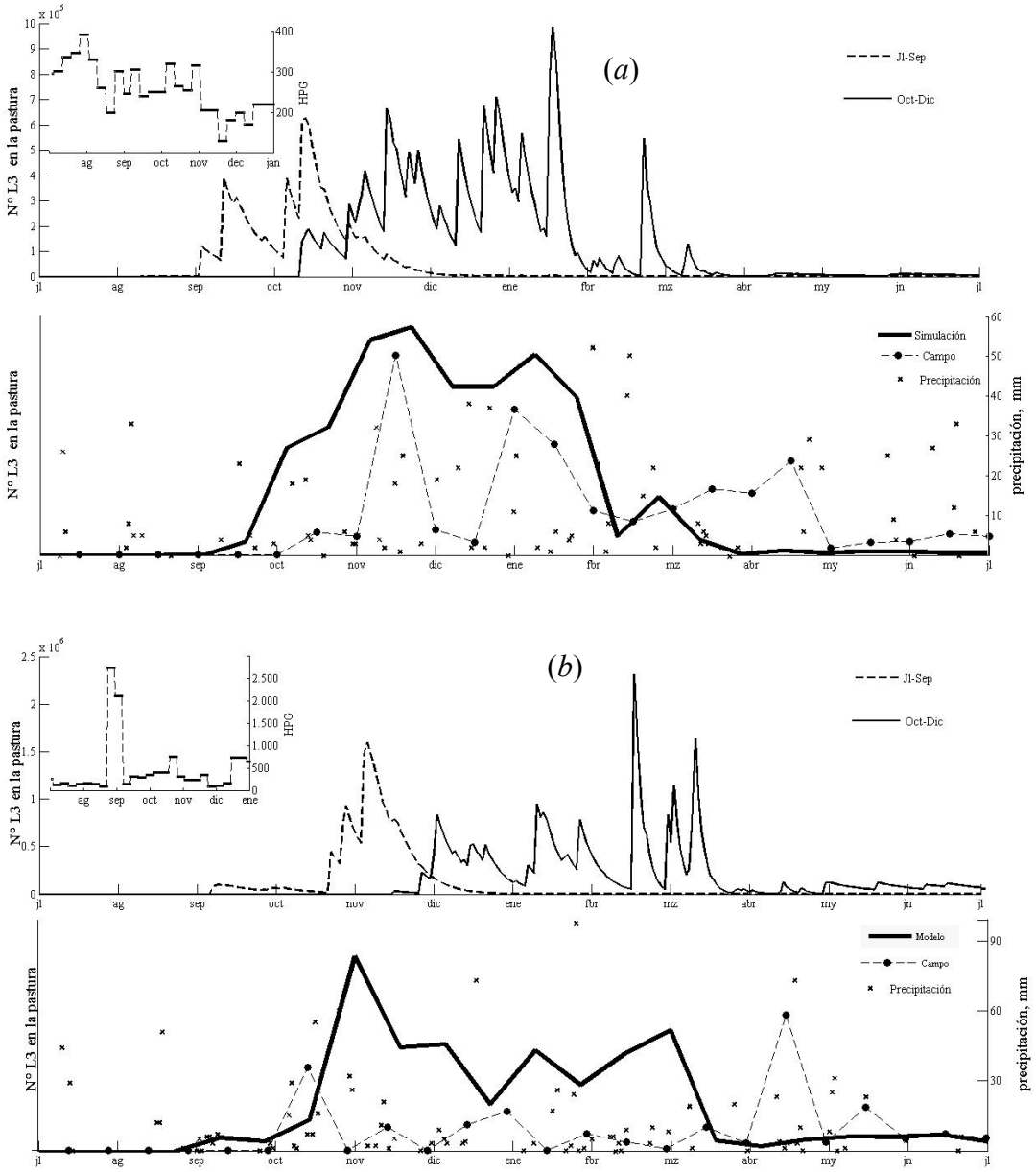


Figura 4.4:(a)(i) Resultados de simulaciones realizadas con datos climáticos de Tandil correspondientes a invierno-primavera de 1996. En cada caso, las cohortes que de julio a septiembre se representan con (------) y las de octubre a diciembre (——).(ii) Promedios quincenales de las simulaciones (▬) y datos de los ensayos a campo (−●−). Las precipitaciones sobre el periodo de estudio (×).En el recuadro superior se presentan los valores de HPG con las que las pasturas fueron infectadas a lo largo del período de estudio.

(b) Lo mismo que antes para condiciones climáticas correspondientes al año 1997.

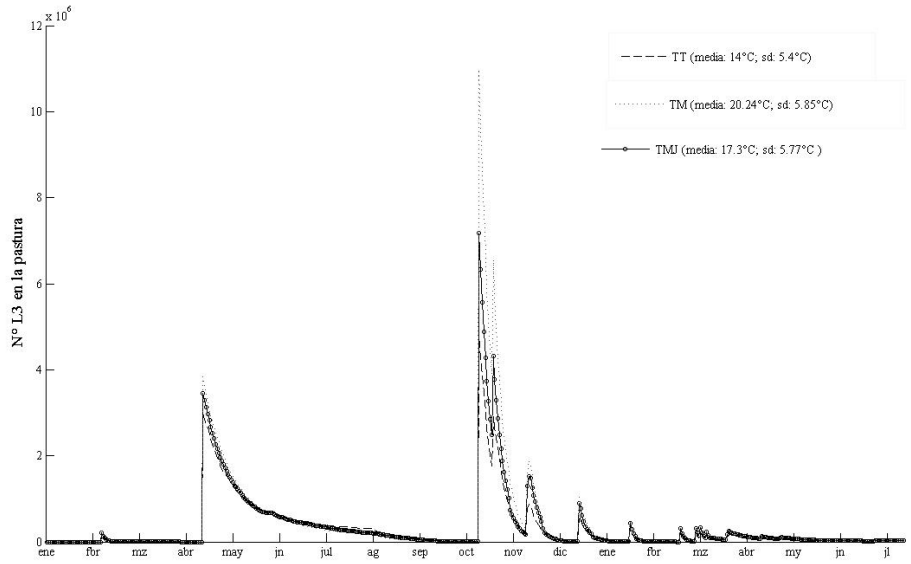


Figura 4.5: Respuestas del modelo a variaciones en las series de temperatura. Las series corresponden a: (·····) Mercedes ($\bar{X}$=20.24°C; s=5.85°C), provincia de Corrientes, (--o--) Marcos Juárez ($\bar{X}$=17.3°C; s=5.77°C), provincia de Córdoba y (- - -) Tandil ($\bar{X}$=14°C; s=5.4°C), provincia de Buenos Aires.

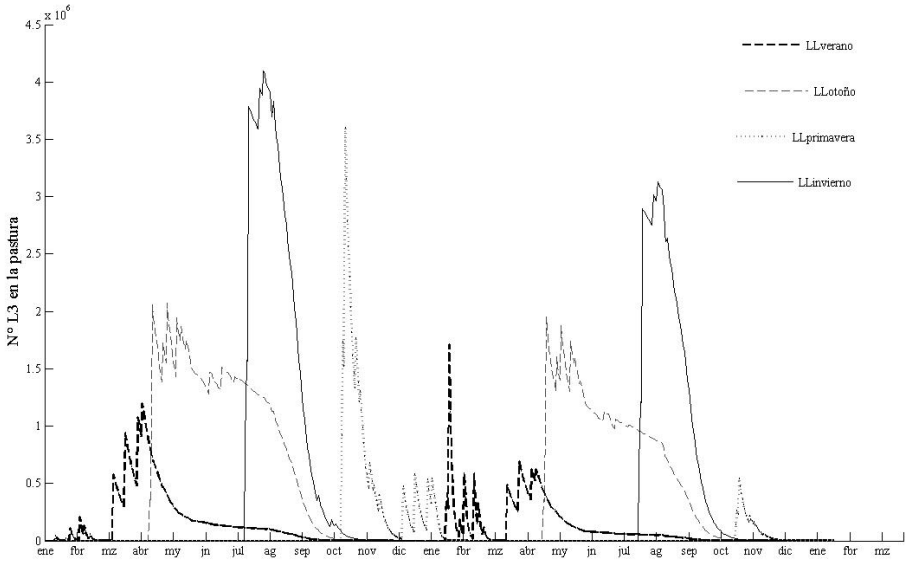


Figura 4.6: Respuesta a variaciones en la estacionalidad de las lluvias. Se utilizó una única serie de temperaturas, correspondiente a Tandil del año 1995. La estacionalidad de las lluvias en verano (- - -); Otoño (– –); Invierno (——) y Primavera (·····).

4.7. Discusión

Es muy importante comprender la dinámica epidemiológica cuando se intenta realizar un control efectivo y eficiente de la enfermedad. El modelo aquí construido, permite una

visualización de posibles efectos sobre las pasturas en relación con los valores de HPG promedio del rodeo. Claramente, la cantidad de animales que tiene el sistema de producción afecta a la cantidad de huevos que son aportados al sistema. Este modelo está construido en base a datos de tiempos de desarrollo, infectividad de pasturas y supervivencia de las *L*3, provisto por el Grupo de Parasitología. Esta experiencia fue fundamental para la construcción de las funciones-parámetro del modelo y los datos obtenidos a campo sólo se utilizaron para la calibración y corroboración del modelo.

Es necesario destacar que en el ensayo de campo utilizado para parametrizar y testear el modelo no consideró las tasa de pastoreo. Cuando éstas son altas, producen un daño mecánico sobre las bostas pues son pisoteadas por los animales, produciendo un aumento considerable en las tasas de mortalidad tanto preinfectiva. Las larvas son entonces expuestas a las condiciones ambientales, se degradan los reservorios, como es la pastura y de esa manera se reduce la cantidad de pasto que podría proteger a las larvas *L*3 liberadas.

Los resultados de las simulaciones sugieren diferentes implicaciones acerca de la dinámica de la infección sujeta a variaciones en las condiciones meteorológicas. Es de destacar que el modelo fue analizado sobre un amplio espectro de situaciones, dando como resultado variaciones en los patrones de infección en las pasturas. El modelo refleja el impacto que produce la estacionalidad de las precipitaciones sobre las poblaciones pre-infectivas (en la bosta) e infectivas (en la pastura), corroborando la hipótesis de que la lluvia es el principal factor que regula la infección. Por otra parte, la variable temperatura en el modelo no parece generar cambios en la dinámica de la población, aunque sí lo hace en los niveles de infección de *L*3 que se alcanza en la pastura. Se deja así en evidencia que la temperatura es un factor influyente sobre las tasas de mortalidad preinfectiva y en la pastura. Este tipo de comportamiento nos permite utilizar al modelo en otras zonas.

El modelo replica adecuadamente la dinámica de la infección en la pastura en los distintos años en los que se validó. Esta representación se refleja en la coincidencia de las simulaciones con los datos de campo en varios aspectos claves de la parasitosis:

- momento en el que aparecen la primeras larvas *L*3 en la pastura (Tabla 4.7),
- los días o meses en los que se producen picos de infección (Tabla 4.8),
- la duración de la infección Tabla 4.9).

Semestre: (Año)	Comienzo de la infección	
	Campo	Simulación
1:(1996)	Abril 1996	Enero 1996
2:(1996)	Octubre 1996	Septiembre 1996
1:(1997)	Marzo 1997	Febrero 1997
2:(1997)	Octubre 1997	Septiembre 1997

Tabla 4.7: Comienzo de la infección en pasturas de Tandil obtenidos de datos de campo, y resultados de simulaciones.

Esta información es la necesaria para poder realizar un diagnóstico de la enfermedad

La estimación del nivel de infección de las pasturas está influenciada por varios factores que pueden inducir una precisión pobre. Muchos de los factores que afectan la precisión de esta estimación pueden ser listados. Por ejemplo, el clima al momento del muestreo, el tipo de pastura, la época del año en el que se hace el muestreo, el momento del día en el que se hace el muestreo, y desde luego también las técnicas de laboratorio para el procesamiento y recuperación de las *L*3 (Ferreyra y col., 2003; Fiel, y col., 1994).

Semestre: (Año)	Pico de infección	
	Campo	Simulación
1:(1996)	Julio 1996	Julio 1996
2:(1996)	Noviembre-Diciembre 1996	Noviembre-Diciembre 1996
1: (1997)	Julio-Agosto 1997	Mayo-Junio 1997
2: (1997)	Abril-Mayo 1998	Noviembre 1997

Tabla 4.8: Pico de infección en pasturas de Tandil obtenidos de datos de campo y resultados de simulaciones.

Creemos que estas dificultades en la obtención de una estimación confiable en las densidades de larvas en las pasturas puede ser la causa de la diferencia entre los valores obtenidos en las simulaciones y los estimados con los trabajos de campo, que siempre fueron mucho más bajos. En tal sentido, los métodos de conteo de huevos son bastante más confiables.

En relación con las *L*3 listas para emigrar, no es todavía posible evaluar la bondad de los resultados obtenidos de las simulaciones porque no se han registrado datos sobre esta materia durante experimentos de campo. Sería interesante tener esta información para corroborar completamente el modelo y evaluar indirectamente la calidad de las estimaciones de la

infección de la pastura. Con respecto a la tasa de migración, creemos que es muy importante determinar con precisión este parámetro con un diseño experimental apropiado, porque hasta el momento no ha sido tomado en cuenta en los trabajos de campo.

Semestre: (Año)	**Fin de la infección**	
	Campo	Simulación
1:(1996)	Fin de Noviembre 1996	Mediados de Octubre 1996
2:(1996)	Fin de Julio 1997	Fin de Julio 1997
1:(1997)	Fin de Ocubre 1997	Fin de Septiembre 1997
2:(1997)	Fin de Julio 1998	Fin de Julio 1998

Tabla 4.9: Fin de la infección en pasturas de Tandil obtenidos de datos de campo y resultados de simulaciones.

Si bien el modelo no muestra precisión en la estimación del número de larvas en la pastura respecto de lo recogido en los trabajos de campo, es necesario destacar que el objetivo de este trabajo está en la descripción de la dinámica de la infección y no en el cálculo preciso de los niveles de infección de la pastura. No obstante, si se tuviera con precisión la tasa de migración y supervivencia en las pasturas, el modelo podría calcular con precisión estas abundancias.

La utilización del modelo permite evaluar posibles escenarios a los que se puede enfrentar un sistema de producción, dando una visión rápida de la dinámica de la misma. Los escenarios son tan diversos como se deseen. Es posible considerar cambios en los valores de HPG o cambios en el régimen de precipitaciones y/o temperaturas medias de la zona.

Es posible simular los distintos tratamientos de desparasitación considerando que, al ejecutarse, se produce una reducción del HPG a casi cero, durante el tiempo que tiene efecto el antiparasitario. Con estas simulaciones es posible proponer estrategias de reducción de los valores de HPG y analizar el efecto que se producirán en las pasturas. En la Figura 4.7 se muestra una simulación a modo de ejemplo. Las simulaciones permiten determinar cuándo habría sido el momento adecuado para la realización de la desparasitaciones. Consideramos que ésta no es una situación real ya que este modelo describe la dinámica de la infección para un patrón de HPG fijo, sin considerar que esta reducción afecta a todo el sistema compuesto por las distintas poblaciones de huevos, $L3$ en la pastura y parásitos adultos. Con el modelo completo del ciclo de vida, esto será representativo de la situación real en condiciones de campo.

4.8. Conclusiones

La característica más importante del modelo es su simplicidad, pues es un sistema de tres ecuaciones en diferencia parametrizadas con sistemas de inferencia difuso. Dicha simplicidad es una consecuencia de haber seleccionado sistemas de difusos para la definición de los parámetros, lo que permite el manejo de una gran cantidad de variables e información que no es fácilmente cuantificable y que no hubiera sido posible incluirlo si hubiésemos usado herramientas matemáticas clásicas. La inclusión del conocimiento ganado a través de los años de investigación es un aspecto muy valioso de esta técnica de modelado.

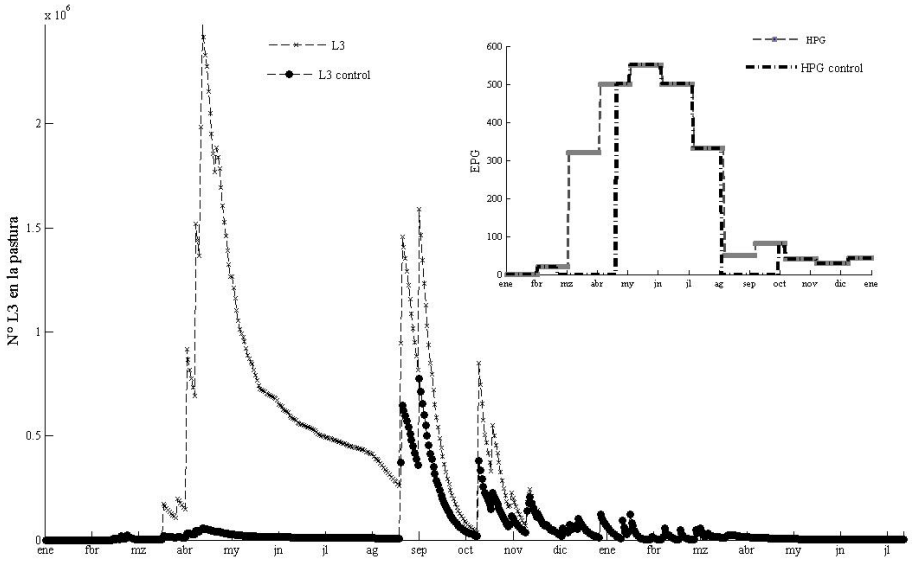


Figura 4.7: Simulación de una posible estrategia de control de control parasitario por medio de reducción en los valores de HPG. Para las simulaciones fueron utilizadas las condiciones climáticas de Tandil en el año 2005. En el recuadro superior se representó una curva teórica de HPG sin control (– · ·) y otra con una aplicación de un antiparasitario (.....) con tiempo de acción de 56 días. Las curvas muestra la infección de las pastura sin el control (--x--) y con el control parasitario (--o--).

V. ETAPA PARASITARIA: HIPOBIOSIS, UNA ESTRATEGIA DE SUPERVIVENCIA.

En este capítulo desarrollaremos el modelo para describir la dinámica de la población de larvas *L*3, *L*4 y adultos. Las condiciones ambientales y los tiempos de espera de las *L*3 en la pastura son las variables utilizadas para describir los procesos que afectan a esta población. El modelo considera a la población divida en dos subpoblaciones, una compuesta por las *L*3 en la pastura y otra compuesta por larvas *L*4 y adultos dentro del hospedador. El modelo consiste de dos ecuaciones en diferencias, parametrizadas con sistemas de inferencia difusos del tipo Mamdani (FM). La principal dificultad que se presenta para modelizar esta parte del ciclo de vida de *Ostertagia* es el proceso de inhibición y desinhibición del desarrollo en estadios previos al adulto llamado hipobiosis. El modelo calcula qué proporción de larvas ingeridas se inhibirán y cuál será el tiempo que durará esta inhibición.

Dado que este proceso no ha sido todavía totalmente comprendido, se realizaron una serie de perturbaciones en las distintas variables de entrada utilizadas con el fin de analizar posibles hipótesis. El modelo se comparó con datos de ensayos a campo, presentando una buena réplica de lo que sucede en condiciones naturales.

5.1. Introducción al problema

El período de prepatencia, es decir el tiempo que transcurre desde que el hospedador ingiere una forma infectante (larva, huevo) hasta la salida del primer huevo en heces que, en el caso de *Ostertagia ostertagi,* es de aproximadamente tres semanas. Sin embargo, es posible que ocurra la inhibición del desarrollo, por lo cual este período puede extenderse desde dos hasta cinco meses. Esta inhibición estacional del desarrollo ante condiciones adversas y hostiles permite incrementar la supervivencia de la progenie (Eysker, 1993). Se considera que para *Ostertagia* la hipobiosis es iniciada por una señal ambiental recibida por las *L*3 de vida libre. Cuando estas *L*3 infectan a un hospedador, se inhiben en los tejidos del hospedador como L4 tempranas (L4i). En regiones templadas a cálidas del hemisferio norte, la hipobiosis está relacionada con el comienzo de la temporada seca, ya que condiciones climáticas secas son un riesgo para la supervivencia y desarrollo de las etapas de vida libre. Por ejemplo, en el sur de los Estados Unidos *Ostertagia* inhibe su desarrollo en primavera-verano (Couvillion y col., 1996), mientras que en nuestra región se ha determinado que la actividad inhibitoria comienza a finales del invierno (Agosto) y cesa a principios de Enero (Fernández y col, 1999).

En la mayoría de los trabajos consultados se hace referencia a que los cambios en el régimen de temperaturas "acondicionan" a las larvas *L*3 para detener su desarrollo. Esto fue probado en condiciones controladas por diversos autores (Mitchel, 1975; Fernández y col., 1999) así como en condiciones de campo (Mitchel y col. 1978; Suárez, 1990; Lutzelschwab y col., 2005). La denominación usual para este fenómeno es la de "acondicionamiento" de las larvas.

En la región de la Pampa Húmeda, Lutzelschwab y col. (2005) mostraron que el cambio de la cantidad de horas de luz del día (fotoperíodo) y el tiempo que transcurren las *L*3 esperando en las pasturas son variables a tener en cuenta. Las causas precisas de la desinhibición de *Ostertagia ostertagi* no han sido determinadas, sin embargo se han descripto algunos aspectos de su mecanismo.

Las larvas inhibidas comenzarían a desinhibirse hacia el final del período de adversidad climática, y los efectos clínicos sobre el hospedador dependerán, por un lado del número de larvas que se inhibieron previamente, pero especialmente de la dinámica del fenómeno de desinhibición. Si la desinhibición es asincrónica, y una limitada cantidad de larvas van reasumiendo el desarrollo en cortos períodos consecutivos (en ondas), la presentación será subclínica o con escasos casos clínicos (4-5% del rodeo). En cambio, si la desinhibición es masiva, una gran cantidad de larvas reanudarán el desarrollo simultáneamente, presentándose el cuadro clínico conocido como *"ostertagiasis tipo 2"* que abarca la posibilidad de mortandad de animales.

La primera situación, desinhibición asincrónica, se produce regularmente en la Pampa Húmeda con condiciones climáticas normales que condicionan un ofrecimiento constante de *L*3 y la inhibición progresiva en el hospedador durante el pastoreo de primavera. Por el contrario, la presentación de sequías invernales determinará la acumulación de *L*3 en los reservorios (deposición fecal) que, ante las primeras lluvias de primavera, se trasladarán masivamente a las pasturas favoreciendo la ingestión de gran cantidad de *L*3 en un corto período y la presentación clínica de la enfermedad durante el verano como consecuencia de la desinhibición sincrónica de larvas en la mucosa abomasal.

Los resultados obtenidos en los ensayos de campo indicarían que las *L*4i se desinhiben en forma de ondas. Esto es coincidente con lo insinuado previamente por Fiel y col. (2010b), y de alguna manera contrasta con lo enunciado por Armour (1978) quien sugiere que la desinhibición ocurre espontáneamente y de forma sincrónica.

En los resultados obtenidos por Fiel y col. (2010b) en ensayos a campo hacen referencia a una primera onda de desinhibición en el mes de Diciembre y a una segunda que tiene lugar a partir de Febrero. La primera onda de desinhibición no parece resultar muy beneficiosa para la población. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los adultos tardan tres semanas en

comenzar a poner huevos y que el tiempo de desarrollo de huevo a *L*3 en verano es, en promedio, de nueve días. Considerando además el tiempo que tardan las *L*3 en migrar, éstas llegarían a las pasturas pasado el mes de Febrero, siendo las condiciones climáticas en ese momento favorables para su supervivencia. En la segunda onda de desinhibición, las *L*3 llegan a las pasturas a principios de otoño, siendo esto conocido como "pie de infección" en el que la abundancia de *L*3 en la pastura es muy alta y las condiciones son excelentes para la supervivencia.

Aún cuando es posible detectar estas ondas de desinhibición, los mecanismos de porqué se producen o qué factores inducen a las larvas a desinhibirse no han sido descriptos hasta la fecha.

Williams y Knox (1988) proponen que las mismas condiciones ambientales responsables de la inhibición podrían ser las responsables del proceso de desinhibición. Por otra parte Armour (1978) sugiere que la desinhibición se produce entre 16 y 18 semanas post-inhibición. Las hipótesis son diversas y el comportamiento de Ostertagia depende fuertemente de las condiciones climáticas a las que se encuentra expuesta la población.

Es necesario destacar que las larvas hipobióticas están deprimidas metabólicamente y por lo tanto, son menos susceptibles a algunos antihelmínticos. Es por esto que resulta muy importante y necesario poder determinar los patrones de infección en las pasturas y cuáles serán sus efectos post-pastoreo.

5.2 Descripción del modelo

Se presenta aquí un modelo de tiempo discreto que tiene por objetivo describir la dinámica de la población de parásitos adultos en el hospedador a lo largo del tiempo, en relación con los niveles de infección de las pasturas y de las condiciones climáticas de la zona de estudio.

Como se mencionó antes, hay evidencias de que el proceso de hipobiosis está fundamentalmente disparado por las condiciones ambientales a las que enfrentaron las larvas *L*3 antes de ser ingeridas. En consecuencia, se decidió dividir el modelo en dos módulos. El primero tiene por objeto determinar y describir la población de *L*3 que se encuentran en la pastura a la espera de ser ingeridas. El segundo módulo describe la población de los adultos en el hospedador. El modelo conceptual está representado en la Figura 5.1. Se utilizó un código en Matlab para realizar las simulaciones del modelo. El programa genera un gráfico que muestra la dinámica de las poblaciones de parásitos adultos y de larvas inhibidas en el período de estudio.

5.2.1. Modelo para la población de larvas infectivas en la pastura

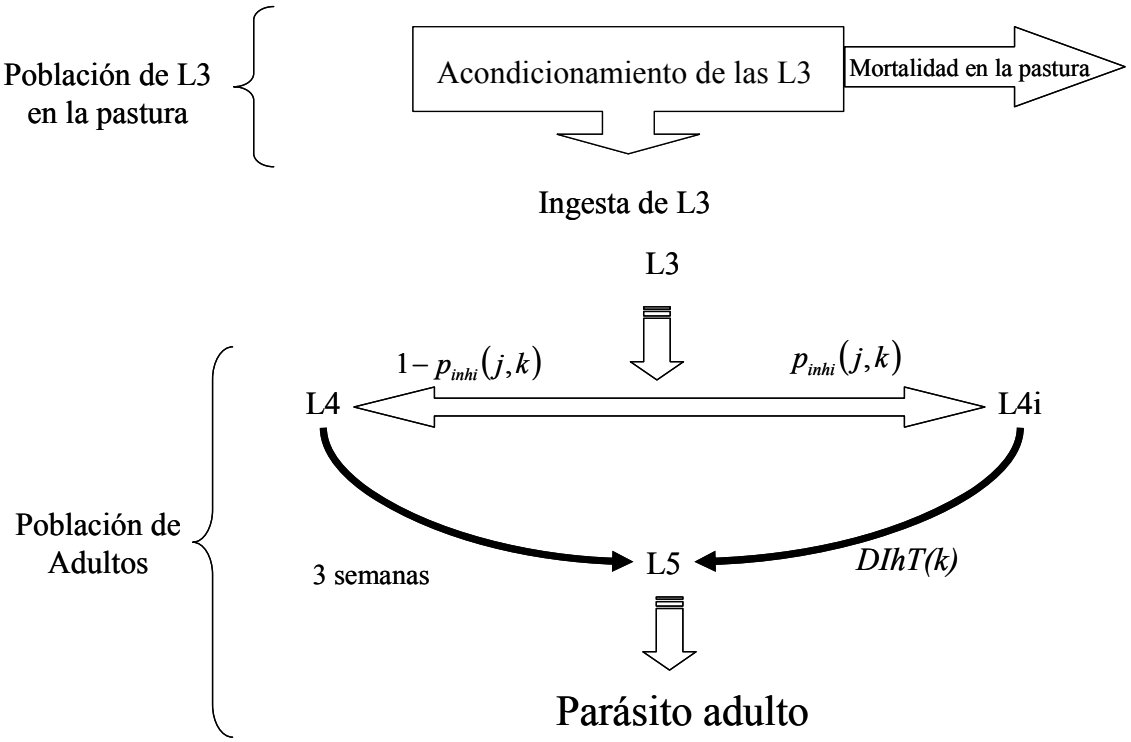


Figura 5.1: Modelo conceptual de la fase parasitaria.

La dinámica de la población en la pastura está regulada principalmente por las condiciones ambientales de la región (Fiel y col., 2010b). Dicha dinámica, desde el punto de vista del modelo, se puede resumir en dos procesos:

1. Aporte de individuos a través de las larvas *L*3 que migran de la bosta hacia la pastura.
2. Reducción del número de individuos *L*3 de la pastura debido a:
   - *i)* la ingesta de larvas por parte de los bovinos;
   - *ii)* la mortalidad por condiciones naturales.

Llamemos $P_{L3k0}(k)$ al número total de *L*3 en la pastura *k* días después de comenzado el ensayo el día juliano *k*0. Sea $C_j(a)$ la *j*-ésima cohorte de edad *a*, que estará compuesta por *L*3 que migraron de las bostas hacia las pasturas el *j*-ésimo día juliano y han transcurrido *a* días en la pastura desde el día de la llegada. En el caso de no registrarse migración de larvas a la pastura, la cohorte tendrá cero individuos.

Entonces $P_{L3k0}(k)$ puede hallarse utilizando la siguiente expresión:

$$P_{L3k0}(k) = C_{k+k0}(0) + \sum_{i=1}^{k-1} C_{i+k0}(k-i), \qquad (6.1)$$

donde $C_{k+k0}(0)$ es la cohorte que se agrega el $k+k_0$-ésimo día juliano y $C_{i+k0}(k\text{-}i)$ la cantidad de *L*3 remanentes de las distintas cohortes el día anterior.

Si tomamos la cohorte $C_m(a)$, podemos considerar que no existe aporte de nuevos individuos y que sólo existe extracción de individuos por muerte o ingesta del hospedador. Entonces el número de larvas de la cohorte en el día siguiente está dado por la siguiente expresión:

$$C_m(a+1) = (1-\mu_P(m,a))\,C_m(a) - p(m,a)I(a+m), \tag{6.2}$$

siendo $\mu_P(m,a)$ la mortalidad en la pastura para la cohorte $C_m(a)$, $p(m,a)$ la probabilidad de ingerir una larva de la cohorte, e $I(a+m)$ el número de larvas ingeridas el día juliano $a+m$.

Asumiendo que las larvas se encuentran distribuidas uniformemente en toda la pastura, el valor de $p(m,a)$ está dado por el cociente entre la cantidad de larvas de la cohorte sobre la cantidad total de larvas en el pasto:

$$p(m,a) = \frac{C_m(a)}{P_{L3m}(a)}. \tag{6.3}$$

Por lo tanto, con estas ecuaciones tenemos descripto el número de *L*3 que estarán en la pastura *k* días después de comenzado el ensayo.

La descripción discriminada de los individuos que componen la población de *L*3 en la pastura nos permite conocer:

- cuántas larvas de la *i*-ésima cohorte se consumieron,
- cuánto tiempo y a qué condiciones ambientales estuvieron expuesta esas larvas.

Esto último permitirá determinar qué proporción de las *L*3 consumidas se inhiben y, por consiguiente, qué proporción continuará su desarrollo normalmente hacia la fase adulta.

5.2.2. Modelo para el cálculo de número de adultos en el hospedador

El acondicionamiento de las *L*3 es un proceso que no afecta directamente a la población pero sí modifica la dinámica poblacional de los parásitos en el hospedador.

Llamamos $I(k)$ al número de larvas ingeridas por un bovino el *k*-ésimo día juliano. Dicha ingesta está compuesta por larvas de diferentes cohortes. Si se denomina $I(j,k)$ al número de larvas ingeridas de la *j*-ésima cohorte con edad *k*, entonces:

$$I(j,k) = p(j,k)\,I(k) = \frac{C_j(k)}{P_{L3}(k)}\,I(k), \tag{6.4}$$

de donde resulta que la ingesta total del día *k* será:

$$I(k) = \sum_{j=1}^{k} I(j,k). \tag{6.5}$$

Por lo tanto, si $p_{inhi}(j,k)$ designa la proporción de larvas inhibidas de la *j*-ésima cohorte con edad *k*, entonces el número de larvas inhibidas que se registran en el día *k* será:

$$I_{Inh}(k) = \sum_{j=1}^{k} p_{inhi}(j,k) I(j,k). \tag{6.6}$$

Si se denomina $I_{nInh}(k)$ al número de larvas no inhibidas, se tiene

$$I(k) = I_{nInh}(k) + I_{Inh}(k). \tag{6.7}$$

De esta manera, si se tiene identificada la cantidad de *L*3 que detendrán su desarrollo y cuáles continuarán hacia la fase adulta, sólo resta ver de qué manera se irán agregando éstas a la población de adultos.

Si llamamos *DIhT*(*k*) al número de días que tardan en desinhibirse las larvas que entraron al hospedador durante el *k*-ésimo día juliano, para calcular la cantidad de adultos que tenemos un día *t*-juliano cualquiera tendremos que sumar el número de adultos que sobrevivieron del día anterior, el número larvas *L*3 ingeridas tres semanas atrás (período de prepatencia) que no se inhibieron y lograron completar el desarrollo y el número de larvas que salieron de la inhibición.

Entonces la siguiente ecuación describe la población de adultos en el hospedador:

$$A(t) = (1 - \mu(t))A(t-1) + I_{nInh}(t-21) + \sum_{\forall k \,/\, k + DIhT(k) = t} I_{Inh}(k + DIhT(k)). \tag{6.8}$$

5.3. Modelo para el cálculo de la proporción de *L*3 inhibidas

Para que el fenómeno de hipobiosis se manifieste, es necesario que las *L*3 estén expuestas un tiempo mínimo a condiciones específicas de temperatura y fotoperíodo (Lutzelschwab y col., 2005).

Para el cálculo de la proporción de larvas que se inhiben se utilizó un sistema de inferencia difuso del tipo Mamdani cuyas variables de entrada fueron:

- Tiempo de exposición (días) a las condiciones medioambientales de la cohorte de *L*3 (entrada).
- Temperatura media diaria (entrada).
- Duración diaria del fotoperíodo, en horas (entrada).

- Proporción de *L*3 de la cohorte que se inhibirá (salida).

La selección de variables y los parámetros de las funciones de membresía fueron construidas en base a la información reportada en los trabajos realizados en la Pampa Húmeda por Fernández y col. (1999), Lutzelschwab y col. (2005) y Fiel y col. (2010b). La lista completa de las funciones de membresía y las reglas del sistema se pueden ver en las Tablas 5.1 y 5.2 respectivamente.

5.3.1. Tiempo de exposición

El proceso inhibitorio de las larvas en esta región comienza a principios del mes de Septiembre y finaliza en Enero. Es necesario destacar que existe evidencia de que la inducción de hipobiosis cesa pasado este mes, independientemente del tiempo de exposición a las condiciones ambientales (Lutzelschwab y col; 2005). Es por ello que se supone que la cantidad de semanas que una larva puede estar expuesta a condiciones que favorecerían el acondicionamiento para inhibirse no sea mayor a 20 semanas. Pasadas estas 20 semanas, pierden la capacidad de inhibirse.

Por otra parte, se analizaron los trabajos sobre las dinámicas exhibidas por las larvas *L*3 sembradas en los distintos meses, lo que permitió concluir que dividir el período de 20 semanas para generar 5 funciones de membresía es lo más adecuado. Las funciones de membresía y sus parámetros están detalladas en la Tabla 5.1.

5.3.2. Temperatura media diaria

Se analizaron las temperaturas medias diarias de Tandil desde el año 1990 hasta finales de 2008. Se dividió al rango de temperaturas en 4 partes iguales y como valores de máxima pertenencia se tomaron los valores de los deciles 2, 4, 6 y 8 del conjunto de datos. Las funciones y sus parámetros están detallados en la Tabla 5.1.

5.3.3. Fotoperíodo diario

Para generar el conjunto de datos del fotoperíodo diario se utilizó la siguiente función:

$$Phot\left(t\right)=\frac{24}{\pi}ar\cos\left(-tg\left(lat\right)tg\left(0.4093\ sen\left(\frac{2\pi t}{365}-1.405\right)\right)\right), \tag{6.9}$$

donde t representa el día juliano y *lat* es la latitud. A modo de ejemplo, la cantidad de horas de luz en Tandil (37° 19' 08" S) varía desde 9h 35' (correspondiente al 21 de Junio) hasta 14h

48' (correspondiente al 21 de Diciembre), pasando por valores intermedios de 12h 05' los días 21 de Marzo y 21 de Septiembre.

Como el proceso de inhibición es estacional, se decidió usar 3 funciones de membresía con las que es posible caracterizar cada una de las particularidades de las estaciones del año. Es necesario destacar que el rango de horas del fotoperíodo de otoño es igual al de primavera, y que existe un rango óptimo de duración del fotoperíodo para que el proceso de inhibición se manifieste (Lutzelschwab y col., 2005), siendo el intervalo de 12 h 11min a 14h 55min. Fuera de este rango de duración, la inhibición no se produce (Fiel y col., 2010b). Este rango se manifiesta en los períodos desde el 21 de Septiembre hasta el 2 de Diciembre en la primavera y nuevamente desde el 12 de Enero al 21 de Marzo en el otoño. La diferencia entre ambos períodos respecto a su efecto sobre el proceso de hipobiosis reside en las temperaturas como condicionantes. Las funciones de membresía están detalladas en la Tabla 5.1.

5.3.4. Proporción de *L*3 inhibidas

Para la construcción de las funciones de membresía correspondientes a las proporciones de larvas inhibidas se utilizaron datos de ensayos de campo (Lutzelschwab y col., 2005) y de laboratorio (Fernández y col., 1999) y los comentarios personales provistos por C. Fiel.

Se utilizaron tres funciones de membresía triangulares que caracterizaron las proporciones observadas en los trabajos consultados. Los parámetros de las funciones de membresía se pueden ver en la Tabla 5.1.

5.4. Desinhibición

De los resultados obtenidos en los ensayos realizados (Fernández y col., 1999; Lutzelschwab y col., 2005) resulta que el proceso de desinhibición es de tipo asincrónico y, en consecuencia, se observan ondas de larvas que contribuyen a la población de adultos. Se hipotetiza que estas ondas de desinhibición responden a un cambio en el fotoperíodo.

La función que modeliza el fotoperíodo tiene cuatro puntos críticos asociados a los solsticios y equinoccios, es decir a los días 21 de Diciembre, 21 de Julio, 21 de Marzo y 21 de Septiembre. En las dos primeras fechas ocurren los puntos máximo y mínimo de fotoperíodo, mientras que los otros dos puntos son puntos de inflexión. El punto de interés para el Hemisferio Sur es el correspondiente al 21 de Septiembre, cuando la tasa de crecimiento de la función fotoperíodo llega a su punto máximo para luego decrecer hasta llegar al máximo de horas luz el 21 de diciembre. La evidencia disponible permite considerar que el momento en

que se da la tasa de crecimiento máxima es uno de los factores que determinan el tiempo de desinhibición de las *L*3 (Fiel y col., 2010b).

Variable Lingüística(tipo)	**Nombre de la función de membresía**	**Tipo**	**Valor de los parámetros**			
			a	**b**	**c**	**D**
Tiempo de exposición (entrada)	T-m	*Z(x;a;b)*	3	4		
	F1	*Tri(x;a,b,c)*	3	6	7	
	F2	*Tri(x;a,b,c)*	6.5	8	10	
	F3	*Tri(x;a,b,c)*	9.9	12	14	
	T-M	*S(x;a,b)*	13.5	16		
Temperatura (entrada)	*D2*	*Z(x;a,b)*	9.1	12.5		
	D4	*Tri(x;a,b)*	9.1	12.5	15.5	
	D6	*Tri(x;a,b)*	12.5	16	19.8	
	D8	*S(x;a,b)*	16.5	19.8		
Fotoperíodo (entrada)	*Fot1*	*Z(x;a,b)*				
	Fot2	*Trap(x;a,b)*	11.1	13	14.4	14.55
	Fot3	*S(x;a,b)*	14	14.7		
Proporción de larvas inhibidas (salida)	*Baja*	*Tri(x;a,b)*	0	6	12	
	Moderada	*Tri(x;a,b)*	10	25	60	
	Alto	*Tri(x;a,b)*	50	75	90	

Tabla 5.1: Funciones de membresía del sistema de inferencia difuso para el cálculo de proporción de larvas inhibidas.

Si las *L*3 se inhiben cuando la tasa de cambio del fotoperíodo crece, entonces se desinhibirán antes de fin del año, es decir que el tiempo que dura la inhibición es de 65 días como máximo. Si la tasa de cambio del fotoperíodo es decreciente entonces las *L*3 se desinhibirán pasado el verano, es decir el período durará desde cinco a dos meses, dependiendo de la fecha de inhibición.

De esta manera se modelan las dos ondas de desinhibición que se observaron en estudios a campo. La función propuesta para el tiempo de desinhibición es:

$$DIhT(t) = \begin{cases} 240 - \dfrac{t}{2} & si \quad Phot(180) \le Phot(t) \le Phot(265) \\ 270 - \dfrac{t}{2} & si \quad Phot(t) \ge Phot(265) \\ 120 & si \quad otro\ caso \end{cases} . \qquad (6.10)$$

5.5. Validación del modelo en condiciones de campo

Para la validación del modelo se compararon los resultados de las simulaciones con datos registrados en ensayos de campo por Fiel y col. (2010b). En dicho trabajo, se estudia el proceso de inhibición y desinhibición en terneros bajo condiciones ambientales usuales en la Pampa Húmeda.

Para las simulaciones se tomaron datos ambientales acordes a las condiciones en las que se realizaron los ensayos. Para simular el consumo de larvas diario, se decidió suponer que los animales se alimentan de una manera aleatoria dentro de un rango de consumo comprendido entre un 30% y un 80% de las larvas de la pastura.

5.6. Respuesta del modelo a perturbaciones en las variables de entrada

Se realizaron perturbaciones en las variables de entrada (series) temperatura, fotoperíodo, ingesta y estacionalidad, con el fin de estudiar las distintas respuestas del modelo y compararlas. Con ello se trató de determinar cuál es la función de entrada que produce las mayores variaciones en la función respuesta del modelo. Para ello se fijó la ingesta de *L*3 en 50% y se utilizó un único conjunto de condiciones ambientales correspondientes a la ciudad de Tandil con datos de los años 2006 a 2008. Se llamará serie de datos de entrada a este conjunto y la salida se denominará la respuesta de referencia (Figura 5.2). Los experimentos computacionales consisten en perturbar cada variable a estudiar manteniendo las otras fijas.

Para el análisis de las distintas respuestas, se graficó la diferencia calculada entre cada una de las series obtenidas al perturbar una función de entrada respecto de la respuesta de referencia, quedando así en evidencia dónde se presentan las diferencias en la dinámica y en la abundancia de los parásitos adultos.

Tiempo	Temperatura	Fotoperíodo	Inhibición
0	0	1	1
0	0	3	1
5	0	0	1
0	1	0	1
1	2	2	2

Tiempo	Temperatura	Fotoperíodo	Inhibición
2	2	2	3
3	2	2	3
4	2	2	2
1	3	2	2
2	3	2	3
3	3	2	3
4	3	2	1
1	4	2	3
2	4	2	2
3	4	2	1

Tabla 5.2: Base de reglas del sistema de inferencia difuso para el cálculo de larvas inhibidas.

5.6.1 Variaciones en temperaturas

Para este análisis se fijaron las series de datos de entrada exceptuando la de temperatura. Se tomó como base la serie de temperaturas registradas en Tandil de los años 2006 a 2008 ($\bar{X}$=14°C; s =5.4°C) y se sumó y restó 5°C y 2.5°C a la serie, generando así cuatro nuevas series de temperatura con el mismo desvío estándar pero con distinta media. Las series respuesta generadas las llamaremos $T_{-2.5°C}$, $T_{-5°C}$, $T_{+2.5°C}$, $T_{+5°C}$. Con estas series se logra observar el efecto en el aumento o la disminución de la media anual.

5.6.2 Variaciones en fotoperíodos

Para este análisis se fijaron las series de datos de entrada exceptuando la de fotoperíodo. Las modificaciones en el fotoperíodo se hicieron cambiando la latitud en la ecuación (6.9). Estas modificaciones en los parámetros simulan cambios en las zonas geográficas ya que existe una relación funcional entre las coordenadas geográficas con su correspondiente fotoperíodo. Se tomaron cuatro latitudes dentro de la zona de producción ganadera de la Argentina, específicamente 40°, 35°, 30° y 25° de latitud S. Las series respuesta generadas las llamaremos $F_{40°}$, $F_{35°}$, $F_{30°}$, $F_{25°}$.

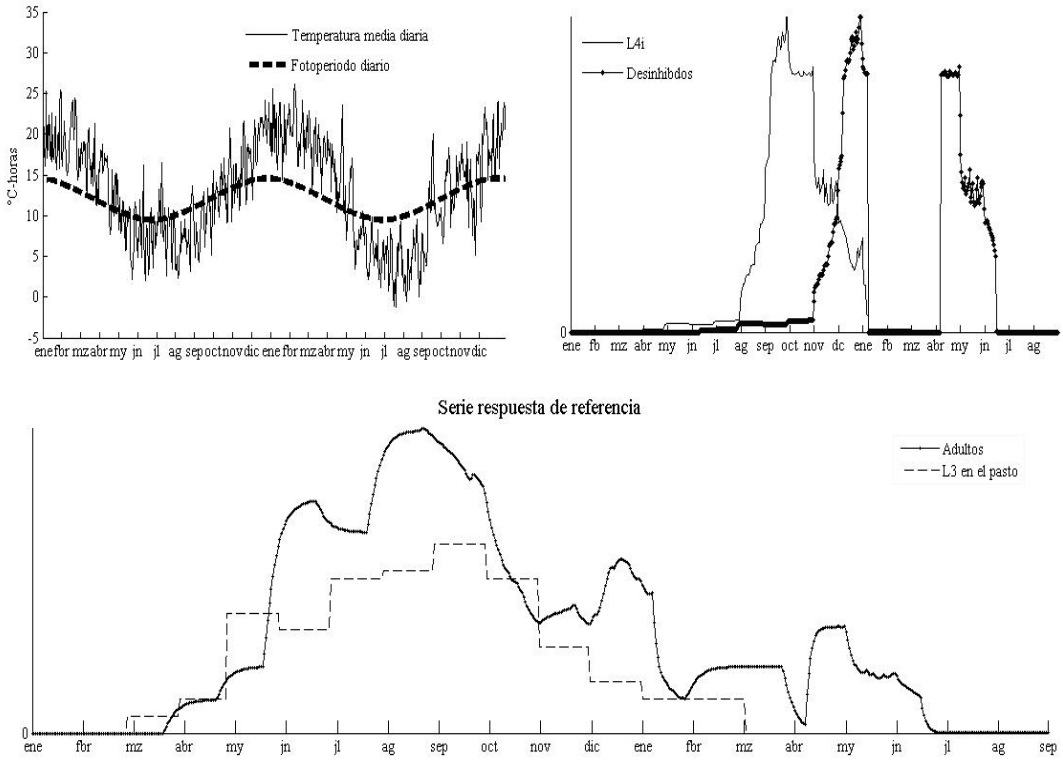


Figura 5.2: Serie respuesta de referencia con condiciones ambientales correspondientes a Tandil. Para las simulaciones se considero la ingesta diaria es de 0.5.

5.6.3 Variaciones en la ingesta de larvas infectivas

Para este análisis se fijaron las series de datos de entrada exceptuando la función de ingesta. Para incluir este aspecto en el modelo se construyó una función que representa el consumo diario de larvas como un porcentaje de extracción más una componente aleatoria. Los consumos seleccionados fueron incrementándose de 10 en 10 a partir del 10% (baja densidad de animales) y hasta el 90% (alta densidad de animales). En la Figura 5.3 se muestran dos consumos simulados. Las series respuesta generadas las llamaremos C_{10}, C_{20}, C_{30}, C_{40}, C_{50}, C_{60}, C_{70}, C_{80}, C_{90}.

5.6.4. Disponibilidad estacional de larvas en la pastura

Como fue mostrado en el capítulo anterior, la infectividad en las pasturas es claramente estacional; en particular está fuertemente ligada a la estacionalidad de las lluvias. Por lo tanto, se estudió la respuesta del modelo considerando la infección en las pasturas de manera estacional, es decir que se supuso en las simulaciones que las *L*3 se encuentran en la pastura sólo en el verano, o en el otoño, o en el invierno, o en la primavera. De esta manera, se puede

determinar cuáles estaciones dan lugar a las poblaciones más importantes para la parasitosis. Para ello, se construyeron vectores de contaminación de pasturas de la forma:

$$Pk(i) = \begin{cases} 1000 & si\ i \in [k, k+90] \\ 0 & en\ otro\ caso \end{cases}.$$

Se realizaron simulaciones considerando que si k=0 las $L3$ se encuentran en la pastura en verano, si k=90 entonces será en otoño, si k=180, será en invierno y si k=270, será en primavera.

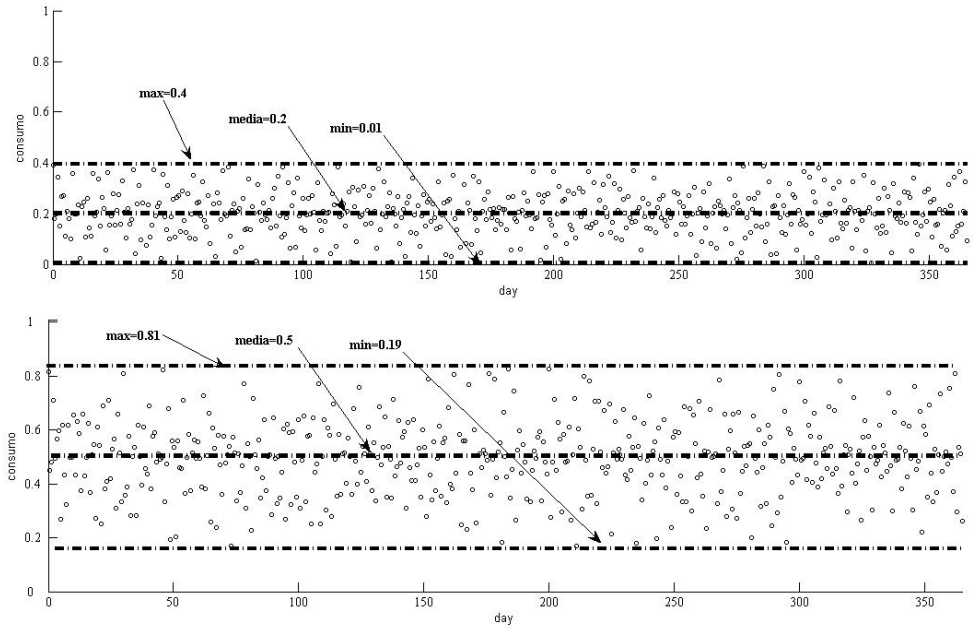


Figura 5.3: Ingesta diaria de larvas simulado un consumo aleatorio diario. Se denotan los valores máximos, mínimos y promedio de consumo.

5.7. Resultados

5.7.1 Validación del modelo en condiciones de campo

Los datos de campo con los que se cuenta hacen referencia a la cantidad de larvas inhibidas en el año, específicamente en los meses de Agosto a Marzo. La simulación con las condiciones existentes durante los trabajos de campo se pueden ver en la Figura 5.4. Se observa que existe una buena réplica del proceso de inhibición.

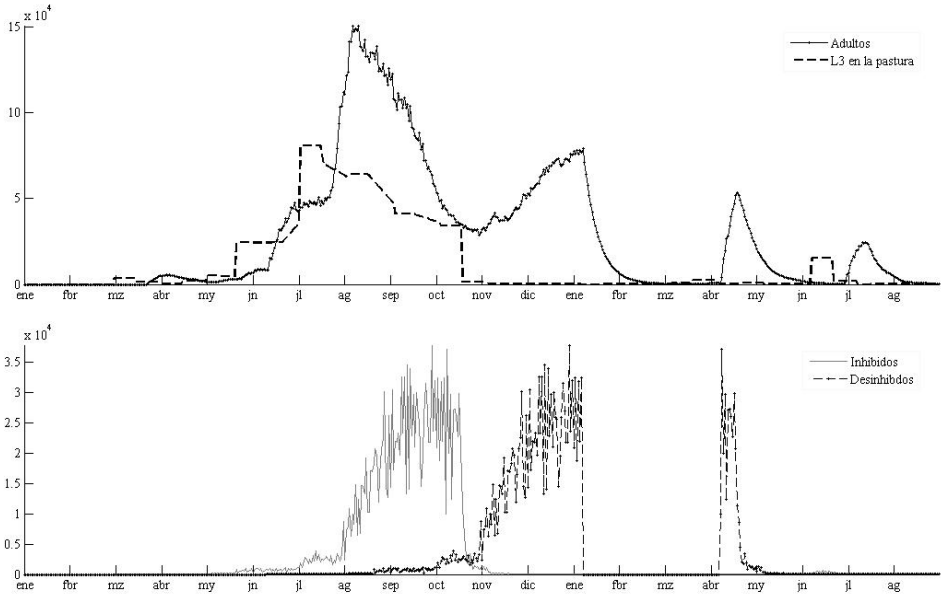


Figura 5.4: Respuesta del modelo recreando las condiciones de campo de Fernández y col. (1999) en las que se realizó el ensayo.

5.7.2. Variaciones en temperaturas

De las simulaciones realizadas se puede observar que, si las temperaturas están por debajo del promedio de la serie de referencia (series $T_{-2.5°C}$ y $T_{-5°C}$), la mayor diferencia positiva aparece desde Septiembre a mediados de Noviembre. Esto se debe a que en esta situación de temperaturas más bajas, la mayor parte de la población continúa su desarrollo normalmente incorporándose rápidamente a la población adulta; en tanto que para la serie de referencia en esta época, la mayoría de las *L*3 ingeridas detienen su desarrollo previendo condiciones adversas. De aquí resulta que es posible deducir que la actividad inhibitoria se reduce considerablemente cuando la temperatura del ambiente disminuye (Figura 5.5 (iii)).

Las temperaturas de Diciembre hasta Febrero son favorables para que las *L*3 bajo condiciones correspondientes a las series perturbadas se inhiban y, por lo tanto, se observa menor abundancia en la población adulta. Paralelamente, se produce la primera onda de desinhibición de las *L*4i de la serie de referencia, dando esto como resultado una menor abundancia en estos dos casos respecto de la población de la serie de referencia (Figura 5.5.(i)). En los meses posteriores se produce la segunda onda de desinhibición para la serie de referencia y la única onda de desinhibición generadas por las series de condiciones ambientales perturbadas. La diferencia es negativa como consecuencia de la mayor abundancia de *L*3 que se inhibieron en la serie de referencia (Figura 5.5).

Para temperaturas mayores al promedio de la serie de temperaturas de referencia (series $T_{+2.5°C}$ y $T_{+5°C}$), la cantidad de *L3* que se inhibe es mayor (Figura 5.6 (iv)) y, en consecuencia, el número de individuos en la población de adultos es levemente menor.

Desde Octubre a Diciembre la actividad inhibitoria de las *L3* para las poblaciones que responden a las series con temperaturas más altas produce diferencias con la serie de referencia y que son más marcadas que en el período anterior. Esto se evidencia en la segunda onda de desinhibición que tiene lugar en Mayo, donde se registra niveles de abundancia mayores en las series de $T_{+2.5°C}$ y $T_{+5°C}$ (Figura 5.6). De estas simulaciones, se deduce que la actividad inhibitoria está en relación directa con las variaciones en la temperatura media, es decir, cuando la temperatura disminuye la actividad cesa y cuando está por encima de la media, la actividad se hace más marcada.

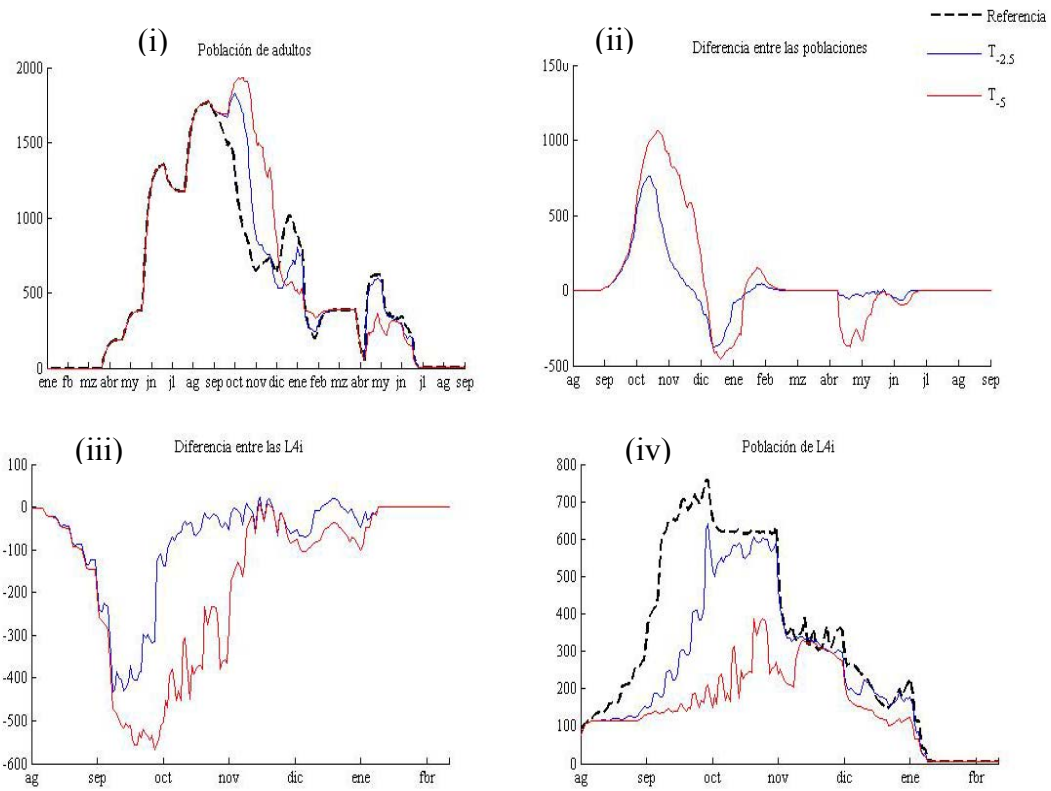


Figura 5.5: Respuesta del modelo a variaciones en la serie de entrada Temperatura. (i) *Abundancia de adultos en cada uno de los casos;* (ii) *Diferencias entre las abundancias de adultos obtenidas del modelo con las series de temperaturas por debajo de la serie de referencia y el resultado de referencia;* (iii) *Diferencias entre las abundancias de larvas L4 inhibidas obtenidas del modelo con las series de temperaturas por debajo de la serie de referencia y el resultado de referencia;* (iv) *Abundancia de larvas L4 inhibidas en cada uno de los casos.*

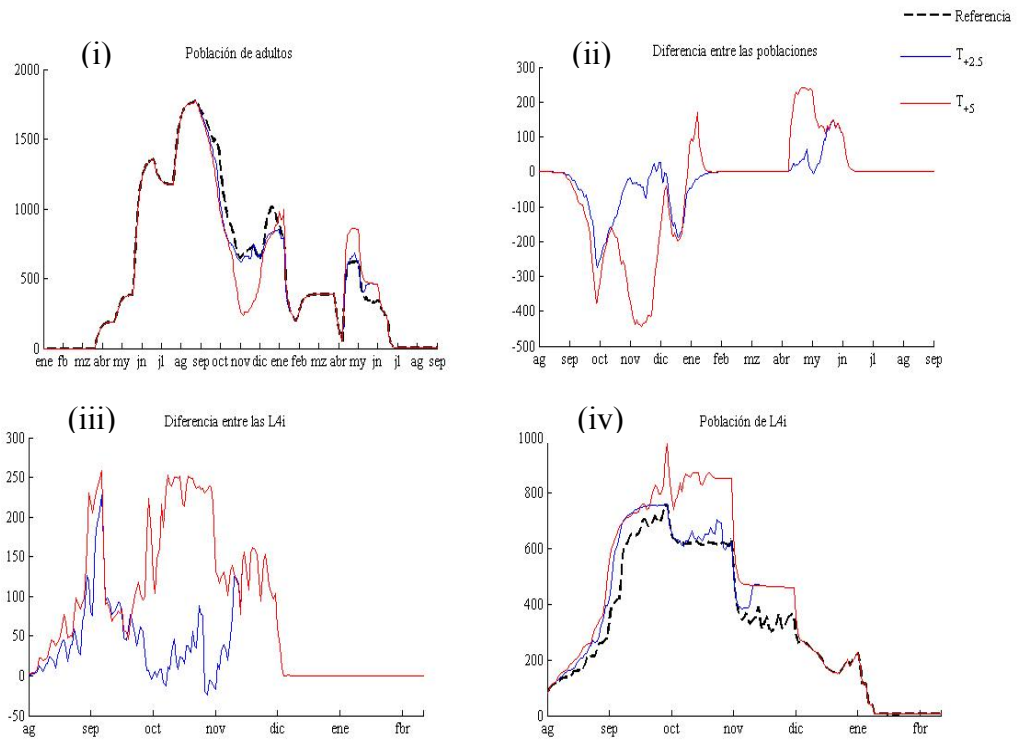


Figura 5.6: Respuesta del modelo a variaciones en la serie de entrada Temperatura. (i) *Abundancia de adultos en cada uno de los casos;* (ii) *Diferencias entre las abundancias de adultos obtenidas del modelo con las series de temperaturas por arriba de la serie de referencia y el resultado de referencia;* (iii) *Diferencias entre las abundancias de larvas L4 inhibidas obtenidas del modelo con las series de temperaturas por arriba de la serie de referencia y el resultado de referencia;* (iv) *Abundancia de larvas L4 inhibidas en cada uno de los casos.*

5.7.3. Variaciones en fotoperíodos

En los meses de Septiembre y Octubre el comportamiento de las poblaciones correspondientes a las series $F_{25°}$ $F_{30°}$ $F_{35°}$ (es decir, en latitudes más al N con respecto a las de la serie de referencia), presentaron diferencias en la cantidad de larvas inhibidas según muestra la Figura 5.7 (iv). En estos meses, las perturbaciones en el fotoperíodo produjeron una mayor proporción de L4i que la obtenida en la serie de referencia, dando así lugar a que las diferencias entre las series perturbada y de referencia sean negativas, es decir, mayor cantidad de adultos en la población correspondiente a la serie de referencia. Desde Noviembre hasta mediados de Diciembre, las diferencias con las series $F_{25°}$ $F_{30°}$ $F_{35°}$ fueron positivas. Esto significa que la cantidad de parásitos adultos fue menor en la serie de referencia, pudiendo atribuirse esto a una menor cantidad de *L3* que se inhibieron en las condiciones de las series perturbadas. Durante el mes de Enero la primera onda de desinhibición se produce para todas las series, no presentando diferencias significativas en las poblaciones de adultos en el hospedador. Luego, en Abril y Mayo se produce la segunda onda de desinhibición, presentándose temporalmente primero en la serie de referencia y luego en las series

perturbadas (Figura 5.7). Esto quiere decir que para latitudes hacia el N de Tandil, el proceso de inhibición hace que se incremente la abundancia de adultos disponibles en los animales a medida que la latitud decrece y aumenta el tiempo que las L4i mantiene detenido su desarrollo.

Para el fotoperíodo $F_{40°}$ correspondiente a la latitud de 40° al S de Tandil, se observó que no existen diferencias entre las poblaciones de adultos hasta fines de Noviembre. A partir de esta fecha se produce el cese de la inhibición para la serie $F_{40°}$, mientras que para la serie de referencia la actividad continúa hasta fines de Diciembre. En consecuencia, la diferencia entre las dos poblaciones es positiva, es decir que es mayor la abundancia de parásitos adultos en $F_{40°}$ que en la serie de referencia. Esta diferencia se mantiene hasta mediados de Abril. A partir de esta fecha la diferencia entre las poblaciones es negativa, siendo consecuencia de la segunda onda de desinhibición. La diferencia en la abundancia de parásitos entre las dos poblaciones es consecuencia del cese de la inhibición en los meses de Noviembre y Diciembre por parte de la población correspondiente a $F_{40°}$. Este cambio en el fotoperíodo cesó completamente la actividad inhibitoria de las larvas en el mes de Diciembre (Figura 5.8).

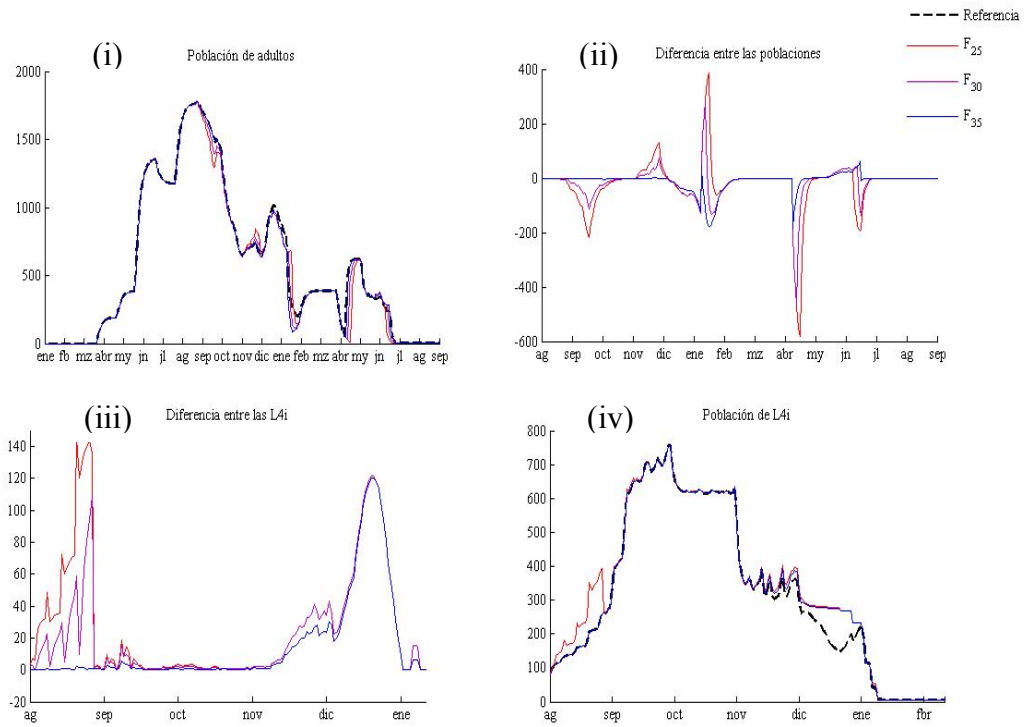


Figura 5.7: Respuesta del modelo a variaciones en la serie de entrada Fotoperíodo. (i) *Abundancia de adultos en cada uno de los casos;* (ii) *Diferencias entre las abundancias de adultos obtenidas del modelo con latitudes al N de la de la serie de referencia y el resultado de referencia;* (iii) *Diferencias entre las abundancias de larvas L4 inhibidas obtenidas del modelo con latitudes al N de la de la serie de referencia y el resultado de referencia;* (iv) *Abundancia de larvas L4 inhibidas en cada uno de los casos.*

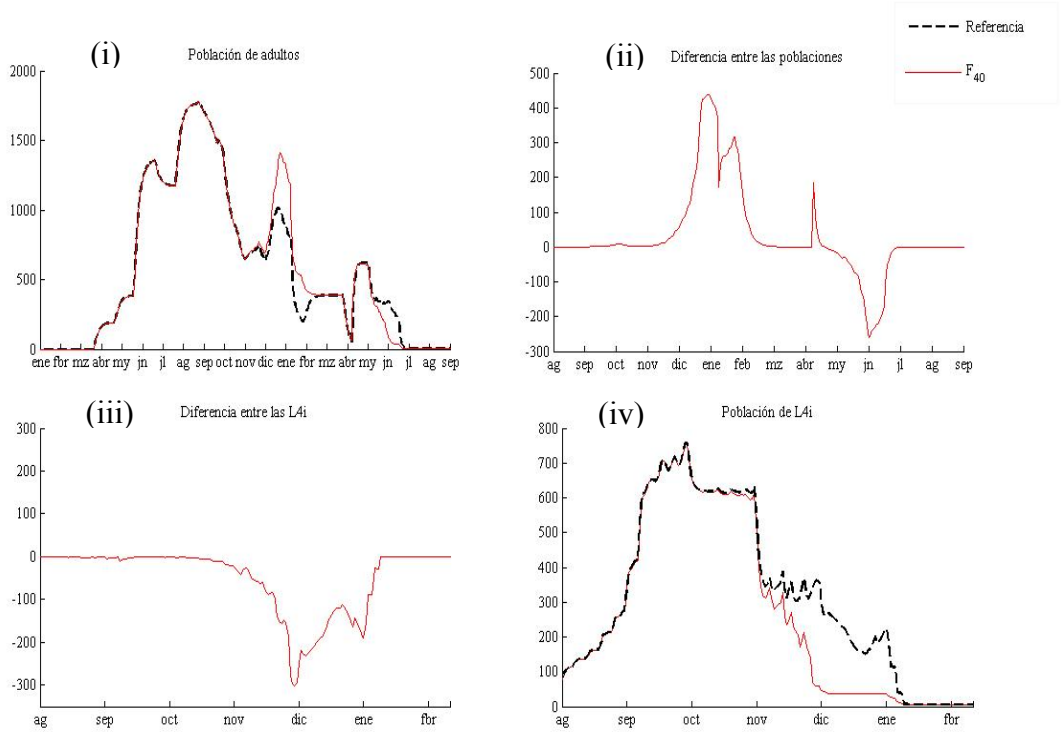


Figura 5.8: Respuesta del modelo a variaciones en la serie de entrada Fotoperíodo. (i) *Abundancia de adultos en cada uno de los casos;* (ii) *Diferencia entre la abundancia de adultos obtenida del modelo en la latitud 40°, al S de la de la serie de referencia y el resultado de referencia;* (iii) *Diferencia entre la abundancia de larvas L4 inhibidas obtenidas del modelo en la latitud 40°, al S de la de la serie de referencia y el resultado de referencia;* (iv) *Abundancia de larvas L4 inhibidas en cada uno de los casos.*

5.7.4. Variaciones en la ingesta de larvas infectivas

Los resultados de las simulaciones muestran que si el consumo es mayor al 50% de las larvas, la abundancia de adultos para la serie de referencia será menor que en las series perturbadas, desde Septiembre hasta Diciembre. De aquí se deduce que al haber mayor ingesta de larvas, el tiempo de exposición a las condiciones ambientales durante este período se reduce y por lo tanto las larvas no llegan a acondicionarse para detener su desarrollo (Figura 5.9.(iv)). A partir de Diciembre, como consecuencia de una mayor actividad inhibitoria de las poblaciones correspondientes a las series perturbadas y el surgimiento de la primera onda de desinhibición, el número de adultos en la serie de referencia resulta mayor que en las perturbadas. El cese de la inhibición para todas las series se observa a mediados de Enero, cuando no se registran diferencias entre las poblaciones. En el mes de Abril, y como consecuencia de la segunda onda de desinhibición, la población correspondiente a la serie de referencia resulta ligeramente mayor que las poblaciones de las series perturbadas. Esto implica que una mayor ingesta de *L3* en la pastura no modificará la abundancia de parásitos

en el hospedador, cuando el consumo es mayor al 50% de las larvas.

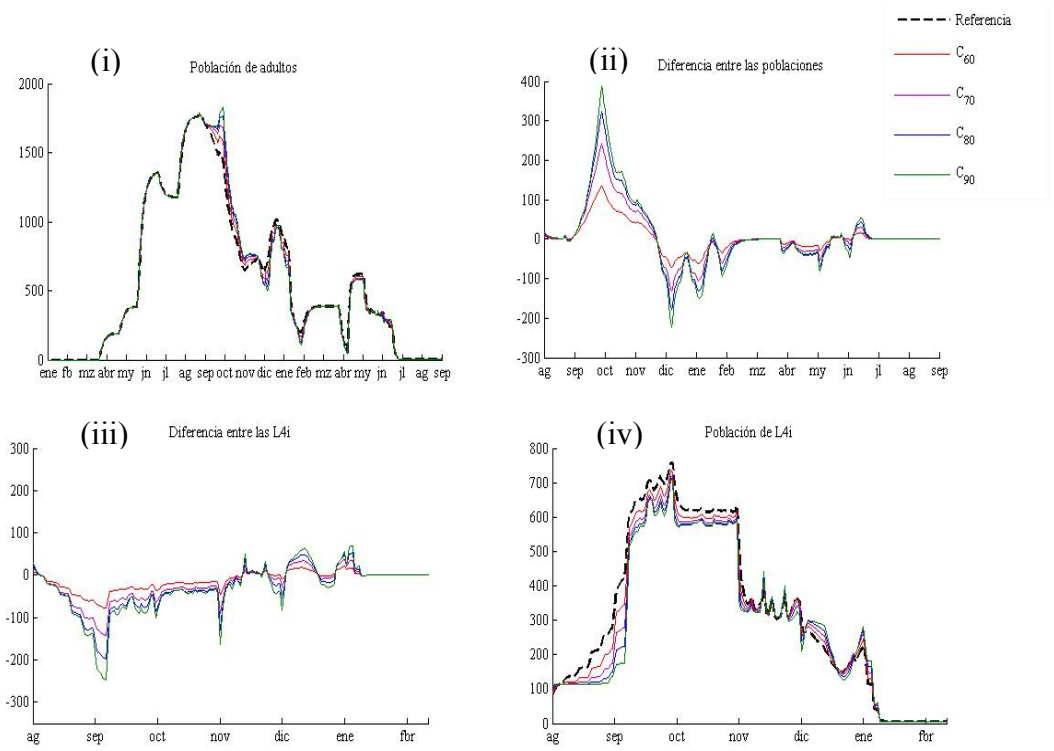


Figura 5.9: Respuesta del modelo a variaciones en la serie de entrada Ingesta diaria. (i) *Abundancia de adultos en cada uno de los casos;* (ii) *Diferencias entre las abundancias de adultos obtenidas del modelo con ingesta por arriba de la de la serie de referencia (50%) y el resultado de referencia;* (iii) *Diferencias entre las abundancias de larvas L4 inhibidas obtenidas del modelo con ingesta por arriba de la de la serie de referencia y el resultado de referencia;* (iv) *Abundancia de larvas L4 inhibidas en cada uno de los casos.*

Si la ingesta es menor al 50%, se observan diferencias significativas en los resultados obtenidos. Al reducir la ingesta de *L3*, se permite que los tiempos de acondicionamiento de las larvas en la pastura se extiendan, y en consecuencia, se obtiene que una proporción mayor de larvas se inhiban para las poblaciones que se corresponden con las series perturbadas. Esto se puede observar desde Agosto hasta Octubre, cuando el número de adultos resultantes para la serie de referencia es mayor que para las series perturbadas (Figura 5.10.(i)) y, simultáneamente, para éstas la población de *L4i* es mayor (Figura 5.10.(iv)). De estas dos observaciones se deduce que la disminución en la ingesta de *L3* produce una mayor actividad inhibitoria de las larvas en el período Agosto-Octubre. A mediados de Noviembre, se presenta la primera onda de desinhibición, dando como resultado una mayor abundancia de parásitos adultos para las series C_{10}, C_{20}, C_{30}, C_{40} que para la serie de referencia. Esto se mantiene hasta los primeros días de Marzo, cuando las poblaciones ya no presentan diferencias. Por otra parte, en este período la actividad inhibitoria para las condiciones de la serie de referencia es mayor que para aquellas perturbadas (Figura 5.10.(iv)). Esto se ve reflejado cuando en los

primeros días de Mayo se produce la segunda onda de desinhibición en la serie de referencia, en la cual la abundancia de adultos supera a las obtenidas en las simulaciones con menor consumo (Figura 5.10). De todas estas simulaciones se deduce que cuando el tiempo de acondicionamiento de las *L*3 es mayor, se producen poblaciones de *L*4*i* que, en su mayoría, se desinhiben antes de Enero.

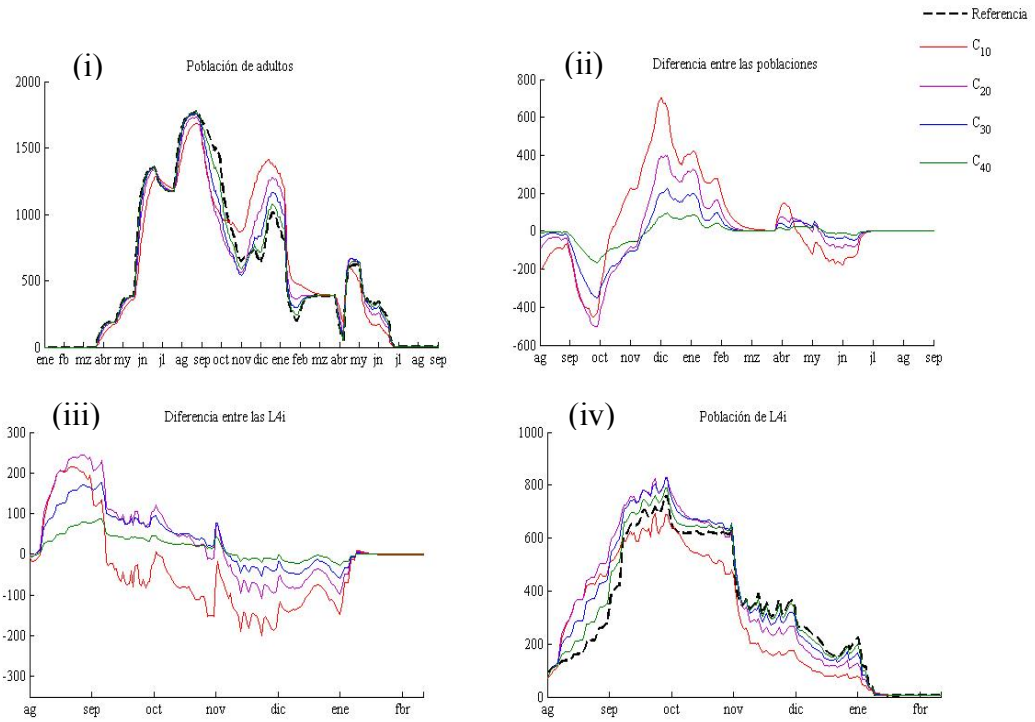


Figura 5.10: Respuesta del modelo a variaciones en la serie de entrada Ingesta Diaria. (i) *Abundancia de adultos en cada uno de los casos;* (ii) *Diferencias entre las abundancias de adultos obtenidas del modelo con ingesta por debajo de la de la serie de referencia (50%) y el resultado de referencia;* (iii) *Diferencias entre las abundancias de larvas L*4 *inhibidas obtenidas del modelo con ingesta por debajo de la de la serie de referencia y el resultado de referencia;* (iv) *Abundancia de larvas L*4 *inhibidas en cada uno de los casos.*

5.7.5. Disponibilidad estacional de larvas en la pastura

Se analiza aquí la respuesta del modelo considerando la infección en las pasturas de manera estacional, es decir que se supuso en las simulaciones que las *L*3 se encuentran en la pastura sólo en el verano o en el otoño o en el invierno o en la primavera. De esta manera, se puede observar el efecto que la estacionalidad de la infección en la pastura tiene en la abundancia de larvas inhibidas y de adultos en el animal (Figura 5.11).

5.7.5.1 Verano y otoño

Cuando la ingesta se produce en verano o en otoño, el número de larvas que se inhiben es casi nulo. La población de adultos en el hospedador está presente durante cinco meses aproximadamente.

5.7.5.2 Invierno

La población de adultos correspondiente a larvas ingeridas en invierno sobrevive hasta principios de Febrero. En este caso, gran parte de las *L3* son ingeridas en los meses de Agosto y Septiembre y detendrán su desarrollo para reanudarlo a principios de Diciembre, extendiendo de esta manera la supervivencia de la población. Debido a esto, se observa un pico en la población de adultos en el hospedador en el mes de Septiembre para luego decrecer hasta mediados de Noviembre.

5.7.5.3 Primavera

Cuando las larvas infectantes son ingeridas en primavera, la población sobrevive en el hospedador hasta nueve meses. La mayor parte de las *L3* ingeridas en estos meses detiene su desarrollo para reanudarlo en dos ondas de desinhibición. La primera onda se presenta a fines de Noviembre y permanece hasta principios de Febrero y la segunda se da a partir del mes de Abril, extendiendo la presencia en el hospedador hasta el mes de Julio.

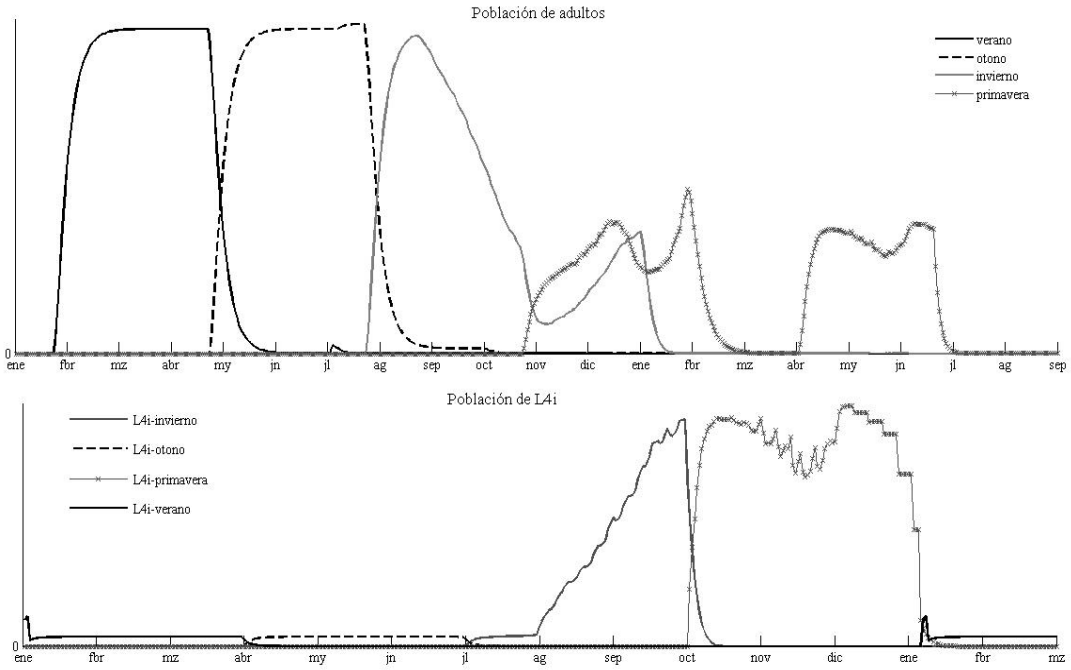


Figura 5.11: Efectos en la abundancia de larvas inhibidas y de adultos de la disponibilidad estacional de larvas en la pastura (—) verano (------)-otoño;(—) invierno; (——*—) primavera.*

5.8. Discusiones y conclusión

El proceso de desinhibición aún no está totalmente estudiado como para conocer con certeza qué posibles estímulos hacen que la *L*4*i* reanude su desarrollo. De la literatura sobre el tema surgen dos hipótesis que podrían testearse a través de la inclusión en el modelo:

- la desinhibición es consecuencia de las condiciones climáticas a las que estuvo expuesta la *L*3 en la pastura;
- la desinhibición responde a una densodependecia entre los adultos en el hospedador y las *L*4*i*.

La segunda hipótesis no fue desarrollada en este trabajo debido a la falta de datos necesarios para poder establecer tal relación. La construcción del modelo se ha basado en la primera hipótesis que, en pocas palabras significa que "cada *L*4*i* tiene fecha de desinhibición sujeta a las condiciones ambientales respecto de las cuales se inhibió".

Consideramos adecuado asociar el comportamiento de las larvas a la curva de fotoperíodo ya que se observó que en el comienzo de la primavera existe un punto de inflexión en el que la función fotoperíodo pasa de tener una tasa de cambio creciente a decreciente, siendo esto un posible indicador para las *L*3 en la pastura de cuándo inhibir y cuándo desinhibir. Los estudios en condiciones de laboratorio han permitido establecer que existe un rango de fotoperíodo en el que las *L*3 se inhiben y cuál será su tiempo de desinhibición (Fernández y col., 1999). Los resultados obtenidos son coincidentes con los efectos del fotoperíodo que se registra en la zona de estudio Tandil en el período de primavera y verano. Esto nos lleva a preguntarnos si el comportamiento es una cuestión local de las poblaciones de parásitos o, efectivamente, el rango de fotoperíodo de inhibición-desinhibición es el obtenido en el laboratorio. Creemos que sería importante replicar este ensayo con parásitos en distintas zonas ganaderas de la Argentina para poder verificar esta hipótesis.

El modelo refleja una relación inversa entre la temperatura y la proporción de larvas inhibidas. Esta relación se vio en las simulaciones en las que se perturbó la serie de datos ambientales correspondientes a Tandil. En dichas simulaciones, a medida que la temperatura aumenta el número de larvas que se inhiben es mayor. Mayor amplitud en la cantidad de horas de luz, es decir mayor latitud Sur, resultó en una cantidad de larvas cada vez menor. Esto concuerda con los resultados obtenidos bajo similares condiciones de laboratorio. Un punto de inflexión en el comportamiento del modelo se observa para los valores de latitud mayores a 37°. En esta situación, la cantidad de larvas que se inhiben se agrupan en los meses de Agosto a Octubre y la cantidad de *L*3 que se inhiben en los meses posteriores es menor. Cuando la latitud es menor a 37°, la cantidad de larvas que se inhibe es mayor en los meses de Noviembre y Diciembre que en el resto. Esta es una de las diferencias más destacables entre

las variaciones de fotoperíodo.

El tiempo que transcurren las larvas en las pasturas es uno de los factores que se ve afectado por el consumo diario de larvas. Si se aumenta la cantidad de animales en el potrero, el consumo de larvas será mayor y por tanto el tiempo de "acondicionamiento" será menor. El análisis llevado a cabo con respecto a la proporción de larvas ingeridas diariamente como una simplificación sobre la densidad de animales en un potrero, lleva a la conclusión que cuanto mayor sea la densidad de animales en el potrero, menor será la proporción de larvas inhibidas correspondientes a primavera, cuando el tiempo mínimo de acondicionamiento es de tres semanas.

El análisis de las respuestas del modelo a variaciones en las series de entrada induce a pensar que puede ser una buena herramienta para la generación de control estratégico, en combinación con el modelo de estadios de vida libre desarrollado en el capítulo anterior. El modelo aquí presentado refleja adecuadamente lo que se observó que ocurre a condiciones de campo.

VI. CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE HUEVOS EN RELACIÓN A LAS CARGAS PARASITARIAS

En este capítulo se describe la construcción de un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani, para el cálculo de la cantidad de huevos por gramo de materia fecal (HPG) en relación al número de parásitos adultos en el hospedador, la época del año y la edad de los hospedadores. Este modelo permite determinar cuántos huevos son "sembrados" en la pastura en distintos momentos del año, pudiendo proyectar el grado de infección en las pasturas y sus posibles efectos en el rodeo.

El modelo refleja la importancia de la edad del hospedador que, según los estudios parasitológicos, juega un papel fundamental en la determinación de los valores de HPG. Los animales adquieren naturalmente resistencia a los parásitos con el paso del tiempo. Dicha resistencia surge claramente en los valores que se obtienen en los ensayos de campo, donde animales con la misma carga parasitaria y distintas edades presentan valores considerablemente diferentes de HPG. Por otra parte, la oviposición depende directamente del número de adultos dentro del hospedador. Se compararon las salidas de las simulaciones con resultados de ensayos a campo, encontrándose que las simulaciones permiten una buena representación del proceso.

6.1. Introducción

El recuento de huevos por gramo de materia fecal (HPG) es una herramienta ampliamente utilizada en los sistemas de producción de carne para realizar un diagnostico rápido y a bajo costo sobre el estado sanitario del rodeo. A pesar de ser una de las técnicas más utilizadas, estudios epidemiológicos realizados no han logrado determinar la confiabilidad de este método de estimación de las cargas parasitarias reales en el hospedador. Aún con estas incertidumbres, si los hospedadores son menores de un año de edad, los trabajos coinciden en que el HPG es un buen estimador de las cargas parasitarias (Bryan y Kerr, 1989).

En la mayoría de los trabajos consultados se trata de determinar la correlación que existe entre las variables HPG y el número de parásitos adultos en el hospedador. Dicha correlación es analizada con métodos de regresión univariados y multivariados, involucrando algunas variables adicionales para tener mayor precisión en la estimación (Gasbane y col., 1996; Suárez y col., 1994; Bryan y Kerr, 1989; Block y Takagi, 1986). La técnica de conteo de huevos por gramo se puede considerar confiable siempre que se tengan en cuenta otros

factores epidemiológicos mencionados previamente, tales como la edad del hospedador, su historia clínica, su estado sanitario y la época del año, entre otros. Esta relación es más notoria cuando se analizan rodeos con animales menores de un año de edad (Suárez y col., 1994).

6.2. Descripción del modelo

El modelo es un sistema de inferencia difuso en el que la construcción de cada una de sus componentes, funciones de membresía y reglas, se basa en la siguiente hipótesis.

El HPG está regulado por tres variables:

- Edad del hospedador (edad).
- Carga parasitaria (estado sanitario).
- Época del año (estaciones).

El número de funciones de membresía se decidió en base a los trabajos consultados y asesoramiento experto por parte de investigadores[§]. La variable *edad* fue dividida en tres funciones de membresía: *terneros de destete*, *novillitos* y *novillo*. La *carga parasitaria* se particionó en tres funciones de membresía: *baja, moderada* y *alta*. Por último, el año se dividió en las cuatro estaciones: *verano, otoño, invierno* y *primavera*.

6.3 Parametrización del modelo

6.3.1 Edad del hospedador

La partición de la edad de los animales está relacionada con la inmunidad adquirida naturalmente con el paso de los meses, en contacto con los parásitos. Cuando el animal se desteta, la inmunidad es nula. A partir de los 6 meses después del destete, los animales comienzan a adquirir resistencia a los parásitos (Suárez, 1994), observándose en los ensayos realizados la presencia de parásitos adultos en la materia fecal. En consecuencia, se dividieron las edades de los animales en tres funciones de membresía: *terneros de destete*, *novillitos* y *novillo*. El tipo de función de membresía y sus parámetros se detallan en la Tabla 6.1.

6.3.2 Carga parasitaria

Las cargas parasitarias o estados sanitarios del hospedador están basados en valores propuestos por Suárez y col. (1994) teniendo en cuenta los resultados obtenidos para la región pampeana semiárida. Las distintas cargas parasitarias se pueden relacionar con los efectos que

[§] *Grupo de Parasitología de la Facultad de Veterinarias de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.*

producen en el animal. Cuando la carga parasitaria es *baja*, generalmente no produce pérdida de peso del animal, pero sí aporta huevos a las pasturas. La carga *moderada* es conocida como subclínica, en la que la parasitosis comienza a manifestarse en el hospedador en distintos grados que no alteran su aspecto normal exterior ni le provocan diarreas; por ejemplo, poca ganancia de peso hasta pérdidas estimadas entre 15 y 20 kg durante el otoño y el invierno. Cuando el animal presenta una carga *alta*, los síntomas son conocidos como del tipo clínico, presentando un evidente deterioro en el aspecto exterior, manifestando diarreas, deshidratación, pelo hirsuto y/o arratonado, falta de estado sanitario y pérdidas de peso que se estiman entre los 30 y 50 kg. Por último, cuando se presenta en forma *grave*, las pérdidas son muy grandes, llegando hasta a la muerte de los hospedadores. Las distintas funciones de membresía y sus parámetros se pueden ver en la Tabla 6.1.

6.3.3 Época del año

La eliminación de huevos del hospedador hacia el ambiente depende también de la época del año. Se sabe que *Ostertagia* posee distintos mecanismos para poder asegurar la supervivencia de su progenie. El más conocido es la inhibición de su desarrollo en el estadio *L*4, tal como se trató en el capitulo anterior. Este proceso asegura que los huevos que llegan a las pasturas puedan evitar el verano, la estación menos beneficiosa para los estadios de vida libre de *Ostertagia*. Es de esperar entonces que las hembras dispongan de mecanismos que permitan regular la postura de huevos dependiendo de las condiciones climáticas o de las estaciones del año. De esta manera, se construyeron cuatro funciones de membresía que se corresponden a con las mismas. En la Tabla 6.1 se detallan las funciones de membresía así como sus parámetros.

6.3.4 Huevos por gramo de materia fecal (HPG)

Para la variable de salida HPG, se tomaron tres funciones de membresía, etiquetadas lingüísticamente con *bajo*, *moderado* y *alto.* Los parámetros de cada función de membresía se ajustaron a los valores sugeridos por investigadores[ƹ], y resultaron coincidentes con los presentados por Suárez y col. (1994). Los valores y tipo de funciones se pueden ver en la Tabla 6.1.

6.3.5 Reglas

La construcción de las reglas se basó principalmente en los resultados y en discusiones publicadas por Suárez y col. (1994) y, en menor grado, por Block y Takagi (1986), y Bryan y Kerr (1989).

[ƹ] *Ver nota al pie anterior*

El número total de reglas consideradas fue veintidós, nueve de las cuales llamamos "básicas" debido a que son conclusiones comunes a los trabajos consultados. Las restantes son reglas de calibración para la zona de estudio en las que la época del año interviene como una variable que refleja condiciones particulares. De esta manera fue posible generar un marco más preciso de las condiciones locales. Por ejemplo, el destete no se produce en los mismos meses del año en las diversas zonas de producción y este aspecto debe necesariamente tenerse en cuenta. En la Tabla 6.2 se muestran las reglas utilizadas para el sistema de inferencia difuso (FIS); algunas de las reglas no pudieron definirse por falta de información, pero se espera poder determinarlas con los resultados de futuros ensayos de campo.

Variable Lingüística (tipo)	***Nombre***	***Tipo***	***Parámetros***			
			α	β	γ	η
Edad del hospedador (entrada)	*Terneros de destete*	*Z*	*0*	*8*		
	Novillitos	*Gaussiana*	*2.2*	*9*		
	Novillo	*S*	*10*	*15*		
Carga parasitaria (entrada)	*Bajo*	*Z*	*0*	*7500*		
	Moderado	*Trapecio*	*3500*	*7500*	*18500*	*22500*
	Alto	*S*	*18000*	*50000*		
Época del año (entrada)	*Verano*	*Z*	*0*	*136*		
	Otoño	*Trapecio*	*45*	*121*	*151*	*228*
	Invierno	*Trapecio*	*136*	*213*	*243*	*319*
	Primavera	*S*	*228*	*365*		
Huevos por gramo de materia fecal (salida)	*Bajo*	*Z*	*0*	*350*		
	Moderado	*Trapecio*	*200*	*350*	*550*	*700*
	Alto	*S*	*550*	*850*		

Tabla 6.1: Funciones de membresía y parámetros de cada una de las variables del sistema de inferencia difuso para el cálculo del número de huevos por gramo de materia fecal (HPG).

6.4 Validación del modelo con datos de campo.

La validación del modelo se llevó a cabo comparando las salidas de las simulaciones con datos de campo obtenidos de ensayos realizados por Suárez y col. (1994), considerando como variable de entrada el número de adultos registrados en el ensayo a lo largo de un período normal de engorde. Por otra parte, se analizó la respuesta del modelo en relación a las cargas parasitarias y a las edades de los animales. Con el objetivo de estudiar los valores de HPG para distintas cargas parasitarias y manteniendo la edad fija, se simularon cargas desde 5000 a 35000 nematodes adultos por animal, con edades de 3, 6, 7, 12 y 18 meses después del

destete. También se analizó la respuesta del hospedador en relación a su edad frente a cargas parasitarias constantes. Para ello se tomaron cargas de 30000, 22500, 20000, 15000, 10000, 5000 parásitos adultos por hospedador.

HPG	Carga Parasitaria														
	Baja					***Moderada***					***Alta***				
	B	Ver	Oto	Inv	Pri	*B*	Ver	Oto	Inv	Pri	*B*	Ver	Oto	Inv	Pri
Terneros	*Bajo*	*Bajo*	*Moderado*			*Moderado*	*Moderado*	*Alto*			*Alto*	*Alto*			
Novillitos	*Bajo*		*Bajo*			*Bajo*		*Bajo*		*Bajo*	*Bajo*			*Alto*	
Novillo	*Bajo*				*Bajo*	*Bajo*		*Bajo*	*Bajo*		*Bajo*				

Tabla 6.2: Base de reglas del FIS, las funciones de membresía de salidas. En rojo se señalan las reglas llamadas básicas, que se obtienen de conclusiones comunes a los trabajos referenciados. Las restantes son reglas de calibración correspondientes a las condiciones locales.

6.5 Resultados

La Figura 6.1 muestra los valores de HPG obtenidos a partir de las simulaciones realizadas utilizando este modelo. La relación entre carga parasitaria y HPG en los primeros meses post-destete fue directa; es decir, a mayor cantidad de adultos mayor fue el valor de HPG. Se obtuvo un valor máximo de 1118 HPG en el mes de Julio, con una carga de 41000 adultos. Luego de este valor máximo, los valores comienzan a disminuir hasta el mes de Septiembre, con valores de HPG por debajo de los 200.

En la Figura 6.2 se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones con diferentes cargas parasitarias variables en el tiempo, según la edad del hospedador. Para animales de 3 y 6 meses, las cargas parasitarias de 4000 a 15000 adultos se corresponden a un valor promedio de 400 HPG. Para animales con mayor edad y el mismo rango de carga parasitaria, los valores se reducen a menos de 250 HPG.

Para cargas de entre 17000 y 25000 adultos, los valores de varían entre 450 y 1000 HPG, sin distinguirse grandes diferencias entre las edades. Para cargas mayores a 25000 adultos, los valores máximos para menores a 6 meses son de aproximadamente 1350 HPG, mientras que, para los animales mayores de 7 meses alcanzan sólo 1150 HPG.

Con respecto a la respuesta de los animales manteniendo la carga parasitaria constante en el tiempo, se observa que si la carga es de 30000 adultos, los animales aportarán inicialmente 1350 HPG, con una pequeña disminución a partir de los 6 meses a 1100 HPG. Cuando la carga es de 22500 adultos (valor extremo de la función de membresía Moderado, que además

tiene un valor de 0.5 de pertenencia a Alto), el valor de HPG será de 650 HPG, presentado un valor máximo entre los meses 5 a 7 de aproximadamente 900 HPG. Pasado este período, los valores alcanzados son de aproximadamente 600 HPG. Para cargas menores de 15000 adultos, los valores de HPG varían entre 430 y 200, pero pasados los 8 meses caen a valores cercanos a 100 HPG (Figura 6.3).

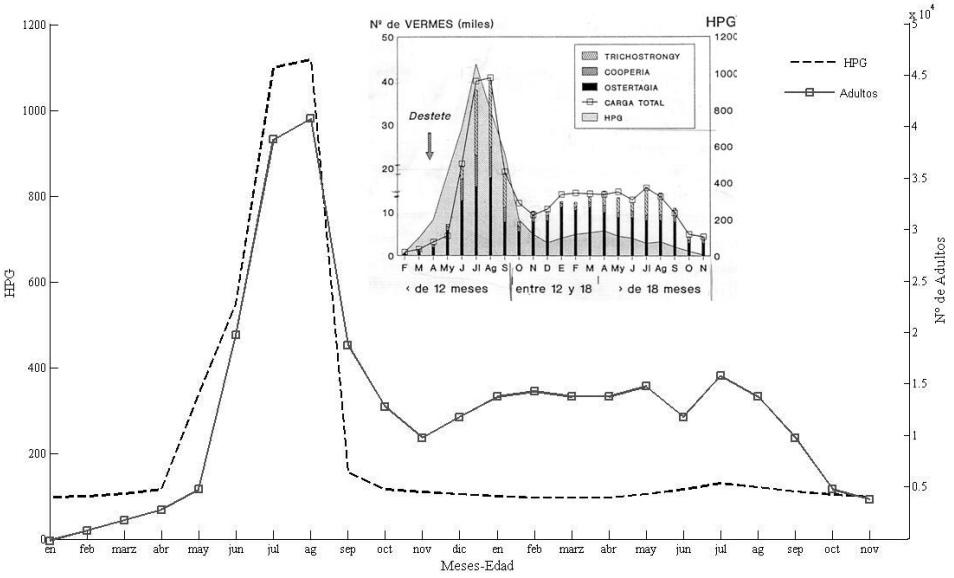


Figura 6.1: Simulación con datos de cargas parasitarias informadas por Suárez y col. (1994) a lo largo de un período normal de engorde: (------) HPG; (—□—) Número de adultos en el hospedador. En el recuadro superior se muestran los resultados de los ensayos de campo.

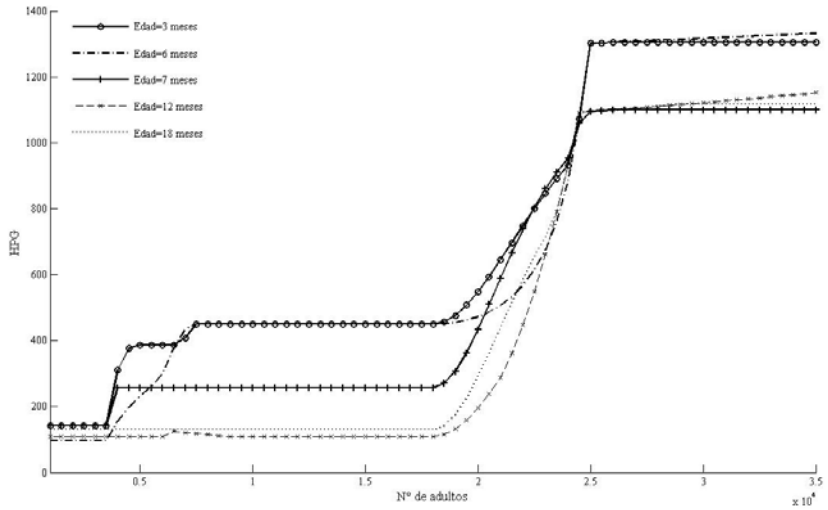


*Figura 6.2: Valores de HPG obtenidos con el modelo en relación a las cargas parasitarias variables y la edad del hospedador. Edad de (—○—) 3 meses; (- · -) 6 meses; (—+—) 7 meses; (- * -) 12 meses; (·····) 18 meses.*

6.6 Conclusiones y Discusión

El modelo es preciso en la determinación del HPG en relación con las cargas parasitarias y la edad de los hospedadores. Es importante notar que algunos autores encuentran indicios de que el HPG no está relacionado con la época del año aunque sí fuertemente con la edad de sus hospedadores.

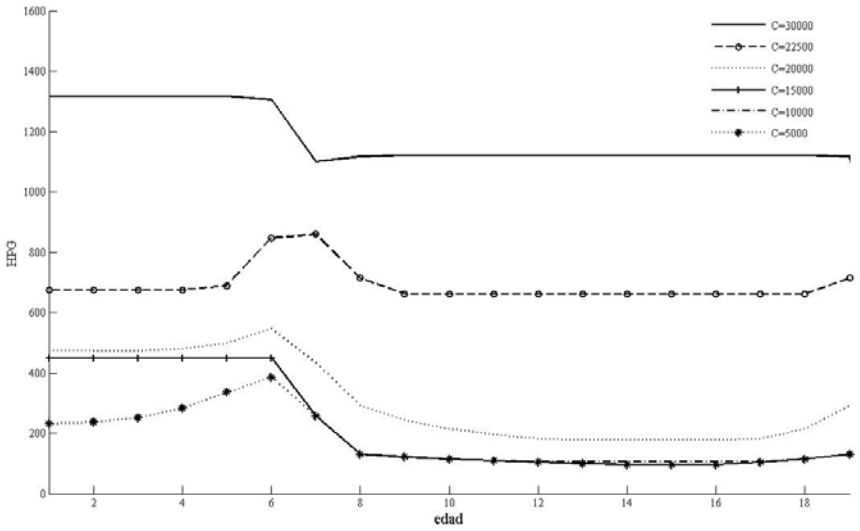


Figura 6.3: Respuesta del hospedador destetado frente a cargas parasitarias constantes: (——) 30000; (– – –) 22500; (·····) 20000; (—+—) 15000; (– · –) 10000; (····· ····) 5000.*

El modelo responde adecuadamente a las distintas situaciones planteadas para las simulaciones. Cabe destacar que el valor máximo está condicionado a la elección de las funciones de membresía. Sin embargo, obtener una estimación del valor máximo de HPG y el momento en que se da es un buen indicador de la situación en la que se encuentra el rodeo a pesar de no ser precisamente el valor exacto que se mediría en el campo, si se considera que la precisión en la abundancia en los momentos extremos no es tan importante como el disponer del patrón completo de comportamiento.

Es importante notar que el modelo representa de manera precisa la resistencia de los hospedadores en función de la edad. En la Figura 6.1, se puede observar que en los primeros meses de la simulación se presenta una relación directa, aunque no necesariamente lineal, entre la carga parasitaria y la respuesta del modelo. También se puede observar que para el mismo mes del año siguiente el valor de HPG es menor. Esto es efectivamente lo esperado, ya que se trata de un mismo animal con mayor edad y durante la misma época del año. Esto

también se observa en la Figura 6.3 donde se ve que cuando han pasado los 6 meses, se registra una disminución promedio en los valores de HPG, sin importar la carga.

En los resultados de las simulaciones no fue posible verificar que exista una la relación entre los valores de HPG y la época del año. Sólo se observa que en las simulaciones en las que se consideraron distintas cargas, se registra un aumento de los valores de HPG en los meses de Mayo, Junio y Julio. A pesar de que el saber de los productores apoya esta hipótesis, en realidad no ha sido corroborada con ensayos orientados a verificarla o rechazarla. Si bien en los trabajos consultados se analizan los resultados haciendo diferencias entre las estaciones del año, las conclusiones globales a las que llegan desestiman que la época sea un factor que regule el valor de HPG. En este sentido, las simulaciones realizadas con el modelo construido coinciden con estas conclusiones.

VII. CONTROL PARASITARIO A TRAVÉS DE TRATAMIENTOS ESTRATÉGICOS.

En este capítulo se muestra cómo se aplica el modelo integrado para el análisis y posterior determinación de un calendario de desparasitaciones, con el objetivo de realizar un control de la parasitosis.

A partir de una simulación inicial, en la que consideramos que la parasitosis se desarrolla sin control alguno, se plantean diferentes calendarios de tratamiento. Las fechas de desparasitación responden a diferentes estrategias definidas por el usuario. Aquí el objetivo es reducir el grado de infección en las pasturas durante los meses centrales del año (abril-septiembre) y, por otra parte, proteger a los animales en los momentos que las cargas parasitarias aumenten considerablemente debido a las ondas de desinhibición (octubre-marzo).

En las simulaciones se considera que los tratamientos se realizan con diferentes antiparasitarios. La información que utiliza el modelo para cada uno de ellos es su tiempo de acción y efectividad. Es necesario aclarar que en las simulaciones se busca determinar la combinación de fechas con mayor impacto sobre la población, mientras que la combinación de distintas drogas a utilizar se considera que es materia de los médicos veterinarios.

De las propuestas aquí presentadas no se tienen resultados de ensayos de campo, a pesar de lo cual consideramos que puede ser una buena herramienta para iniciar un control estratégico de la parasitosis, permitiendo realizar modificaciones en el calendario a partir de controles de campo.

Se plantearon dos escenarios sustancialmente distintos en sus condiciones ambientales, el primero en la ciudad de Tandil, provincia de Buenos Aires y el segundo en Reconquista, provincia de Santa Fe.

7.1. Introducción

Un manejo eficiente del pastoreo de los animales, combinado con tratamientos antiparasitarios, puede lograr controlar de manera efectiva el problema de la parasitosis en el rodeo. Consideramos que "controlar" no es sinónimo de eliminar la población de parásitos del rodeo, sino que nos estamos refiriendo a que los niveles de parasitosis en los animales sean "naturales" (sección 6.2.2.2), es decir, que los efectos en el animal sean mínimos.

Los antiparasitarios son la herramienta más frecuente y usada para el control de la enfermedad debido a su amplio espectro de acción y alta efectividad contra las poblaciones de parásitos adultos (Tabla 7.1). El uso indiscriminado de estas drogas ha llevado, en los últimos años, a registrar casos de resistencia a antiparasitarios en toda la región ganadera no sólo de la Argentina si no también del resto de mundo. En consecuencia, se ha planteado el desafío a veterinarios y productores de generar herramientas para el control parasitario y la utilización eficiente de los tratamientos.

Antiparasitario	Tiempo de acción	Efectividad
Levamisoles	8 a 12 hs	95%
Bezimidazoles	48 a 72 hs	95%
Ivermectinas	2 a 5 semanas	97%
Doramectinas	5 semanas	97%
Moxidecin	5 semanas	97%

Tabla 7.1: Antiparasitarios utilizados habitualmente.

Los tratamientos usualmente implementados en los rodeos se pueden dividir en:

- Tratamientos prefijados (Tratamiento táctico).
- Tratamientos por diferencia de engorde (Tratamiento sintomático).
- Tratamiento por parámetros parasitológicos y productivos (Tratamiento estratégico).

En los tratamientos prefijados se desarrollan programas de control basados en desparasitaciones prefijadas, donde se contemplan tratamientos tácticos administrando el antiparasitario para aliviar el efecto de la alta infectividad en la pastura. Los tratamientos estratégicos, se basan en la administración de antiparasitario durante las primeras 12-15 semanas de pastoreo, a intervalos que cubren el período prepatente de la enfermedad, para limitar la oviposición. Así, el nivel de infectividad de la pastura durante el invierno y primavera permanece lo suficientemente bajo como para no afectar las ganancias de peso.

En los tratamientos por diferencia de engorde, se toma como indicador del nivel de parasitosis la ganancia diaria de peso. Se selecciona un grupo del rodeo y se lo divide en dos, uno de los grupos recibe mensualmente antiparasitario mientras que al otro se lo deja libre de tratamiento. Si las ganancias de peso son menores a 50 gr. para el grupo no tratado, entonces comienza el tratamiento en todo el rodeo.

En los tratamiento por parámetros parasitológicos y productivos, también conocidos como estratégicos, es necesario incorporar la vigilancia y el criterio profesional al programa de

control. El objetivo principal es definir el riesgo potencial a que se ven sometidos los rodeos. Para ello se tienen en cuenta factores epidemiológicos (nivel de infectividad de los potreros, tratamientos realizados y drogas empleadas, época del año y condiciones climáticas de la zona), factores referidos al rodeo (edad y raza de los animales, nivel de HPG y prevalencia de géneros parasitarios) y factores de manejo (presión de pastoreo, posibilidades de cambio de potrero en el futuro inmediato y calificación del mismo). Todos estos factores permiten determinar cuándo, cómo y por qué la enfermedad causa o puede causar pérdidas económicas de importancia.

Los controles están orientados a la reducción de las altas cargas parasitarias en los animales para evitar así que las pasturas estén altamente infectadas. De esta manera se logra se reducir la tasa de reinfección en los animales parasitados y una tasa de infección baja en los animales que se incorporan al rodeo.

Como efecto secundario, se produce una reducción de los valores de HPG a casi cero en el tiempo de acción del antiparasitario. Dado que el período de prepatencia de *Ostertagia* es de tres semanas, éstas se agregan al tiempo de acción determinado

7.2. Propuestas estratégicas para el control de parasitosis por *Ostertagia ostert*agi

Las propuestas que se generarán con el modelo serán del tercer tipo (tratamiento por parámetros parasitológicos y productivos). Para ello es necesario definir los diferentes factores que tendremos en cuenta con respecto a las condiciones iniciales en el modelo:

- El potrero inicialmente se encuentran libre de parásitos.
- El rodeo está compuesto por 25 animales, los cuales permanecen en el potrero por 20 meses a partir del 1º de enero.
- Al inicio del ensayo los animales entran al potrero con un nivel de parasitosis bajo, fijado en 5000 parásitos adultos por animal.
- La presión de pastoreo se simula con la tasa de ingesta de *L*3 fijada en 0.3.

7.3 Resultados

7.3.1 Tandil, provincia de Buenos Aires ($\bar{X}$=14°C; *LL*=888 mm):

En la Figura 7.1 se muestra la simulación sin ningún tratamiento. Los valores de HPG en los primeros meses de la simulación oscilan entre 250 y 100 huevos. Estas oscilaciones se deben a que aún no se ha producido la autoinfestación de los animales y, por otra parte, la disponibilidad de larvas en la pastura en esta época del año es muy baja. La población

preinfectiva es favorecida por el clima de los meses de Marzo, Abril y Mayo, logrando migrar a las pasturas y producir el primer pico de infección. La consecuencia de este nivel de infección en la pastura se refleja en el mes de Junio en la población de parásitos adultos. Para estos meses se registra un crecimiento en los valores de HPG de 450 a 1350, siendo este último el máximo valor alcanzado en todo el ensayo. Este valor se mantiene durante aproximadamente dos meses para luego descender a 1100 HPG. El descenso en la producción de huevos se puede atribuir a la inmunidad adquirida por los animales, ya que tienen una edad mayor a los 6 meses.

Este aporte de huevos al medio, sostenido durante 5 meses, asegura una gran infección en las pasturas, produciendo una gran disponibilidad de *L*3 durante todo el invierno y parte de la primavera. La población de adultos durante estos meses crece hasta alcanzar un valor máximo en el mes de Julio; posteriormente la población decrece con oscilaciones hasta Marzo del siguiente año.

Este decrecimiento en la abundancia de la población de adultos es consecuencia del proceso de inhibición que se produce durante la última parte del año, momento en el cual la mayoría de las larvas ingeridas detiene su desarrollo. Las oscilaciones que se observan en la población de adultos son consecuencia de aquellas larvas que reanudan su desarrollo. Esto se puede ver claramente en los meses de Noviembre y Diciembre. La segunda onda de desinhibición, la cual toma lugar desde mediados de Mayo hasta fines de Junio, junto con la disponibilidad de larvas en la pastura es responsable de la recuperación y aumento en la abundancia de parásitos adultos. Éstos reinician el ciclo, asegurando y agravando la parasitosis en los animales.

Calendario propuesto de desparasitaciones.

Es posible dividir la dinámica de las poblaciones de *Ostertagia* en dos períodos semestrales. El primer semestre está caracterizado por individuos que continúan su desarrollo normalmente y aportan gran cantidad de huevos a la pastura. La mayoría de los individuos del segundo semestre detienen su desarrollo y reducen considerablemente la oviposición.

De las simulaciones se deduce que las fechas de desparasitación para el primer semestre serán alrededor del 21 de abril y del comienzo del invierno, 21 de junio. Con estos dos tratamientos se logra reducir la población de parásitos adultos y los valores de HPG en todo el primer semestre.

Para el segundo semestre, la fecha de desparasitación es en fecha cercana al comienzo de la primavera, 21 de septiembre, para lograr reducir la cantidad de larvas que reanudarán su desarrollo en la segunda onda de desinhibición.

De esta manera se propone el siguiente calendario de desparasitación

- *1ra aplicación: 20/04/06. Tiempo de acción del antiparasitario: 56 días.*

- *2da aplicación: 10/06/06. Tiempo de acción del antiparasitario: 56 días.*
- *3ra aplicación: 01/10/06. Tiempo de acción del antiparasitario: 56 días.*
- *4ta aplicación: 01/04/07. Tiempo de acción del antiparasitario: 56 días.*

La simulación del tratamiento y su comparación con la población sin control están representadas en la Figura 7.2. La primera y segunda aplicación reducen la cantidad de larvas que en Marzo y Abril llegan a la pastura y que son las responsables del pico de parásitos adultos producido en el mes de Junio. El tratamiento en los animales afecta directamente sobre la producción de huevos, llevando los niveles de HPG por debajo de 100 desde Mayo hasta principios de Agosto. Esta reducción se refleja rápidamente en la disponibilidad de larvas a emigrar y posteriormente en la disponibilidad de larvas en la pastura.

En el mes de Agosto, al finalizar el efecto del antiparasitario, la población de adultos crece rápidamente, siendo ésto consecuencia de la ingesta de larvas *L*3 que sobreviven en la pastura desde mediados de Abril. El valor máximo de abundancia de parásitos en el hospedador se registra a mediados de Agosto y luego la población decrece con oscilaciones. Finalizado el efecto del tratamiento realizado en Octubre, la población de adultos presenta un pico para luego decrecer con oscilaciones hasta el mes de Abril. Al comienzo de este mes, se aplica el último tratamiento logrando así evitar la recuperación de la población de adultos. De esta manera, con 4 tratamientos estratégicos, se logra controlar la parasitosis en un período de 24 meses.

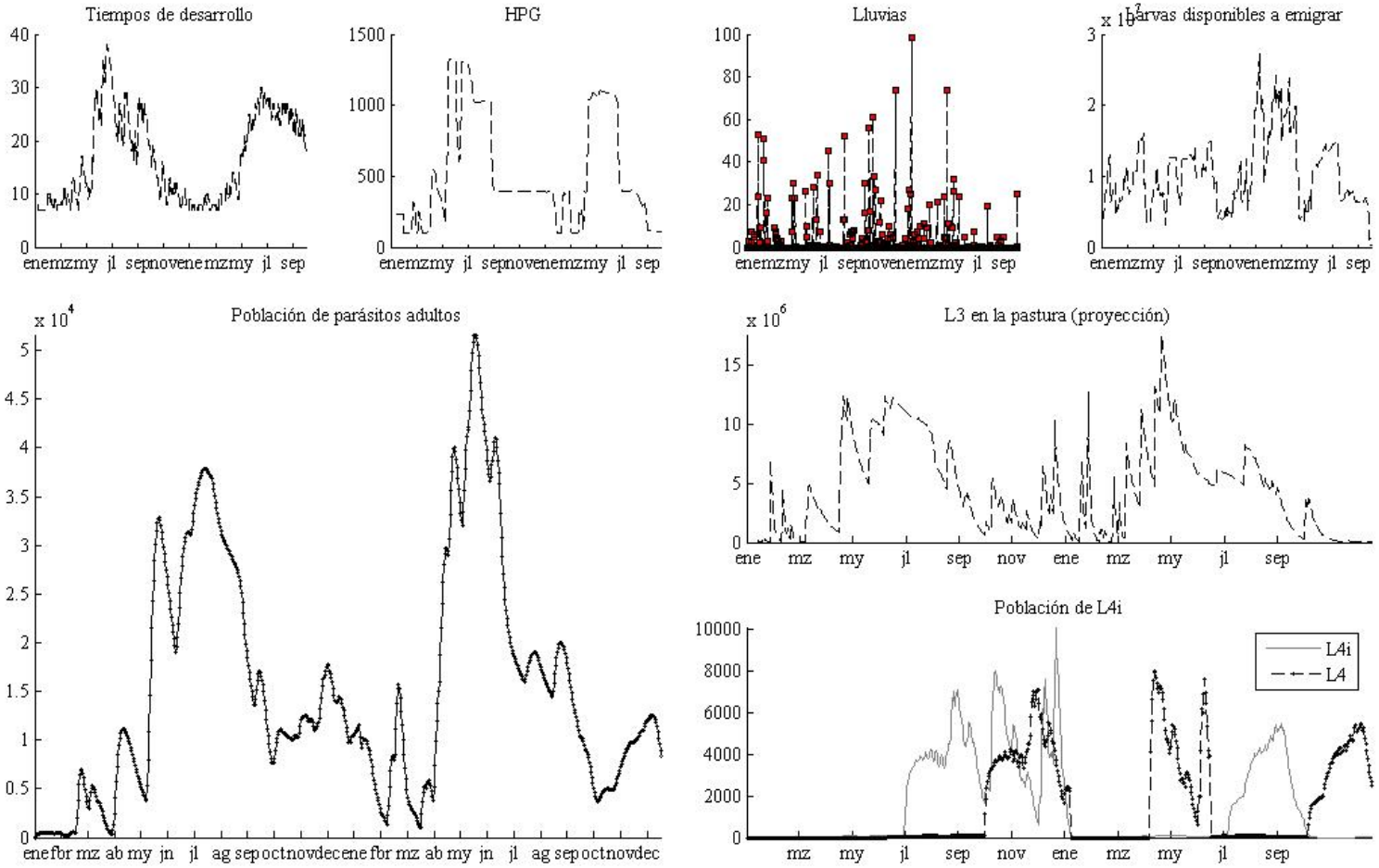


Figura 7.1: Simulación de parasitosis sin tratamiento antiparasitario para condiciones climáticas de Tandil, provincia de Buenos Aires.

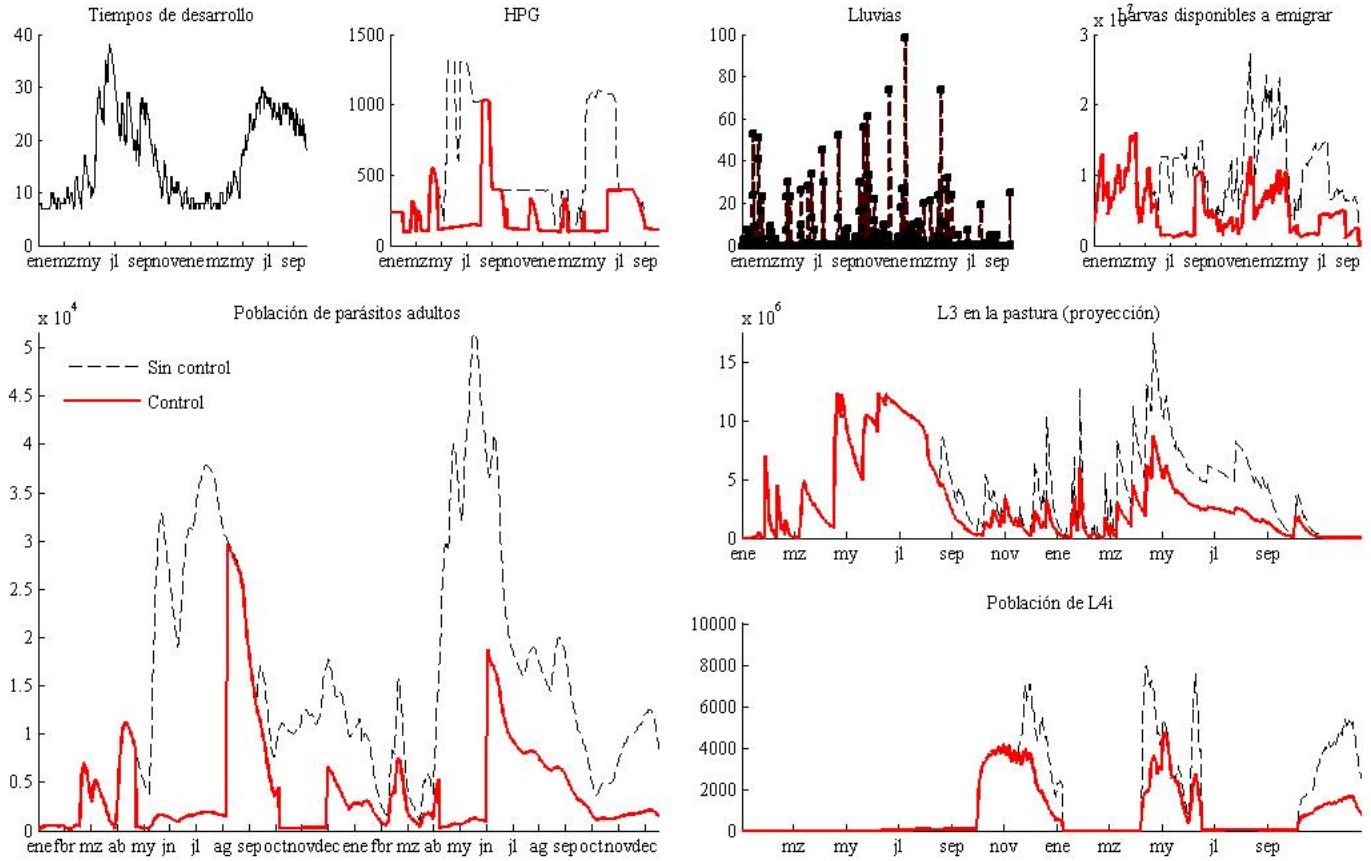


Figura 7.2: Simulación del calendario de desparasitación propuesto para Tandil, provincia de Buenos Aires. En color rojo son los resultados de la simulación con tratamientos en los meses de Abril, Junio, Octubre y Abril del siguiente año.

7.3.2 Reconquista, provincia de Santa Fe ($\bar{X}$=19.5°C; LL=1408 mm):

En la Figura 7.3 se muestra la simulación sin ningún tratamiento. Los valores de HPG en los primeros meses de la simulación oscilan entre 250 y 100 huevos. Estas oscilaciones se deben a que aún no se ha producido la autoinfestación de los animales y, por otra parte, la disponibilidad de larvas en la pastura en esta época del año es muy baja. Las altas temperaturas y las lluvias veraniegas no favorecen a la población preinfectiva produciendo un nivel bajo de contaminación de las pasturas. Esto se observa hasta fines de Mayo cuando, favorecidas por el descenso de la temperatura, las *L*3 en la pastura sobreviven mayor tiempo logrando elevar el grado de infección y, en consecuencia, aumentar la población de parásitos adultos junto con los valores de HPG. Para estos meses los valores crecen hasta 1400 HPG.

Este valor se mantiene con variaciones hasta principios de Septiembre. Este aporte de huevos al medio, en combinación con las sequías invernales, asegura una gran disponibilidad de larvas a migrar a las pasturas. En consecuencia, en el mes de Octubre se registra un gran pico de infección en las pasturas y posteriormente en los animales en el mes de Enero. Es de destacar que el número de larvas ingeridas en este mes, detiene su desarrollo aportando a las dos ondas de desinhibición que se registran en el mes de Enero y a partir de Abril. Estas últimas, al reanudar su desarrollo, hacen crecer rápidamente la cantidad de adultos en los animales asegurando la continuidad de la parasitosis.

Calendario propuesto de desparasitaciones.

La simulación del tratamiento y su comparación con la población sin control están representadas en la Figura 7.4.

De esta simulación se proponen el siguiente calendario de desparasitaciones:

- *1ra aplicación: 21/03/06. Tiempo de acción del antiparasitario: 56 días.*
- *2da aplicación: 21/06/06. Tiempo de acción del antiparasitario: 56 días.*
- *3ra aplicación: 01/11/06. Tiempo de acción del antiparasitario: 56 días.*
- *4ta aplicación: 01/04/07. Tiempo de acción del antiparasitario: 56 días.*

La aplicación de los tratamientos antiparasitarios reducen considerablemente las poblaciones. La población de adultos alcanza su valor máximo en Enero del siguiente año, luego la población se mantiene en niveles moderados hasta Abril. El tratamiento realizado en este mes evita la recuperación de la población de adultos, logrando de esta manera reducir la infección en los animales y en la pastura.

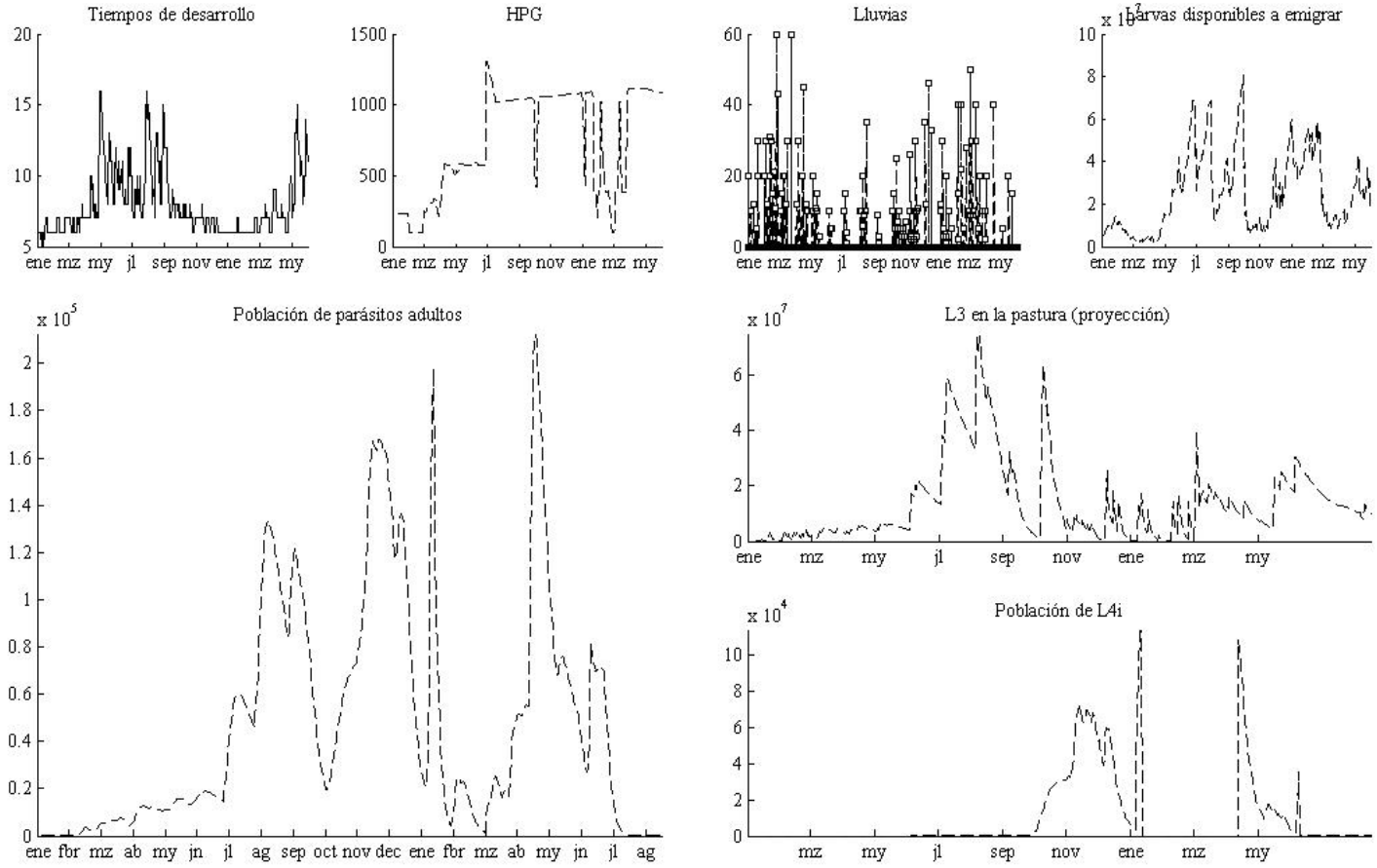


Figura 7.3. Simulación de parasitosis sin tratamiento antiparasitario para condiciones climáticas de Reconquista, provincia de Santa Fe.

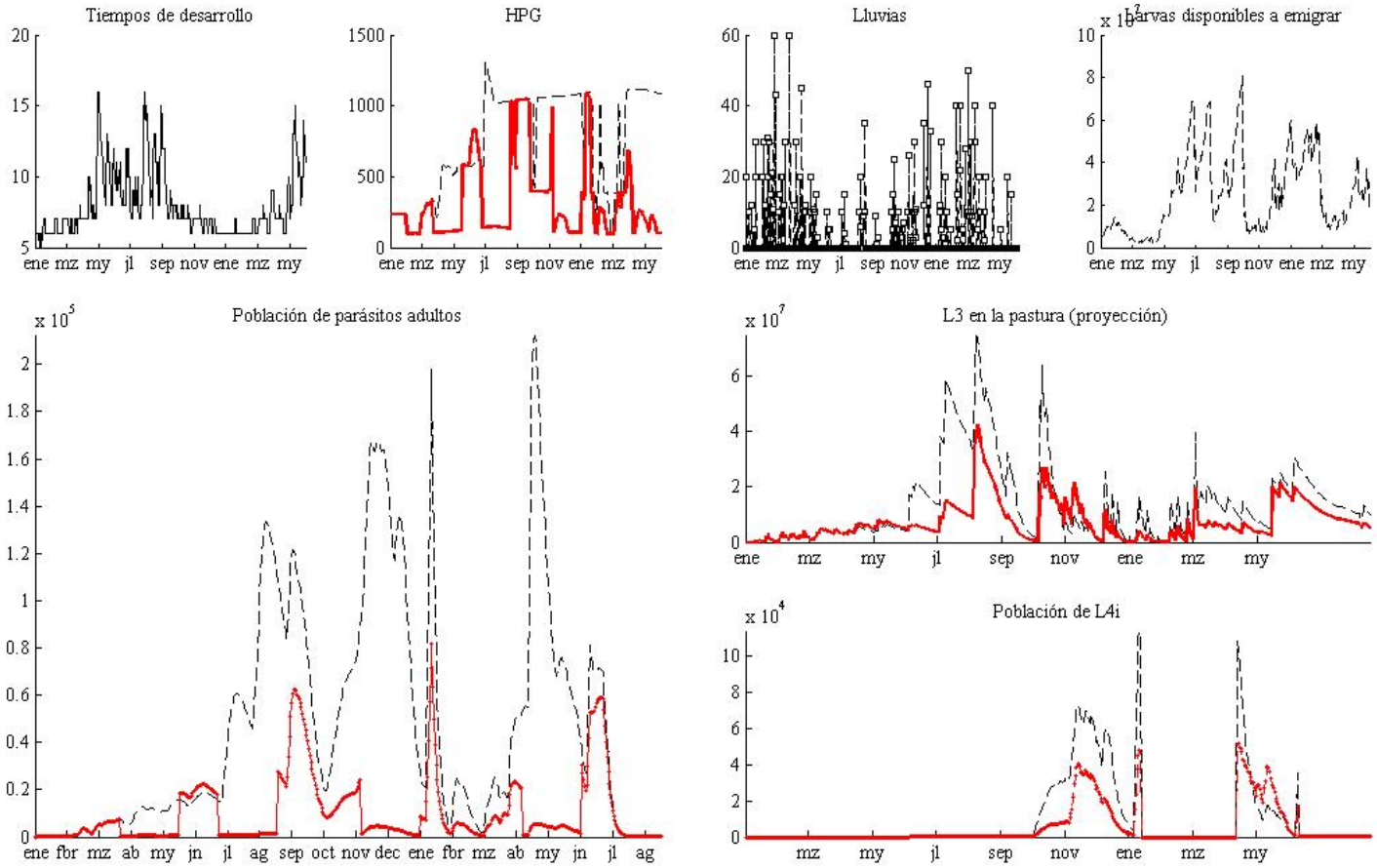


Figura 7.4: Simulación del calendario de desparasitación propuesto para Reconquista, provincia de Santa Fe. En color rojo se muestran los resultados de la simulación con tratamientos en los meses de Abril, Junio, Noviembre y Abril del siguiente año.

7.3 Conclusiones y discusión

Los valores de abundancia de las poblaciones de *Ostertagia* crecen de un año a otro si no es controlada la población. La enfermedad presenta una estacionalidad muy marcada. Dicha estacionalidad se puede dividir en dos períodos. El primer período comprende desde Octubre hasta Abril del siguiente año, cuando la población de adultos decrece con oscilaciones. Sin embargo, la cantidad de parásitos es suficientemente abundante como para mantener la producción de huevos en niveles moderados-altos cuando no se controla la enfermedad. En el segundo período, las condiciones climáticas son favorables para la población de *Ostertagia*. Dicho período está comprendido entre los meses de Mayo a Septiembre, y aquí la población de adultos crece con oscilaciones aumentando hasta que los valores en la producción de huevos aportados a la pastura alcanzan un máximo. Por otra parte, las condiciones climáticas permiten a las *L*3 sobrevivir en la pastura, logrando así altos niveles de infección en los meses finales de invierno y comienzos de la primavera.

Los controles para evitar una infección alta de la pastura deben ser realizados en el período comprendido entre Abril y Junio. En este período la población preinfectiva es beneficiada por las condiciones climáticas y la población de parásitos adultos se encuentra en animales que aún no tiene inmunidad. En consecuencia, se registran los valores más altos de HPG de todo el año.

Para el segundo semestre es necesario cambiar la estrategia, ya que las *L*3 que llegan a la pastura tienen, después de un período de acondicionamiento, la capacidad de detener su desarrollo. Recordemos que *L*4*i* están inhibidas metabólicamente y por lo tanto no se ven afectadas por los tratamientos antiparasitarios. La estrategia a implementar en este período es realizar tratamientos preventivos en los meses de Septiembre y Octubre. Otra posible estrategia a implementar consiste en reducir el tiempo que pasan acondicionándose las *L*3 en la pastura. Dado que la tasa de ingesta de *L*3 puede aumentar entre Agosto y fin de Diciembre, es posible reducir el tiempo de acondicionamiento y, por tanto, las poblaciones de *L*4*i*.

Los controles en Enero, Febrero, Julio, Agosto, Noviembre y Diciembre no son recomendables, ya que los efectos del tratamiento son mínimos en la población. Las fechas de desparasitación en los meses restantes (Marzo, Abril, Mayo, Junio, Septiembre, Octubre) estarán fuertemente ligadas con la dinámica de las pasturas o como hemos concluido en el Capítulo VII. Dicha dinámica depende de la estacionalidad de las lluvias. Esto lo podemos observar en los dos calendarios de desparasitación que se propusieron en las dos zonas consideradas, en los cuales las fechas variaron levemente.

Los tratamientos propuestos logran efectivamente reducir las poblaciones de *Ostertagia* en todos sus estadios y, principalmente, reducir la infección en la pastura. Las estrategias propuestas están orientadas a controlar el problema de la siguiente manera.

- *Para el primer semestre:* Reducir la cantidad de huevos aportados al medio.
- *Para el segundo semestre:* Reducir la cantidad de larvas hipobióticas.
- *Para el segundo semestre:* Mantener los animales con protección de un antiparasitario cuando se producen las ondas de desinhibición, principalmente la segunda.

VIII. CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se construyó un modelo del ciclo de vida de *Ostertagia ostertagi* con el objetivo de estudiar la dinámica poblacional, bajo distintas condiciones climáticas y de posibilitar la generación de estrategias de control en sistemas de producción de carne bovina.

Los modelos construidos previamente (Louie y col., 2007; Learmount y col., 2006, Ward, 2006a, Ward, 2006b; Smith y col., 1987; Smith y col., 1986; Young y col., 1980b) dieron resultados muy interesantes con respecto a la dinámica de las poblaciones, volviéndose una herramienta muy útil para investigaciones en condiciones de campo y laboratorio. No obstante, estos modelos no tiene en cuenta algunos aspectos importantes del ciclo de vida. Por ejemplo, en el capítulo IV mencionamos el efecto de las lluvias, en relación con la mortalidad preinfectiva y la migración de las *L3* hacia las pasturas. Por otra parte, en los modelos mencionados no se aborda la problemática de los procesos de inhibición-desinhibición y la relación entre las cargas parasitarias y valores de HPG.

Sin embargo, es necesario notar que las hipótesis para estos modelos no son totalmente adecuadas para las condiciones en Argentina, en lo que se refiere a las condiciones climáticas y a la forma en que se maneja el rodeo. Por otra parte, consideramos que dichos aspectos omitidos son de gran importancia para el modelado del ciclo de vida de *Ostertagia*.

La inteligibilidad del modelo aquí presentado es la mayor cualidad a destacar, siendo ésta consecuencia de:

- La construcción modular.
- El uso de ecuaciones en diferencias.
- La parametrización de los modelos con sistemas de inferencia difusos.

La combinación de estos tres puntos nos permitió construir un modelo en el que se incorporaron los aspectos omitidos por los modelos previamente construidos, concentrándose los esfuerzos en la representación de las características biológicas del ciclo de vida de *Ostertagia*. El modelo así construidos nos permite trabajar en diferentes escalas de precisión, logrando de esta manera un modelo general compuesto por modelos simples en diferentes escenarios.

La utilización de sistemas difusos para la parametrización de modelos otorga la capacidad de describir adecuadamente problemas con dinámicas complejas, en las que se involucran gran cantidad de variables e información que no es fácilmente cuantificable, y que no hubieran sido posible incluir usando herramientas matemáticas clásicas. La inclusión del conocimiento

ganado a través de los años de investigación es un aspecto muy valioso de esta técnica de modelado.

Dada su estructura modular, el modelo es una buena herramienta para realizar un análisis de la dinámica de la población de *Ostertagia* y probar la verosimilitud de hipótesis propuestas sobre los procesos intervinientes en el ciclo de vida del parásito, permitiendo la incorporación de módulos adicionales sin dificultad. En cuanto a las aplicaciones del modelo, puede ser utilizado, por ejemplo, para estudiar distintos efectos de calendarios de desparasitaciones, niveles de infección en la pastura, valores de HPG dependiendo del estado sanitario del rodeo.

Creemos que es necesario realizar ensayos de campo para poder agregar mayor realismo al modelo, tales como la realización de trabajos dirigidos a estudiar migración de larvas a la pastura o la tasa de ingesta de larvas.

Trabajo futuro a desarrollar

La base de la teoría difusa subyace en la idea de que todo tiene un cierto grado de veracidad (o falsedad) en donde los blancos y negros son casos especiales en un mundo de grises (Mackinson y col., 1999). La exactitud y precisión de las matemáticas "clásicas" se podrían considerar como el límite de lo difuso cuando las incertezas desaparecen.

En problemas de Ecología, al igual que en otras disciplinas basadas en observaciones de campo, la heterogeneidad e incertidumbre son características muy frecuentes de los datos obtenidos. Muchas veces se cuenta con información cualitativa que complementa el conocimiento adquirido sobre procesos de importancia. Así podemos considerar que la información con la que se trabaja presenta características acordes a la definición de número difuso.

Como vimos, se define un número difuso en términos de un conjunto difuso convexo normalizado, que tiene un único elemento con valor de membresía igual a uno en todo R, siendo su función de membresía continua a trozos. El concepto de número difuso permite trabajar con parámetros cuyo valor exacto es desconocido y que contienen un cierto margen de error o incertidumbre. Las operaciones de suma, resta, multiplicación y división de números reales se pueden extender sobre el conjunto de todos los números difusos sobre la recta real ($F(R)$), por el principio de extensión de Zadeh (Zadeh, 1965), el cual permite generalizar conceptos matemáticos en conjuntos clásicos a conjuntos difusos.

El desarrollo de un marco teórico en Aritmética Difusa como base para el planteo, desarrollo y análisis de modelos matemáticos matriciales y discretos difusos, aplicados a problemas en Ecología serán tema de próximas investigaciones.

A partir de una definición adecuada de operaciones sobre números difusos se buscará extender la noción de operaciones sobre vectores difusos y matrices difusas. El propósito es estudiar y analizar el comportamiento asintótico de los modelos matriciales a través de los autovalores y autovectores de la matriz de proyección poblacional difusa, es decir cuyos coeficientes son números difusos.

El objetivo de esta metodología es desarrollar un tipo de modelo en el que la respuesta sea un intervalo difuso, en lugar de ser un valor "exacto". La "exactitud" del modelo se verá reflejada en la longitud del intervalo difuso obtenido. De esta manera, la calidad y la diversidad de la información con la que se cuenta pueden ser consideradas más valiosas que la cantidad de datos. En particular, creemos que la repetición de "patrones" en los datos a utilizar mejora el modelo, otorgándole mayor precisión a los cálculos. Esto es una característica muy interesante de aprovechar, ya que son bien conocidos los costos que implican la obtención de información de campo y en laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

Al Saqur, I., Bairden, K., Armour, J., 1982. Population study of bovine *Ostertagia spp* infective larvae on herbage and in soil. Res. Vet. Sci. 32, 332-337.

Almería, S., Uriarte, J., 1999. Dynamics of pasture contamination by gastrointestinal nematodes of cattle under extensive management systems: proposal for strategic control. Vet. Parasitol. 83, 37-47.

Armour, J., 1978. The effect of weather factors on the inhibition of larval development in parasitic nematodes, In: Gibson, T.E. (Ed.), Weather and Parasitic Animal Disease, World Meteorological Organization, Tech. Note No. 159, 62-67.

Black, M., 1937. Vagueness. An Exercise in Logical Analysis. Philosophy of Science. 4(4), 427-455.

Block, E., Takagi, H., 1986. Relationship between fecal egg counts and total worm counts in subclinically parasitized calves and examination of possible variations in fecal egg excretions by cows. Can. J. Anim. Sci. 66, 799-803.

Bryan, R.P., Kerr, J.D., 1989. The relation between the natural burden of steers and the fecal egg count differentiated to species. Vet. Par. 30, 327-334.

Catto, J.B., 1982. Desenvolvimiento e sobrevivencia de larvas infectantes de nematodes gastrointestinales de bovinos durante a estaçao seca no Pantanal mato grossense. Pesq. Agrop. Bras. 17, 923-927.

Couvillion, C.E., Hawkins J.A., Evans, R.R., Belem, A.M.G., 1996. Seasonal pattern of inhibition of *Ostertagia ostertagi* in calves in northeast Mississippi. Veterinary Parasitology. 65, 283-287.

Durie, P., 1961. Parasitic gastro-enteritis of cattle: the distribution and survival of infective strongyle larvae on pasture. Aust. Vet. J. 20, 1200-1211.

Eysker, M., 1993. The role of inhibited development in the epidemiology of Ostertagia infections. Vet. Parasitol. 46, 259-269.

Ferreyra, D.A., Steffan, P.E., Fiel, C.A., González, F., 2003. Dinámica estacional y diaria en las pasturas de las poblaciones de nematodes *Trichostrongylideos* de bovinos. INTA Argentina. 31(2), 25-38.

Fernández, A.S., Fiel, C.A., Steffan, P.E., 1999. Study on the inductive factors of hypobiosis of Ostertagia ostertagi in cattle. Vet. Parasitol. 81, 295–307.

Fiel, C.A., Steffan, P.E., Vercesi, H.M., Ambrústolo, R.R., Catania, P., Casaro, A.P., Entrocasso, C.M., Biondani, C.A., 1988. Variación estacional del parasitismo interno de bovinos en el sudeste de la Prov. de Buenos Aires (Argentina) con especial referencia al fenómeno de hipobiosis. Rev. Med. Vet. (Bs. As.). 69, 57-64.

Fiel, C.A., Steffan, P.E., Nari, A., 1994. Epidemiología de los nematodes gastrointestinales en la Pampa Húmeda. En: Nari A., Fiel, C.A., editores. Enfermedades parasitarias de importancia económica en bovinos. Bases epidemiológicas para su prevención y control. Buenos Aires: Ed. Hemisferio Sur. 67-94.

Fiel, C.A., Fernández, S., Saumell, C.A., Fuse, L.A., Steffan, P.E., Iglesias, L.E., 2010a. Ecology of free-living stages of gastrointestinal nematodes in cattle. (Enviado para su publicación).

Fiel, C.A., Saumell, C.A., Fusé, L.A., Florez Gálvez, J., Freije, E., Iglesias, L., Steffan, P., 2010b. Estudio de la dinámica de la inhibición–desinhibición de *Ostertagia ostertagi* en terneros del centro de la provincia de Buenos Aires. Resultados preliminares. (Enviado para su publicación).

Gasbane, C., Eldin, A., Leighton, Bryant, D., 1996. Reliability of o single fecal egg per gram determination as a measure of individual and herd values for trichostrongyle nematodes of cattle. AJVR. 57(2), 168-171.

Gibson, M., 1981. The effect of constant and changing temperatures on the development rate of the eggs and larvae of *Ostertagia ostertagi*. J. Therm. Biol. 6, 389-394.

Gordon, H., 1973. Epidemiology and control of gastrointestinal nematodes of ruminants. Adv. in Vet. Sc. and Comp. Med. 17, 396-437.

Krecek, R.C., Murrell, K.D., Douglass, L.W., 1990. Effects of microclimatic variables on the availability and movement of third-stages larvae of *Ostertagia ostertagi* on herbage. Onderstepoort J. Vet. Res. 57, 133-135.

Learmount, J., Taylor, M.A., Smith, G., Morgan, C., 2006. A computer model to simulate control of parasitic gastro-enteritis in sheep on UK farms. Vet. Parasitol. 142, 312-329.

Levine, N.D., 1978. The influence of weather on the bionomics of the free-living stage of nematode. Weather and parasitic animal disease. WMO. Geneva, Switzerland. 159, 51-57.

Lotka, A.J., 1925. Elements of Physical Biology, Williams and Wilkins. Fue impreso nuevamente por Dover en 1956 con el título de Elements of Mathematical Biology.

Louie, K., Vlassoff, A., Mackay, A.D., 2007. Gastrointestinal nematode parasites of sheep: A dynamic model for their effect on liveweight gain. Int. J. Parasitol. 37, 233–241.

Lutzelschwab, C., Fiel, C.A., Pedonesse, S., Najle, R., Rodríguez, E., Steffan, P., Saumell, C., Fuse, L., Iglesias, L., 2005. Arrested development of *Ostertagia ostertagi*: effect of the exposure of infective larvae to natural spring conditions of the Humid Pampa (Argentina). Vet. Parasitol. 127, 253–262.

Malthus, T.R., 1798. An Essay on the Principle of Population. 1st edition, 1798. Library of Economics and Liberty. Free online, full-text searchable: http://www.econlib.org/library/Malthus/malPop.html.

Mackinson, S., Vasconcellos, M., Newlands, N., 1999. A new approach to the analysis of stock–recruitment relationships: "model-free estimation" using fuzzy logic. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 56, 686–699.

Michel, J.F., Lancaster, M.B., Hong, C., 1975. Arrested development of *Ostertagia ostertagi* and *Cooperia oncophora*. Effect of temperature at the free-living third stage. J. Comp. Path. 85, 133-138.

Onyiah L, Arslan O., 2005. Simulating the development period of a parasite of sheep on pasture under varying temperature conditions. J. Therm. Biol. 30, 203-211.

Pandey, V.S., 1972. Effect of temperature on the development of the free-living stages of the *Ostertagia ostertagi.* J. Parasitol. 58, 1037-1041.

Persson, L., 1974a. Studies on the bionomics of eggs and infective larvae of *Ostertagia ostertagi* and *Cooperia oncophora* in soil. Zbl. Vet. Med. B. 21, 318-328.

Persson, L., 1974b. The survival of eggs and infective larvae of *Ostertagia ostertagi* and *Cooperia oncophora* in solid cattle manure and urine. Zbl. Vet. Med. B. 21, 677-691.

Rohatgi, V.K., 1984. Statistical Inference. New York: John Wiley & Sons

Rose, J.H., 1969. The development of the parasitic stages of *Ostertagia ostertagi*. J. Helminthol. 43, 173-184.

Rose, J.H., 1970. Parasitic gastro-enteritis in cattle. Factors influencing the time of the increase in the worm population of pastures. Res. Vet. Sci. 2, 199-208.

Rossanigo, C., Gruner, L., 1995. Moisture and temperature requirements in the faeces for the development of free-living stages of gastrointestinal nematodes of sheep, cattle and deer. J. Helminthol. 69, 357-362.

Smith, G., Grenfell, B.T., Anderson, R.M., 1986. Maximum-likelihood of the mortality and migrations rates of the infective larvae of *Ostertagia ostertagi* and *Cooperia oncophora*. Parasitology. 92, 643-652.

Smith, G., Grenfell, B.T., Anderson, R.M., 1987. A mathematical model of the populations biology of *Ostertagia ostertagi* in calves and yearlings. Parasitology. 95, 389-406.

Steffan, P.E., Fiel, C.A., Entrocasso, C.M., Acuña, C.M., Rojas, Panelo, F., 1982. Parasitosis gastrointestinal de los bovinos. I: Estudio epidemiológico. Gac. Vet. 369, 278-290.

Stromberg, B.E., 1997. Environmental factors influencing transmission. Vet. Parasitol. 72, 247-264.

Suárez, V.H., 1990. Inhibition patterns and seasonal availability of nematode for beef cattle grazing on Argentina´s Western Pampas. Int. J. Parasitol. 20, 1031-1036.

Suárez, V.H., Busetti, M.R., Lorenzo, R.M., Babinec, F.J., 1994. Relación entre las cargas parasitarias bovinas y el recuento de huevos de nematodes por gramo de materia fecal. Revista de Medicina Veterinaria. 75(6), 426-435.

Verhulst, P.F., 1838. Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement. Correspondance mathématique et physique. 10, 113–121.

Volterra, V., 1926. Variazioni e fluttuazioni del numero d'individui in specie animali conviventi. Mem. Acad. Lincei Roma, 2, 31-113.

Ward, C.J., 2006a. Mathematical models to asses strategies for the control of gastrointestinal roundworms in cattle 1. Construction. Vet. Parasitol. 138, 247-267.

Ward, C.J., 2006b. Mathematical models to asses strategies for the control of gastrointestinal roundworms in cattle 2. Validation. Vet. Parasitol. 138, 268-279.

Williams, J.C., Bilkovich, J.R., 1971. Development and survival of infective larvae on pasture herbage. J. Parasitol. 57(2), 327-338.

Williams, J.C., 1983. Ecology and control of gastrointestinal nematodes of beef cattle. Vet. Clin. of North America: Large Animal Practice. 1, 183-205.

Williams, J.C., Knox, J.W., Marbury, K.S., Kimball, M.D., Baumann, B.A., Snider, T.G., 1987. The epidemiology of *Ostertagia ostertagi* and other gastrointestinal nematodes of cattle in Louisiana. J. Parasit. 95, 135-153.

Williams, J.C., Knox, J.W., 1988. Epidemiology of Ostertagia ostertagi in warm temperate regions of the United States. Vet. Parasitol. 27, 23–38.

Young, R.R., Anderson, N., Overend, D., Tweedie, R.L., Malafant, K.W.J., Preston, G.A., 1980a. The effect of temperature on times to hatching of eggs of the nematode *Ostertagia circumcincta*. J. Parasit. 81, 477-491.

Young, R.R., Nicholson, R.M., Tweedie, R.L., Schuh, H.J., 1980b. Quantitative modelling and predictions of development times the free-living stages of *Ostertagia ostertagi* under control field conditions. J. Parasit. 81, 493-505.

Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy Sets. Inf. Comp. 8, 338-353.

Currículum Vitae del Autor

El autor, Mauro Alejando Eduardo Chaparro, nació el 04 de Octubre de 1976 en San Cayetano, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Finalizó su estudio de grado en la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA) en Marzo de 2005, acreditándose su título de Licenciado en Ciencias Matemáticas. Comenzó sus estudios de investigación en Matemática en 2003 en el Grupo de Ecología Matemática del Instituto Multidisciplinario sobre Ecosistemas y Desarrollo Sustentable-UNCPBA.

Una vez recibido, el autor se incorporó activamente en el grupo, comenzando su estudio de Postgrado en la Universidad Nacional del Sur (Doctorado en Matemática) en octubre de 2005. Ha ganado experiencia en Reuniones y Conferencias Nacionales e Internacionales, a través de diversas presentaciones desde el año 2005 hasta el presente. Su trabajo ha sido realizado y discutido con colegas de distintas áreas multidisciplinarias, en la sección *Publicaciones del Autor* pueden apreciarse algunos de los artículos evaluados por revisores calificados, y publicados en Revistas Internacionales.

Es integrante del proyecto *"Desarrollo de Herramientas Matemáticas y Computacionales para la Conservación de Recursos Naturales"* dirigido por PHD. Graciela A. Canziani. Este proyecto pertenece al programa de incentivos y es subvencionado con fondos de la Secretaría de Ciencia, Arte y Tecnología Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. También el autor es colaborador del Grupo de Paleomagnetismo y Magnetismo Ambiental del Instituto de Física Arroyo Seco (IFAS-UNCPBA) en el proyecto PICT-2010 Nº 0221 – Estudios magnéticos de suelos y sedimentos aplicados a geomagnetismo y magnetismo ambiental. Concurso 2010. Entidad Acreditadora y/o Financiadora: Agencia Nacional de Promoción. Financiamiento solicitado: $ 280000. Director: Dra. Ana M. Sinito.

El autor ha acreditado 5 (cinco) Becas de Organismos Nacionales, CONICET, CIC y UNCPBA, desde 2004 hasta la fecha.

El autor ha estado involucrado en la docencia en la UNCPBA desde el 2000 hasta la fecha, en el dictado de clases prácticas y la confección de apuntes de cátedra. Actualmente posee el cargo de Jefe de Trabajos Prácticos en la materia *"Modelización"* dictada para la carrera de Licenciatura en Matemática en la Facultad de Ciencias Natural y Exactas de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Publicaciones del Autor

1. *Chaparro, M.A.E.; Canziani G.A.,; Saumell, C.A.; Fiel, C.A. 2011.* A mathematical model for the free-living stage of Ostertagia ostertagi, parametrized by fuzzy rule-based systems. *Ecological Modeling. 222: 1820–1832.*

2. *Chaparro, Mauro A.E.; Chaparro, Marcos A.E.; Sinito A. 2010.* An interval fuzzy model for magnetic monitoring: estimation of a pollution index. *Computational Geosciences. Enviado*

3. *Chaparro Mauro, Canziani Graciela. 2010.* A fuzzy rule-based system (FRBS) for estimating the development time from egg to infecting larval of Ostertagia ostertagi. *Ecological Modelling, Elsevier. 221: 2582-2589*

4. *Marcos A.E. Chaparro, Mauro A.E. Chaparro, P. Rajkumar, V. Ramasamy, Ana M. Sinito. 2010.* Magnetic parameters, trace elements and multivariate statistical studies of river sediments from the south eastern India: a case study from Vellar River. *Environmental Earth Sciences* . DOI: 10.1007/s12665-010-0704-2.

5. *Marcos A.E. Chaparro, Ana M. Sinito, V. Ramasamy, Claudia Marinelli, Mauro A.E. Chaparro, S. Mullainathan, S. Murugesan*. *2008.* Magnetic measurements and pollutants of sediments from Cauvery and Palaru River, India.. *Environmental Geology, Springer*. **56**: 425-437. *ISSN 0943-0105*

6. *Marcos AE Chaparro, Mauro AE Chaparro, Claudia Marinelli, Ana M. Sinito, 2008.* Multivariate techniques as alternative statistical tools applied to magnetic proxies for pollution: cases of study from Argentina and Antarctica. *Environmental Geology, Springer. ISSN: 0943-0105*

7. *Chaparro, M.A.E, Gogorza, C.S.G, Chaparro, M.A.E., Irurzun, M.A, and Sinito, A.M., 2006.* Review of Magnetism and Heavy Metal Pollution Studies of Various Environments in Argentina. *Earth, Planets Space,* **58**(10): 1411-1422. *ISSN 1343-8832.*

8. Coautoría en el Capítulo referido a Clasificación de cuerpos de agua del Libro "Espejos en la llanura. Las lagunas de nuestra región pampeana" del Proyecto PICT-O (Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica- UNCPBA. Código 13-11502) Planificación Estratégica de ecosistemas Lacunares Bonaerenses. Compiladores: Mg. Grosman Fabian y M. Vet. Sanzano